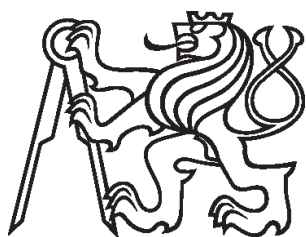


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

**Ukládání elektrické energie do
vodíku ve společnosti C-Energy
Planá s.r.o.**

Miroslav SUCHÝ

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.
2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Suchý** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **483847**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Ukládání elektrické energie do vodíku ve společnosti C-Energy Planá s.r.o.

Název bakalářské práce anglicky:

Storing of electricity in hydrogen at company C-Energy Planá s.r.o.

Pokyny pro vypracování:

- 1) Způsoby akumulace elektrické energie.
- 2) Elektrolýza vody a druhy elektrolyzérů.
- 3) Trh s elektřinou.
- 4) Návrh a ekonomické porovnání elektrolyzérů pro budoucí využití v podniku C-Energy Planá s.r.o.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Hydrogen From Water Electrolysis. Storing Energy [online]. Glasgow: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-12-803440-8.
- 2) Electrical Energy Storage [online]. Ženeva: International Electrotechnical Commission, 2011. ISBN 978-2-88912-889-1.
- 3) Trh s elektřinou: úvod do liberalizované energetiky [online]. 2. aktualizované vydání. Praha: Asociace energetických manažerů, 2016. ISBN 978-80-260-9212.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **13.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

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

V Sezimově Ústí 2 dne 11.5. 2021

Miroslav Suchý

Poděkování

Rád bych poděkoval Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za vedení mé bakalářské práce, za jeho věcné připomínky, za pomoc se získáváním informací a za konzultace během zpracovávání bakalářské práce. Rovněž bych rád poděkoval Ing. Josefu Havlíkovi za jeho pomoc při získávání potřebných materiálů a za nápomocné konzultace. A nakonec bych rád poděkoval rodičům za jejich podporu nejen při psaní této práce, ale i za podporu z jejich strany během celého mého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce řeší problematiku akumulace elektrické energie, zejména pak akumulaci do chemické energie v podobě vodíku pomocí elektrolyzérů. Práce zahrnuje technologický návrh a potřebné smlouvy pro nakupování elektrické energie na velkoobchodním organizovaném krátkodobém trhu s elektřinou vedeným společností Operátor trhu s elektřinou, a.s. (dále jen OTE, a.s.). Na základě několika konkrétních nabídek, práce obsahuje ekonomické porovnání současně nabízených elektrolyzérů na trhu.

Součástí bakalářské práce je ekonomický model v prostředí Microsoft Excel, který řeší finanční stránku celého návrhu.

Výstupem práce je výběr ekonomicky nejefektivnějšího elektrolyzérů z nabídek firem a zhodnocení, zda má smysl takovouto investici realizovat s ohledem na zvolené parametry odrážející situaci na trhu.

Klíčová slova

Elektrolyzér, vodík, krátkodobý denní trh s elektřinou, čistá současná hodnota, akumulace elektrické energie, elektrolyza vody.

Abstract

Bachelor thesis deals with problem of electrical energy storing with focus on accumulation into chemical energy of hydrogen with use of electrolyzer. This thesis contains technological design with appropriate contracts to be able to trade electrical energy on wholesale organized short-term market with electricity led by the Czech electricity and gas market operator, a.s. (further referred as OTE, a.s.). Based on several specific offers, the work contains an economic comparison of currently offered electrolyzers on the market.

Part of the bachelor thesis is economic model in Microsoft Excel, which deals with financial part of the whole proposal.

The output of this thesis is the selection of the most economically efficient electrolyzer, based on companies's offers and evaluation of whether it makes sense to make such an investment with respect to the selected parameters reflecting the market situation.

Keywords

Electrolyzer, hydrogen, short-term daily electricity market, net present value, storing of electrical energy, electrolysis of water.

Obsah

1	ÚVOD	1
2	ZPŮSOBY AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	3
2.1	NEPŘÍMÁ AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	3
2.1.1	Akumulace do mechanické energie	3
2.1.2	Akumulace do elektrochemické energie	12
2.1.3	Akumulace do chemické energie	17
2.1.4	Akumulace do termální energie	19
2.2	PŘÍMÁ AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	19
2.2.1	Akumulace do elektrické energie	19
3	ELEKTROLÝZA VODY A DRUHÝ ELEKTROLYZÉRŮ	25
3.1	Elektrolýza vody	25
3.2	Druhy elektrolyzérů	29
3.2.1	Alkalický elektrolyzér	30
3.2.2	PEM elektrolyzér	31
3.2.3	Vysokoteplotní elektrolyzér	33
4	TRH S ELEKTRINOU	37
4.1	Rozdělení podle odpovědnosti za odchylku	37
4.1.1	Maloobchodní trh (MOT)	38
4.1.2	Velkoobchodní trh (VOT)	38
4.2	Organizovaný trh	38
4.2.1	Krátkodobý trh	39
4.3	Potřebné smlouvy pro obchod na velkoobchodním trhu jakožto odběratel obchodující na organizovaném krátkodobém trhu skrze OTE	39
4.3.1	Smlouvy o zúčtování odchylek	39
4.3.2	Smlouva o přístupu na organizovaný krátkodobý trh s elektřinou	40
4.3.3	Smlouva o připojení	40
5	EKONOMICKÉ POSOUZENÍ INVESTIC	41
5.1	Kritéria ekonomické efektivity	41
5.1.1	Prostá doba návratnosti PP	41
5.1.2	Výnosnost investice (return of investment) ROI	42

5.1.3	Čistá současná hodnota (Net present value) NPV	42
5.1.4	Vnitřní výnosové procento IRR	43
5.1.5	Roční ekvivalentní peněžní tok RCF	44
5.2	Ekvivalentní výrobní náklady vodíku	45
5.2.1	Ekvivalentní roční výrobní náklady na výrobu celkového množství H ₂ za rok	45
5.2.2	Poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 kg H ₂	45
5.2.3	Poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 MWh z H ₂	46
6	EKONOMICKÝ MODEL	47
6.1	Technologické uspořádání	47
6.2	Vstupní data	47
6.3	Přehled cen všech složek podílejících se na ceně elektřiny	50
6.4	Elektrolyzér SILYZER 200	51
6.5	Elektrolyzér SILYZER 300	52
6.6	Průmyslová reverzní osmóza – RO – 4000	54
6.7	Elektrolyzér GenFuel 5 MW	55
6.8	Cenové porovnání investic do SILYZERU 300, 200 a GenFuel 5 MW	57
6.9	Závislost NPV na prodejní ceně vodíku	61
6.10	Závislost NPV na ceně emisní povolenky	64
6.11	Závislost NPV na výchozí nákupní ceně 1 MWh el. energie	66
7	ZÁVĚR	71
8	SEZNAM LITERATURY	75
9	SEZNAM PŘÍLOH	81

Obrázky

Obr. 2.1: Přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně	4
Obr. 2.2: Akumulace do stlačeného vzduchu – schéma soustavy	11
Obr. 2.3: Redoxní průtoková baterie – princip	17
Obr. 2.4: Obvod s kondenzátorem – odvození velikosti energie elektrického pole kondenzátoru.....	21
Obr. 2.5: Obvod s cívkou – odvození velikosti energie magnetického pole cívky	23
Obr. 3.1: Schéma alkalického elektrolyzéro	31
Obr. 3.2: Schéma PEM elektrolyzéro	33
Obr. 3.3: Schéma vysokoteplotního elektrolyzéro	34
Obr. 6.1: Technologické schéma.....	47
Obr. 6.2: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na diskontu	61
Obr. 6.3: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na K násobku prodejní ceny vodíku.....	63
Obr. 6.4: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na ceně emisní povolenky .	64
Obr. 6.5: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na M násobku nákupní ceny emisní povolenky.....	65
Obr. 6.6: Graf citlivostní analýzy – závislost množství vyrobeného vodíku na výchozí ceně 1 MWh elektrické energie	67
Obr. 6.7: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na maximální ceně pro nákup energie 1 MWh.....	68

Tabulky

Tab. 3.1: Tabulka použitých entropií a entalpií	25
Tab. 3.2: Elektrolýza vody v elektrolyzáru v závislosti na pracovním napětí...	28
Tab. 3.3: Základní parametry různých druhů elektrolyzáru	35
Tab. 6.1: Cena za rezervovanou kapacitu a použití sítí provozovatele distribuční soustavy.....	50
Tab. 6.2: Ostatní složky výsledné ceny elektřiny	50
Tab. 6.3: Poplatky za účast na krátkodobém denním trhu	51
Tab. 6.4: Parametry SILYZERU 200.....	52
Tab. 6.5: SILYZER 200 – roční zrychlené daňové odpisy	52
Tab. 6.6: Parametry SILYZERU 300.....	53
Tab. 6.7: SILYZER 300 – roční zrychlené daňové odpisy	54
Tab. 6.8: Základní elektrické parametry a spotřební části reverzní osmózy ...	54
Tab. 6.9: Reverzní osmóza – roční zrychlené daňové odpisy.....	55
Tab. 6.10: Parametry GenFuel 5 MW	56
Tab. 6.11: GenFuel 5 MW – roční zrychlené daňové odpisy	56
Tab. 6.12: Transformátor – roční zrychlené daňové odpisy	57
Tab. 6.13: Výkupní parametry ceny 1 MWh elektřiny pro každý rok	57
Tab. 6.14: SILYZER 300 – počáteční investice	58
Tab. 6.15: SILYZER 200 – počáteční investice	58
Tab. 6.16: GenFuel 5 MW – počáteční investice	58
Tab. 6.17: Tabulka roční produkce a spotřeby SILYZERU 200 a 300 a GenFuel 5 MW	59
Tab. 6.18: Výsledné NPV a ROI – SILYZER 200 a 300 a GenFuel 5 MW.....	60
Tab. 6.19: Výkupní parametry 1 MWh pro každý rok (výchozí cena 600 Kč·MWh ⁻¹)	66

Seznam zkratek

AC	Střídavý proud
a_{Tz}	Poměrná anuita
CČZ	Cena za činnost zúčtování
CD	Daň z elektřiny
CEP_{EUR}	Cena emisní povolenky v eurech
$CEP_{Kč}$	Cena emisní povolenky v Kč
CF	Peněžní tok
$CH2_{kg}$	Cena vodíku za kg
$CH2_{MWh}$	Cena vodíku za MWh
CM	Maximální cena elektřiny pro každý rok, za kterou ještě nakupujeme el. energii 5 MWh pro každou hodinu
COT	Cena za činnost organizace trhu
COTE	Cena za OTE
CO_2	Oxid uhličitý
CP	Cena zemního plynu
CPH	Cena za poskytování skutečných hodnot účastníkům trhu s elektřinou
CPOZE	Cena na POZE
CPT	Cena za činnost poskytování údajů z evidence o obchodních transakcích
CRP	Cena za rezervovaný příkon
CSYS	Cena za systémové služby
CSZ	Cena za registraci subjektu zúčtování
CV	Cena vody
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
ČEZ	České energetické závody
ČR	Česká republika
DPH	Daň z přidané hodnoty
EAT	Čistý zisk
EBIT	Zisk před zdaněním a úroky
EBITDA	Zisk před započtením úroků, daní a odpisů

EBT	Zisk před zdaněním
EEX	Evropská energetická burza
EGD	Distribuce elektřiny a plynu
EU	Evropská unie
EU ETS	Evropský systém obchodování s emisními povolenkami
EZP	Emise CO ₂ zemního plynu
FVE	Fotovoltaická elektrárna,
H ₂	Dvouatomová molekula vodíku
ira	Roční míra inflace
irr	Roční míra inflace regulované složky silové elektřiny
IRR	Vnitřní výnosové procento
irs	Roční míra inflace silové elektřiny na denním trhu
K	Násobek ceny vodíku
Ke	Kurz eura
KZO	Koeficienty pro zrychlené odpisování
M	Násobek ceny emisní povolenky
MC	Marginální cena 1 MWh el. energie
MIT	Massachusettský technologický institut
MOT	Maloobchodní trh
MSE	Měrná spotřeba el. energie na 1 kg H ₂
MSV	Měrná spotřeba vody na výrobu 1 m ³ H ₂
MVH	Měrná výroba H ₂ z 1 MW el. příkonu za hodinu
ND	Zaplacená daň
NN	Nízké napětí
NPV	Čistá současná hodnota
NPVZH	Čistá současná hodnota se započtením zbytkové hodnoty elektrolyzéro
NUM	Roční náklady na údržbu a mzdy
N _{vr}	Ekvivalentní roční výrobní náklady na výrobu celkového množství H ₂ za rok
n _{vr,kg}	Poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 kg H ₂
n _{vr,MWh}	Poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 MWh z H ₂
NWMh	Nakoupené MWh elektrické energie

OTE	Operátor trhu
OZE	Obnovitelné zdroje energie
p	Tlak H ₂
PC	Průměrná cena 1 MWh·r ⁻¹
PEM	Proton-exchange membrane
PH	Celkový počet hodin, kdy provede nákup 1 MWh elektrické energie
PH	Přepočet 1 kg H ₂ na Nm ³
Pi	Celkový instalovaný elektrický výkon
PMC	Průměrná marginální cena
PP	Prostá doba splatnosti
PRE	Pražská energetika
PXE	Energetická burza Praha
r	Diskont
RCF	Roční ekvivalentní tok peněz
RNO	Roční odpis
RO	Reverzní osmóza
SNG	Syntetický zemní plyn
SOE	Solid-oxide electrolyzer
SV	Množství zpotřebované vody na výrobu 1 m ³ H ₂
SZ	Subjekt zúčtování
T	Teplota H ₂
TME	Celkové množství nakoupené el. energie za rok
TNE	Celkové roční náklady za nakoupenou el. energii
TNS	Celkem zapláceno za silovou elektřinu za rok
TNV	Celkové roční náklady na vodu
TSV	Celková roční spotřeba vody
TTVH2	Množství vyrobeného vodíku za životnost elektrolyzéro
TVH2	Celkové roční množství vyrobeného vodíku
TVO2	Celkové roční množství vyrobeného kyslíku
TVV	Celkové roční výnosy za vodík
Us	Sdružené napětí
USA	Spojené státy americké

VC	Výchozí cena 1 MWh elektrické energie
VH2	Výhřevnost vodíku
VN	Vysoké napětí
VOT	Velkoobchodní trh
VVN	Velmi vysoké napětí
ZC	Zbytková cena
ZH	Zbytková hodnota elektrolyzéru
ZVN	Zvláště vysoké napětí
η	Účinnost

1 ÚVOD

Současné ambice Evropské Unie (dále jen EU) pro Českou republiku (dále jen ČR) budou znamenat další navýšení výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (dále jen OZE) v důsledku omezování spalování fosilních neobnovitelných zdrojů energie, jejichž množství klesá a jejich spalováním se uvolňuje velké množství skleníkových plynů do ovzduší. Doposud jsme byli zvyklí, že naši poptávku po energii dokážeme pokrýt během celého dne, bez ohledu na část dne. Proto pro poptávanou energii byla vždy vytvořena i nabídka. Ovšem nyní s rostoucím budováním FVE a větrných elektráren s účelem omezit standartní elektrárny typu uhelné elektrárny, se dostáváme do situace, kdy nabídka energie začíná být závislá na denní hodině, ročním období a obecně momentálním podnebí. Jenomže naše požadavky jakožto spotřebitelů energií v domácnostech se nemění a tím může vznikat problém, kdy elektrárny na OZE nebudou moci pokrýt poptávku, protože zrovna „nesvíí“ nebo „nefouká“.

Je tedy třeba řešit problém jak a do čeho lze přebytečnou vyrobenou energii akumulovat pro pozdější nedostatky. S tím přímo souvisí technologie akumulace, kdy se snažíme najít optimální řešení, které dokáže naakumulovat dostatečné množství energie na dostatečnou dobu a následně ho dokáže spolehlivě a flexibilně dodávat zpět do sítě a potřebných míst.

V této práci se budu zabývat možností akumulace elektrické energie do vodíku pomocí elektrolyzérů, jakožto technologii s velkým potenciálem do budoucnosti. Spalováním samotného vodíku nevznikají emise CO₂ a vodík vyrobený elektrolýzou se řadí mezi zelený vodík¹. Vyráběný vodík z elektrolyzéry by se vtlačel do stávajících průmyslových plynovodů zemního plynu společnosti C-Energy Planá s.r.o. a následně by byl využit v jejich plynových motorech. Motory jsou schopny pracovat i při 16 % hmotnostního podílu vodíku v zemním plynu.

¹ Zelený vodík vzniká přeměnou elektrické energie z OZE a při jeho produkci nevznikají emise CO₂.

2 ZPŮSOBY AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Elektrickou energii můžeme ukládat do mechanické, elektrochemické, chemické, elektrické a termální energie. Podle výsledné formy, do níž je elektrická energie akumulována, rozdělujeme způsoby na přímou a nepřímou akumulaci.

2.1 NEPŘÍMÁ AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Elektrická energie se ukládá do jiného druhu energie, než je elektrická.

2.1.1 Akumulace do mechanické energie

Do této skupiny patří akumulace v přečerpávacích elektrárnách, do stlačeného vzduchu a v mechanických akumulátorech. Tyto typy akumulátorů využívají přeměnu elektrické energie na kinetickou a potenciální.

2.1.1.1 Akumulace v přečerpávacích elektrárnách

Přečerpávací elektrárny fungují na principu rozdílu potenciálních energií pracovní látky (vody), kdy pro realizaci rozdílu potenciálu jsou vybudovány dvě nádrže. Nádrže jsou propojeny potrubím, uvnitř potrubí je reverzní turbína, která je připojena ke generátoru. V době nadbytku elektrické energie se pomocí čerpadel pumpuje voda do horní nádrže. V době nedostatku elektrické energie je voda z horní nádrže vypouštěna do spodní nádrže skrze turbínu, voda roztáčí turbínu a turbína přes společnou hřídel roztáčí generátor, dochází tedy k přeměně potenciální energie vody na elektrickou energii. Horní nádrž se často realizuje jako vodní přehrada. Pro spodní nádrž můžou být použity zaplavené důlní šachty, jeskyně, Podle velikosti nádrží může být elektřina vyráběna nepřetržitě až několik dní.

Tyto elektrárny dosahují účinností v rozsahu 70 % až 85 %, mají schopnost najet na plný výkon do 100 s a životnost až 100 let. Právě tato schopnost rychle reagovat na změnu požadovaného výkonu, je předurčuje k pokrývání výkonových špiček v síti.²

V současnosti jejich hlavní účel je akumulace přebytku energie z jaderných elektráren v mimošpičkové době. Ovšem s narůstající popularitou obnovitelných zdrojů jako je sluneční energie a vítr se přebytky energie vyprodukované fotovoltaikou a větrnými elektrárnami budou muset také někde ukládat a přečerpávací elektrárny se mohou jevit jako vhodný akumulátor. Značnou nevýhodou a dosti omezující podmínkou budování těchto elektráren je požadavek na vhodné umístění a velikou plochu pro výstavbu. U nás v ČR jsou tři velké přečerpávací elektrárny, přičemž ta největší je přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně s dvěma reverzními turbosoustrojími o instalovaném výkonu 2 x 325 MW.³



Obr. 2.1: Přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně⁴

Množství potenciální energie uložené v horní nádrži:

$$E_p = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \quad (\text{J}) \quad (2.1)$$

² Volně dle: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Electrical Energy Storage* [online]. Ženeva: International Electrotechnical Commission, 2011 [cit. 2020-10-23]. ISBN 978-2-88912-889-1. Dostupné z: <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>

³ Volně dle: MAREŠ, Jan, Martin LIBRA, ČZU PRAHA a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC Public, 2011, 27.02.2011, **2011**(2/2011), 6-10 [cit. 2020-10-23]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie--9696>

⁴ ČEZ. Dlouhé stráně. In: *Svět energie* [online]. Praha: Simopt, 2016 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-cez/precerpavaci-elektrarna-dlouhe-strane>

kde:

m ...hmotnost vody v horní nádrži (kg)

g ...tíhové zrychlení ($m \cdot s^{-2}$)

h_2 ...výška uložení horní nádrže (m)

h_1 ...výška uložení dolní nádrže (m)

Odvození tohoto vztahu vychází z myšlenky, že tíhové pole země je potenciální. Protože obecně pokud je vektorové pole potenciální, tak má potenciál a platí $\vec{A} = \vec{\nabla}f$, kde \vec{A} je vektorové pole a f je potenciál vektorového pole.

Pokud toto platí, pak křivkový integrál 2. druhu z pole \vec{A} lze vypočítat jako rozdíl potenciálů, a tedy tento integrál nezávisí na tvaru křivky ∂L , kterou se dostaneme z bodu k do bodu l :⁵

$$\int_{\partial L} \vec{A} \cdot d\vec{l} = f(k) - f(l) \quad (2.2)$$

Kde křivka ∂L má počáteční bod v bodě k a konečný bod v bodě l .

V případě gravitačního pole země platí vztah mezi potenciální energií a tíhovou silou:⁶

$$\vec{G} = -\vec{\nabla}U = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z}\right) \quad (2.3)$$

kde:

U ...potenciální energie, potenciál v bodě (J)

\vec{G} ...vektor tíhové síly (N)

Z tohoto vztahu (2.3) vidíme, že tíhová síla působí opačným směrem, než je směr (největšího) růstu potenciální energie U . To přesně odpovídá tomu, že od povrchu nahoru zvyšujeme potenciální energii tělesa a tíhová síla se snaží dostat těleso zpátky do nulového potenciálu, tedy dolů.

Ted' si odvodíme potenciální energii ze vzorce (2.3), vezmeme rovnici (2.3) a obě její strany vynásobíme vektorem $d\vec{r} = (dx, dy, dz)$ a upravíme:

$$\vec{G} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z}\right) / d\vec{r}$$

⁵ HÁJEK, Petr: *Přednášky z předmětu Matematická analýza II (B0B01MA2A)*, FEL ČVUT v Praze, 2018.

⁶ KONÍČEK, Petr: *Přednášky z předmětu Fyzika 1 (B1B02FY1)*, FEL ČVUT v Praze, 2018.

$$\left\langle \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} \middle| \vec{G} \right\rangle = - \left(\frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial y} dy + \frac{\partial U}{\partial z} dz \right)$$

Pravá strana rovnice je vlastně totální diferenciál U.

$$\langle d\vec{r} | \vec{G} \rangle = -dU \quad (2.4)$$

Rovnici (2.4) integrujeme a dostaneme rovnici (2.5), která popisuje potenciální energii v tíhovém poli země:

$$\langle d\vec{r} | \vec{G} \rangle = -dU / \int$$

$$U = - \int_{\partial H} \langle \vec{G} | d\vec{r} \rangle \quad (2.5)$$

kde:

∂H ...křivka, přes kterou integrujeme (po ní se pohybuje těleso při přesunu pomocí síly \vec{G} , případně \vec{F})

Uvažujme, že přesouvané těleso leží na středu souřadnic x, y, z.

Pokud budeme vnímat E_p jako práci, kterou musíme vykonat prací \vec{F} , abychom přemístili těleso z bodu \vec{h}_1 do bodu \vec{h}_2 , a tak zvýšili jeho potenciální energii U, tak naše síla \vec{F} musí jít opačným směrem, než působí tíhová síla \vec{G} , která tlačí těleso zase dolů do nulového potenciálu: $\vec{F} = -\vec{G} = -m \cdot \vec{g}$. Pro práci (rozdíl potenciálních energií) E_p bude platit:

$$E_p = \int_{\partial H} \langle \vec{F} | d\vec{r} \rangle = - \int_{\partial H} \langle \vec{G} | d\vec{r} \rangle \quad (2.6)$$

kde:

\vec{F} ...vektor síly, která přesouvá těleso směrem nahoru a má opačný směr než vektor tíhové síly \vec{G} (N)

α ...úhel mezi vektory \vec{F} a \vec{G} ($^\circ$)

Kolmý posuv předmětu směrem nahoru

Pokud budeme přesouvat těleso silou \vec{F} směrem kolmo nahoru (křivka ∂H má směr gradientu k tečné rovině povrchu vodorovné podložky, na které těleso stojí) z bodu h_1 do bodu h_2 udávající vzdálenost od povrchu (z-ová hodnota) a tíhová síla \vec{G} působí směrem kolmo dolů, tak úhel α , který svírají \vec{F} a \vec{G} je $180^\circ \Rightarrow \cos(180^\circ) = -1$, výsledné E_p :

$$E_p = \int_{\partial H} \langle \vec{F} | d\vec{r} \rangle = - \int_{\partial H} \langle \vec{G} | d\vec{r} \rangle = - \int_{\partial H} \|\vec{G}\| \cdot \|d\vec{r}\| \cdot \cos(\alpha) = - \int_{\partial H} G \cdot dr \cdot \cos(180^\circ) =$$

$$= \int_{\partial H} G \cdot dr = \int_{\partial H} m \cdot g \cdot dr \quad (2.7)$$

Tento integrál (2.7) je křivkový integrál 1. druhu přes křivku tvaru ∂H přímky z bodu h_1 do bodu h_2 (z-ové souřadnice). Protože jsme g a m zvolili jako konstanty, můžeme je dát před integrál. Integrál poté už není nic jiného, než velikost (délka) přímky mezi body h_1 a h_2 . Můžeme tedy rovnou udělat rozdíl $h_2 - h_1$, a tak získat velikost E_p při kolmém posuvu tělesa, po ose z:

$$E_p = \int_{\partial H} m \cdot g \cdot dr = m \cdot g \int_{\partial H} 1 \cdot dr = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.8)$$

Nebo můžeme obecně integrál vyřešit pomocí parametrizace $\vec{\varphi} = (t, 0, 0)$, $t \in \langle h_1; h_2 \rangle$ toto řešení je obecnější a na rozdíl od předešlého způsobu lze toto řešení použít i kdybychom uvažovali měnící se g s výškou:

$$\begin{aligned} \int_{\partial H} m \cdot g \cdot dr &= m \cdot g \cdot \int_{h_1}^{h_2} 1 \cdot \left\| \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \right\| \cdot dt = m \cdot g \cdot \int_{h_1}^{h_2} 1 \cdot 1 \cdot dt = \\ &= m \cdot g \cdot [t]_{h_1}^{h_2} = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Posuv předmětu po libovolně „klikaté“ cestě z úseček

Obecněji pokud budeme vnímat E_p jako práci, kterou musíme vykonat prací \vec{F} , abychom přemístili těleso z bodu $\vec{h}_1 = (h_{1x}, h_{1y}, h_{1z})$ do bodu $\vec{h}_2 = (h_{2x}, h_{2y}, h_{2z})$ po křivce (úsečce) ∂H a budeme uvažovat konstantní hmotnost a tíhové zrychlení (nezávisí na výšce) a budeme předpokládat, že vektory tíhové síly i zrychlení směřují do středu země (budeme se tvářit, že tíhové zrychlení odpovídá gravitačnímu, přestože nestojíme na pólu Země), tak při dostatečně nízkých výškách nad zemí jako by tíhová síla působila kolmo na zemský povrch. Potom pro naše tíhové zrychlení \vec{g} platí: $\vec{g} = (0, 0, -g)$. Výsledné E_p odpovídá rovnici (2.6):

$$E_p = \int_{\partial H} \langle \vec{F} | d\vec{r} \rangle = - \int_{\partial H} \langle \vec{G} | d\vec{r} \rangle$$

Je to integrál 2. druhu přes křivku ∂H z bodu \vec{h}_1 do \vec{h}_2 z vektoru \vec{g} . Naši integraci si můžeme rozdělit do 3 kroků, tedy půjdeme nejdříve z (h_{1x}, h_{1y}, h_{1z}) do (h_{2x}, h_{1y}, h_{1z}) s parametrizací $\vec{\varphi}_1 = (t, h_{1y}, h_{1z})$, $t \in \langle h_{1x}; h_{2x} \rangle$, poté půjdeme z (h_{2x}, h_{1y}, h_{1z}) do (h_{2x}, h_{2y}, h_{1z}) s parametrizací $\vec{\varphi}_2 = (h_{2x}, t, h_{1z})$, $t \in \langle h_{1y}; h_{2y} \rangle$ a v posledním kroku z (h_{2x}, h_{2y}, h_{1z}) do (h_{2x}, h_{2y}, h_{2z}) s parametrizací $\vec{\varphi}_3 = (h_{2x}, h_{2y}, t)$, $t \in \langle h_{1z}; h_{2z} \rangle$.

Nejdříve si vezmeme rovnici (2.6) a dosadíme za $\vec{G} = m \cdot \vec{g}$:

$$E_p = - \int_{\partial H} \langle \vec{G} | d\vec{r} \rangle = -m \int_{\partial H} \langle \vec{g} | d\vec{r} \rangle = -m \int_{\partial H} \langle (0,0,-g) | (dx, dy, dz) \rangle$$

Nyní si integraci rozdělíme do 3 kroků, dosadíme naše parametrizace a vypočítáme integrály:

$$\begin{aligned} -m \int_{\partial H} \langle (0,0,-g) | (dx, dy, dz) \rangle &= -m \int_{h_{1x}}^{h_{2x}} \left\langle \vec{g}^\circ \vec{\varphi}_1 \left| \frac{\partial \vec{\varphi}_1}{\partial t} \right. \right\rangle \cdot dt - \\ &-m \int_{h_{1y}}^{h_{2y}} \left\langle \vec{g}^\circ \vec{\varphi}_2 \left| \frac{\partial \vec{\varphi}_2}{\partial t} \right. \right\rangle \cdot dt - m \int_{h_{1z}}^{h_{2z}} \left\langle \vec{g}^\circ \vec{\varphi}_3 \left| \frac{\partial \vec{\varphi}_3}{\partial t} \right. \right\rangle \cdot dt = \\ &= -m \int_{h_{1x}}^{h_{2x}} \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} \left| \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right. \right\rangle \cdot dt - m \int_{h_{1y}}^{h_{2y}} \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} \left| \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right. \right\rangle \cdot dt \\ &- m \int_{h_{1z}}^{h_{2z}} \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} \left| \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right. \right\rangle \cdot dt = 0 - 0 - m \int_{h_{1z}}^{h_{2z}} -g \cdot dt \\ &= m \cdot g \int_{h_{1z}}^{h_{2z}} 1 \cdot dt = [t]_{h_{1z}}^{h_{2z}} = m \cdot g \cdot (h_{2z} - h_{1z}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Z tohoto výsledku vidíme, že změna potenciální energie je závislá pouze na souřadnici z polohového vektoru \vec{h} a nezávisí na tom, jak je cesta z bodu \vec{h}_1 do bodu \vec{h}_2 „klikatá“. A to proto, protože když rozdělíme integraci na libovolný počet úseček (1 úsečka = integrace ve třech krocích), tak souřadnice x a y polohového vektoru \vec{h} se vždy zobrazí na 0 a všechny z -ové souřadnice mezi počátkem a koncem se pokrátí. Například pokud by se křivka ∂H skládala ze 3 úseček, tak bychom sčítali 9 integrálů, kde 6 integrálů by se zobrazilo na 0 zbylé 3 integrály náleží z -ové souřadnici polohového vektoru \vec{h} . Pomocí vytýkání bychom se nakonec dostali do stejného tvaru jako je rovnice (2.10).

V rovnici (2.1) výšky h_1 a h_2 jsou právě z -ové souřadnice polohového vektoru: $h_{1z} = h_1, h_2 = h_{2z}$

Druhou možností, jak vypočítat práci E_p je pomocí potenciálu, kde využijeme vztah (2.3). Pokud je funkce potenciální, pak je nevírová, to znamená, že rotace této funkce je nulový vektor:

$$\text{rot} \vec{g} = \vec{\nabla} \times \vec{g} = \left(\frac{\partial g_z}{\partial y} - \frac{\partial g_y}{\partial z}, \frac{\partial g_x}{\partial z} - \frac{\partial g_z}{\partial x}, \frac{\partial g_y}{\partial x} - \frac{\partial g_x}{\partial y} \right) = \vec{0}?$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{g} = (\mathbf{0} - \mathbf{0}, \mathbf{0} - \mathbf{0}, \mathbf{0} - \mathbf{0}) = \vec{0}$$

Rotace vektoru tíhové zrychlení \vec{g} je rovna $\vec{0}$, to nám říká, že pole \vec{g} může mít potenciál.

Potenciál U vypočítáme na základě rovnice (2.3):

$$\vec{F} = -\vec{G} = \vec{\nabla}U = \left(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z}\right) = -m \cdot \vec{g} = -m \cdot (0, 0, -g) \quad (2.11)$$

To je soustava 3 diferenciálních rovnic:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -m \cdot 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = -m \cdot 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -m \cdot (-g)$$

Začneme soustavu řešit od zdola, třetí rovnice soustavy:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -m \cdot (-g) \Rightarrow \int 1 \cdot dU = \int m \cdot g \cdot dz \Rightarrow U = m \cdot g \cdot z + c(x, y)$$

Dosadíme do druhé rovnice soustavy:

$$\frac{\partial U}{\partial y} = -m \cdot 0 \Rightarrow \frac{\partial(m \cdot g \cdot z + c(x, y))}{\partial y} = -m \cdot 0 \Rightarrow 0 + \frac{\partial c(x, y)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial c(x, y)}{\partial y} = 0 \Rightarrow \int 1 \cdot dc(x, y) = \int 0 \cdot dy \Rightarrow c(x, y) = 0 + c(x) = c(x)$$

$$U = m \cdot g \cdot z + c(x, y) = m \cdot g \cdot z + c(x)$$

Dosadíme do první rovnice soustavy:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -m \cdot 0 \Rightarrow \frac{\partial(m \cdot g \cdot z + c(x))}{\partial x} = -m \cdot 0 = 0 + \frac{\partial c(x)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial c(x)}{\partial x} = 0 \Rightarrow \int 1 \cdot dc(x) = \int 0 \cdot dx \Rightarrow c(x) = 0 + K = K$$

$$U = m \cdot g \cdot z + c(x) = m \cdot g \cdot z + K$$

Pokud si zvolíme střed souřadnic na povrchu země jako bod nulového potenciálu, tedy $U(0) = 0$, pak:

$$0 = U(0) = m \cdot g \cdot 0 + K = K$$

$$K = 0$$

Výsledný tvar rovnice pro potenciál tělesa v nějaké výšce nad povrchem přejde do tvaru:

$$U = m \cdot g \cdot z \quad (2.12)$$

Vrátíme-li se tedy k problému spočítat E_p , lze místo integrálu použít rozdíl potenciálů pomocí dosažení krajních bodů křivky ∂H do rovnice (2.12):

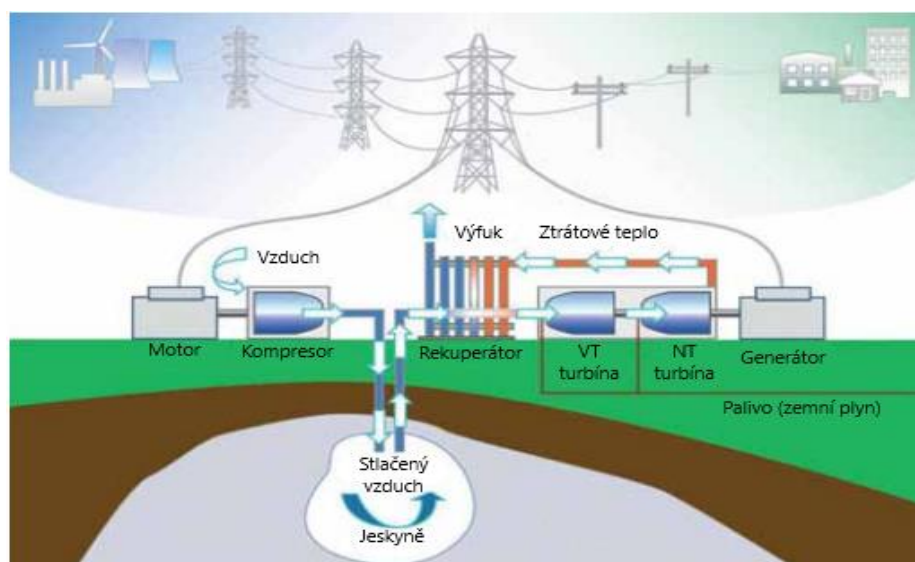
$$\begin{aligned} E_p &= \int_{\partial H} \langle \vec{F} | d\vec{r} \rangle = - \int_{\partial H} \langle \vec{G} | d\vec{r} \rangle = U(\vec{h}_2) - U(\vec{h}_1) = m \cdot g \cdot h_{2z} - m \cdot g \cdot h_{1z} \\ &= m \cdot g \cdot (h_{2z} - h_{1z}) \end{aligned}$$

Hodnota E_p tedy nezáleží na tvaru křivky ∂H , po které se dostaneme z h_{1z} do h_{2z} a pro výpočet nám stačí znát potenciál U .

2.1.1.2. Akumulace do stlačeného vzduchu

Zde je hlavní výhodou dostupnost vzduchu. Přeměňovaná elektrická energie pohání kompresor, ten vzduch stlačí do úložných prostorů, zásobníků. Při stlačování dochází k disipaci tepla, to má za následek snížení teploty vzduchu v zásobníku. Toto teplo se buď uloží pro opětovné použití, nebo se v podobě ztráty odvede skrze stěny. Často se pro skladování používají jeskynní komplexy nebo důlní šachty, případně speciální zásobníky umístěné na povrchu.

Pro opětovnou přeměnu stlačeného vzduchu na elektrickou energii je nutno do vzduchu přimíchat zemní plyn. Tuto směs je dále nutno ohřát na požadovanou teplotu pro plynovou turbínu. Směs se v turbíně zapálí a svou expanzí turbínu pohání a ta pohání generátor. Systémy, které dokážou uvolněné teplo akumulovat a posléze použít k ohřátí směsi, dosahují účinností do 50 %. Výhodou ukládání do podzemních prostorů je jejich vysoká kapacita. Limitující pro výstavbu těchto systémů je pak geografické umístění použitelných podzemních komplexů.



Obr. 2.2: Akumulace do stlačeného vzduchu – schéma soustavy ⁷

2.1.1.3. Akumulace energie v mechanických akumulátorech

Tento typ akumulace spočívá v ukládání kinetické energie v rotujících hmotách (setrvačnicku). Soustava mechanického akumulátoru je složena z rotujícího setrvačnicku, ložisek a z elektromotoru/generátoru staticky připevněného k celé soustavě. Akumulovaná elektrická energie napájí motor a ten roztáčí setrvačnicku na konstantní rychlost. Pokud chceme uložit větší množství energie, je potřeba zvýšit rychlost setrvačnicku. Pokud chceme akumulovanou energii odebírat, motor přejde do generátorového režimu a setrvačnicku předává svou kinetickou energii ke generaci elektrické energie. Tím setrvačnicku snižuje svoji rychlost.

Dnes se používají dva typy setrvačnickových akumulátorů, pomaloběžné a rychloběžné. Pomaloběžné setrvačnicku, používané od roku 1970, používají velký těžký ocelový setrvačnicku rotující v mechanických ložiscích při rychlostech do 8 000 ot·min⁻¹. Průměrné měrné množství akumulované energie se pohybuje okolo 5 Wh·kg⁻¹.

Rychloběžné setrvačnicku jsou novější technologie, zde je setrvačnicku vyroben z vysokopevnostních uhlíkových vláken, je tedy značně lehčí než ocelový setrvačnicku a je roztáčen

⁷ INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Electrical Energy Storage [online]. Ženeva: International Electrotechnical Commission, 2011 [cit. 2020-10-23]. ISBN ISBN 978-2-88912-889-1. Dostupné z: <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>

na rychlosti až $100\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$.⁸ Takto vysoké rychlosti by se projevíly značnými ztrátami třením se vzduchem, proto se setrvačnický umístí do vakua. Navíc místo mechanických ložisek se používají magnetická ložiska s magnetickou levitací pro omezení dalších ztrát třením. Průměrné měrné množství akumulované energie se pohybuje okolo $100\text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Momentálně je tento typ setrvačnický velice ekonomicky náročný a používá se proto pouze ve speciálních aplikacích, jako například pro použití ve vesmíru organizací NASA.

Největší vyráběné setrvačnický s hmotností kolem 10 tun dokážou uložit energii až 5 MJ. Výhodou ukládání energie do setrvačnický je možnost dodat velké množství energie za krátký čas, nízké nároky na údržbu, dlouhá doba životnosti (v průměru asi 20 let), téměř neomezení počet cyklů nabití a vybití.

Nevýhodou pak můžou být značné ztráty energie v důsledku tření setrvačnický s okolním vzduchem nebo tření vzniklé v ložiscích. Obě tyto nevýhody potlačuje technologie pro rychloběžné setrvačnický.

Množství kinetické energie uložené v rotujícím setrvačnický:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (\text{J}) \quad (2.13)$$

kde:

J...moment setrvačnosti ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

ω ...úhlová rychlost setrvačnický ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.1.2 Akumulace do elektrochemické energie

Do této skupiny patří akumulátory olovené (Pb), na bázi niklu NiCd a NiMH, na bázi lithia (Li-ion), v konfiguraci kov-vzduch, na bázi sodíku a síry (NaS), na bázi sodíku, niklu a chloridu (NaNiCl) a nakonec průtokové akumulátory. Tyto typy akumulátorů využívají přeměnu elektrické energie na elektrochemickou pomocí dvou elektrod, anody

⁸ ZAPOMĚL, Jaroslav. Akademie věd ČR. *Skladování energie – setrvačnický* [online]. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, 2017 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <http://upase.it.cas.cz/skladovani-energie-setrvačnický/#:~:text=K%20dod%C3%A1v%C3%A1n%C3%AD%20energie%20do%20setrva%C4%8Dn%C3%ADku,pou%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDm%20prost%C5%99edk%C5%AFm%20pro%20skladov%C3%A1n%C3%AD%20energie>.

a katody. Elektrody mají elektrochemický potenciál a jsou umístěné v elektrolytu, průchodem elektrického proudu navyšujeme rozdíl elektrochemických potenciálů mezi elektrodami a tím navyšujeme množství naakumulované energie.

Navíc sériovým řazením jednotlivých článků jsme schopni si nastavit požadované napětí. Kapacita baterií je udávána v Ah, případně Wh (po vynásobení ampérhodin vlastním nominálním napětím daného akumulátoru, článku). Například baterii o kapacitě 3 Ah bychom mohli v ideálním případě nabíjet z minimální hodnoty na plně nabitou proudem 3 A po dobu 1 hodiny nebo proudem 1,5 A po dobu 2 hodin nebo proudem 6 A po dobu 30 minut. Nicméně každá technologie má své meze a ty je nutno respektovat. Zde právě velikostí nabíjecího/vybíjecího proudu, které dokáže daná baterie snášet. Účinnost baterie představuje poměr mezi množstvím elektrické energie odebrané z akumulátoru během vybíjení a množstvím elektrické energie dodané k jejímu nabití.

2.1.2.1. Olověné akumulátory

Olověné akumulátory jsou celosvětově nejvíce používaným typem akumulátoru. Používají se jak pro stacionární systémy, tak systémy v pohybu, například pro napájení záložních systémů, ukládání energie z fotovoltaiky nebo v automobilech. Obecně pro stacionární aplikace musejí baterie splňovat přísnější požadavky.

Typicky se jejich životnost pohybuje v rozmezí 6 až 15 let s životností cca 1500 cyklů při hloubce vybíjení 80 %. Svorkové napětí jednoho článku je cca 2 V.

Hlavní výhodou je jejich pořizovací cena a odolnost proti nízkým teplotám.

Mezi hlavní nevýhody patří ekologická zátěž používáním olova a snižování celkové kapacity baterie a snížení počtů možných nabíjecích/vybíjecích cyklů při nerespektování parametrů navržených výrobcem. Zejména tedy rychlé a hluboké vybíjení (pod 20% kapacity) může silně akumulátor poškodit.

2.1.2.2. Akumulátory na bázi niklu (NiCd, NiMH)

Komerčně na trh byly NiCd baterie uvedeny kolem roku 1915 a NiMH až kolem roku 1995. V porovnání s olověnými bateriemi, mají baterie na bázi niklu vyšší hustotu výkonu ($W \cdot m^{-3}$) a vyšší počet cyklů. NiCd baterie mají svorkové napětí jednoho článku cca 1,2 V a vynikají zejména schopností snášet nízké teploty od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do asi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na druhou stranu jejich použití je prozatím omezeno kvůli vysoké toxicitě kadmia pro stacionární aplikace. NiMH baterie mají podobné vlastnosti jako NiCd, liší se asi 10x nižší možnou nominální kapacitou. Nicméně mají vyšší hustotu energie ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$) a nemají v sobě toxické kadmium, proto mají dnes značné uplatnění pro hybridní vozy. Pro stacionární aplikace jsou dnes nahrazovány spíše bateriemi na bázi lithia.

2.1.2.3. Akumulátory na bázi lithia (Li-ion)

V dnešní době se s lithiovými bateriemi můžeme setkat u smart phonů, notebooků, elektrokol, elektromobilů a u v mnoha dalších aplikací. Svorkové napětí jednoho článku dosahuje až 3,7 V a od roku 2000 hromadně nahrazují NiMH baterie, jelikož jedna Li-ion baterie o napětí 3,7 V nahradí 3 baterie NiCd, NiMH. Na výrobu elektrod se používá zejména kobalt. Elektrolyt tvoří lithiová sůl.

Jejich výhodou je vysoká energetická hustota asi 200 až 250 $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ (potenciálně až 410 $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$), vysoká účinnost v rozmezí 95 % - 98 % a variabilita možné rychlosti vybíjení od jednotek sekund až po týdny. To znamená, že Li-ion bateriím nevadí vyšší proudy, jejich životnost se pohybuje kolem 5000 cyklů, ale i více v závislosti na použitých materiálech elektrod.

Nevýhodou je jejich vysoká cena v porovnání s jinými bateriemi a možné vysoké přehřívání v důsledku přílišného vybíjení/nabíjení – nutno sensoricky kontrolovat a regulovat.

Právě společnost C-Energy Planá s.r.o. v roce 2019 uvedla do provozu největší bateriové uložení v ČR od společnosti Siemens, jedná se o systém SIESTORAGE. Tento systém v sobě mimo jiné zahrnuje právě Li-ion bateriové články o výkonu 4 MW a kapacitě 2,5 MWh.

2.1.2.4. Akumulátory kov-vzduch

U tohoto typu akumulátoru vzniká elektrická energie reakcí mezi anodou tvořenou čistým kovem (zinek, lithium, hliník, hořčík) a katodou tvořenou přiváděným vzduchem. Pro samotnou elektrochemickou reakci je použit pouze kyslík ze vzduchu. Největší potenciál má kombinace lithium-vzduch, kde jejich energetická hustota dosahuje hodnot 11,14 $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ (bez hmotnosti kyslíku, ten není uložen uvnitř baterie) nicméně kvůli vysoké reaktivitě lithia se vzduchem, při které se uvolňuje značné množství tepla, může

vznikat riziko požáru. Z toho důvodu se dnes používají převážně zinek-vzduch baterie, které ale nedosahují takové energetické hustoty. Ta se pohybuje kolem $1,35 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$. V porovnání s lithiovými bateriemi mají až třikrát větší energetickou hustotu, a proto jsou jejím značným konkurentem. Díky nízkým investičním nákladům (tento systém má vlastně jednu kovovou elektrodu a ta může být zároveň z relativně nenákladných materiálů) mají do budoucna značný potenciál pro ukládání energie pro distribuční a přenosové aplikace, ale i pro elektromobilitu.⁹

2.1.2.5. Akumulátory na bázi sodíku a síry (NaS)

Elektrody tohoto typu baterie jsou v tekutém stavu. Roztavená síra tvoří katodu a roztavený sodík tvoří anodu. Obě tyto elektrody jsou odděleny elektrolytem v pevném skupenství. Aby zůstaly obě elektrody v kapalném skupenství, pohybuje se provozní teplota baterie kolem $300 \text{ }^\circ\text{C}$ až $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Jejich životnost se pohybuje kolem 4500 cyklů nebo cca 15 let, vybíjecí čas v rozmezí 6 až 7,2 hodin, účinnost kolem 75 % a schopnost reagovat na změny v rámci milisekund. Dále disponují vysokou energetickou hustotou asi $170 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ (potenciál této technologie je až $792 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$, tedy dvojnásobek Li-ion baterií) a svorkovým napětím jednoho článku kolem 2 V.¹⁰

V současné době jsou používány například v Japonsku, Německu, USA pro pokrývání energetických špiček během dne, tedy pro stabilizaci sítě a pro akumulaci energie z fotovoltaiky. Zatím největší NaS baterie má kapacitu 32 MWh, maximální výkon 4 MW.

2.1.2.6. Akumulátory na bázi sodíku, niklu a chloridu (NaNiCl)

Podobně jako NaS má tento typ baterie provozní teplotu kolem $270 \text{ }^\circ\text{C}$ a konstrukčně se liší pouze v materiálu katody, kde tady je tvořena zkapalněným NiCl. V porovnání s NaS mají NaNiCl vyšší svorkové napětí jednoho článku kolem 2,58 V a lépe zvládají

⁹ Volně dle: REICHL, Tomáš. Metal-air baterie. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2015, 9.4.2015 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/metal-air-kov-vzduchova-baterie>

¹⁰ Volně dle: REICHL, Tomáš. Sodíkové baterie. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2015, 15.5.2015 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/sodikove-baterie-konstrukce-princip-cinnosti-a-aplikace>

poruchové stavy. V současné době se testuje jejich použití pro elektromobily a podobná využití jako NaS baterie.

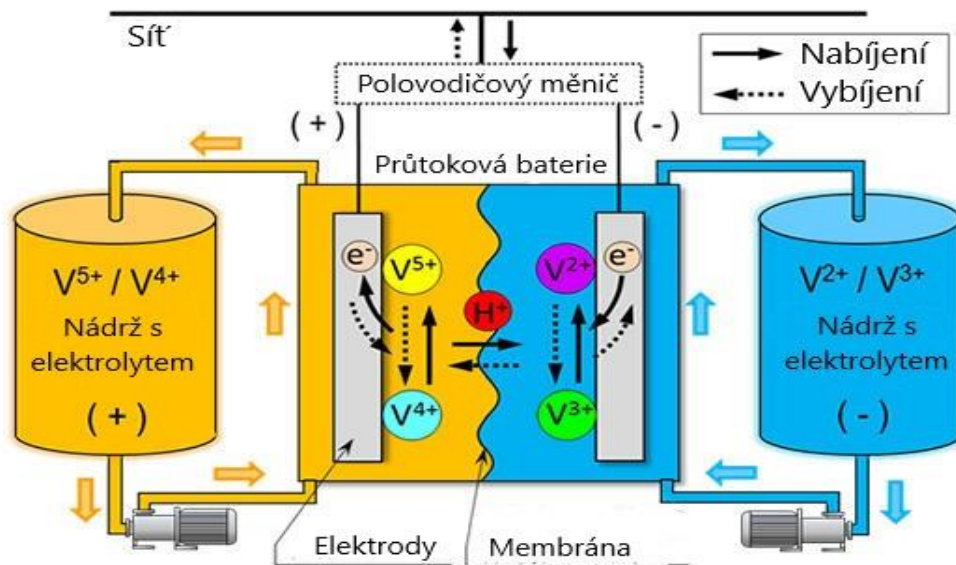
2.1.2.7. Průtokové akumulátory

Původní koncept těchto baterií byl vytvořen NASA v sedmdesátých letech pro ukládání energie při dlouho trvajících vesmírných letech.

Mají výhodu v téměř neomezeném množství nabíjecích/vybíjecích cyklech a v neomezené hloubce vybití co se týče případné ztráty svých napájecích vlastností. Proto jsou vhodné pro dlouhodobou akumulaci energie a pro budoucí další rozvoj OZE se jeví jako dobrý prostředek pro stabilizaci sítě v době nedostatku energie plynoucí z absence slunečního svitu nebo větru.

(Redoxní) průtokové baterie jsou sestaveny ze dvou okruhů oddělených porézním separátorem nebo membránou vodivou pro ionty. Každý okruh se skládá z nádrže s kapalným elektrolytem. Ten má v sobě elektroaktivní látky (například vanadiové soli) článku s elektrodou a čerpadla, které pumpuje elektrolyt k elektrodě. Galvanickým propojením elektrod elektroaktivní látky v elektrolytu při vybíjení baterie způsobí v elektrolytu kladné elektrody redukci (elektrolyt přijme elektron) a v elektrolytu záporné elektrody oxidaci (elektrolyt odevzdá elektron elektrodě) a tím vznik rozdílu potenciálů. Při nabíjení je proces opačný. Elektrolyt záporné elektrody přijme elektron z elektrody (redukce) a tím sníží své protonové číslo a elektrolyt kladné elektrody odevzdá elektron (oxidace) a tím zvýší své protonové číslo. Tím elektrolyt získává znovu své vlastnosti. Hustota energie, kterou lze nabít do baterie je dána množstvím elektrolytu, a tedy i velikostí nádrží. Hustota výkonu je dána velikostí článků s elektrodami. Možné svorkové napětí při vybíjení se pohybuje v rozmezí 1,4 V až 2 V a účinnost v rozmezí 75 % do 85 %.¹¹

¹¹Volně dle: SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES. Initiating Redox Flow Batteries. *Sumitomo Electric Industries* [online]. Osaka: Sumitomo Electric Industries, 2018, 18.12.2018 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://global-sei.com/company/press/2018/12/prs102.html>



Obr. 2.3: Redoxní průtoková baterie – princip ¹²

2.1.3 Akumulace do chemické energie

Výstupem této akumulace jsou sekundární (druhotné) zdroje energie (byly vyrobeny lidskou činností). Jedná se o použití nadměrného množství elektrické energie k výrobě vodíku a syntetického zemního plynu, které se stlačí do nádob a mohou se uskladnit na téměř neomezenou dobu. Právě tato technologie má veliký potenciál do budoucna pro skladování elektrické energie. Lze takto skladovat energii v hodnotách TWh. Navíc jejich použití zasahuje do mnoha odvětví. Například použití v dopravě, pro vytápění nebo pro chemický průmysl.

2.1.3.1. Akumulace elektrické energie do vodíku

Začíná to výrobou vodíku v elektrolyzáru. Do elektrolyzáru přivedeme vodu jakožto palivo pro štěpnou reakci, kterou zajistí průchod elektrického proudu elektrodami. Na jedné elektrodě vzniká plynný vodík a na druhé vzniká plynný kyslík. Oba tyto produkty dosahují většinou (v závislosti na technologii daného elektrolyzáru) vysoké čistoty. Dalším krokem je takto vzniklý vodík H₂, kyslík O₂ stlačit pomocí kompresoru nebo zka-

¹² Tamtéž

palnit a uložit do tlakových lahví. Případně je možné vyrobený vodík vtlačet do plynovodů zemního plynu. V posledním kroku se vodík z těchto lahví použije jako palivo pro palivový článek, ve kterém po přivedení vodíku a kyslíku vznikne opačná reakce k elektrolýze. Vodík a kyslík se spojí (vznikne voda), tím se uvolní teplo a elektrony. Vzniká nám tedy elektrická energie. Moderní elektrolyzéry nabízené na trhu jsou schopny vyrábět bez problému tisíce m³ vodíku za hodinu. A ačkoliv jejich celková AC-AC účinnost dosahuje hodnot kolem 55 %, právě kvůli výše uvedeným vlastnostem, má tato technologie vysoký potenciál.

Více k problematice elektrolyzérů se bude věnovat další část práce.

2.1.3.2. Akumulace energie do syntetického zemního plynu (SNG)

V této technologii se postupuje při výrobě SNG skoro identicky jako v případě čistého vodíku, jenom po elektrolýze vody, je potřeba vodík H₂ společně s oxidem uhličitým CO₂ přivést do speciálního reaktoru pro výrobu metanu. Důvodem, proč se provádí tato operace přeměny H₂ na SNG je, že se SNG snadněji skladuje. Dále pak je potřeba vyrobený SNG uložit. To můžeme provést například stlačením do lahví nebo třeba využití prostorů jeskyní. Případně lze vyrobené SNG pouštět do již existujících plynovodů. Jako vhodný zdroj CO₂ se jeví zbytkové CO₂ vzniklé při spalování fosilních paliv. Dále pak vědci z MIT vyvinuli novou technologii pro sběr CO₂ z ovzduší. Principiálně jde o velké elektrochemické články, které jsou vedle sebe postaveny s mezerou pro proudění vzduchu. Každý článek se skládá z 2 aktivních elektrod. Na každou je nanesen separátor a mezi separátorem je další elektroda. Elektrody jsou elektricky buzeny a molekuly CO₂ se zachytávají na elektrodách. Takto nastrádané CO₂ by bylo možné využít pro metanový reaktor. Energie potřebná pro zachycení 1 tuny CO₂ odpovídá asi 1 GJ.¹³ Kvůli dalším operacím zařazených do procesu výroby SNG celková AC-AC účinnost dosahuje hodnot ještě menších než výroba vodíku, kolem 35 %.

¹³Volně dle: MAJLING, Eduard. Nová technologie zachytávání CO₂. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2019, 2.11.2019 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/emise-co2/vedci-americkeho-mit-vyvinuli-novou-metodu-zachytavani-co2-ze-vzduchu>

2.1.4 Akumulace do termální energie

Zde lze rozlišit dva základní způsoby, a to akumulace pomocí latentního tepla a akumulace pomocí citelného tepla.

2.1.4.1. Akumulace do citelného tepla

Princip akumulace je založen na přeměně elektrické energie na tepelnou. Touto tepelnou energií poté ohříváme akumulační médium a zvyšujeme jeho teplotu. Jedná se typicky o bojleru používané doma. Elektrickou energií tedy vytváříme Joulovo teplo, a to se ukládá do vody pomocí zvyšování teploty vody.

2.1.4.2. Akumulace do latentního tepla

Princip akumulace je opět založen na přeměně elektrické energie na tepelnou s tím rozdílem, že teplo dodané látce nezvyšuje její teplotu. Latentní teplo (někdy označováno jako skupenské teplo) je dodáno látce, aby změnila své skupenství. Nejvíce rozšířeným médiem pro akumulaci jsou sloučeniny solí. Soli původně v pevném skupenství pomocí latentního tepla změni skupenství na kapalné (soli se roztaví). Roztavením solí jsme do nich uložili energii. energii poté můžeme zase získat zpět tak, že se látka ochladí (například roztavené soli budou vypařovat vodu) a změni zpět své skupenství na pevné. Právě při tomto zpětném přechodu do pevného skupenství je latentní teplo zpátky uvolňováno a lze jej využít.

Takto lze skladovat velké množství energie

2.2 PŘÍMÁ AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Elektrická energie se ukládá opět do elektrické energie ve formě elektrických a magnetických polí.

2.2.1 Akumulace do elektrické energie

Zde elektrická energie nebude přeměňována na jiný druh energie, ale bude uložena buď do elektrického pole kondenzátoru nebo do magnetického pole cívky.

2.2.1.1. Akumulace elektrické energie do superkondenzátorů

Někdy jsou také označovány jako double-layer capacitors. Od klasických kondenzátorů se liší zejména velikostí kapacity, kdy klasické kondenzátory dosahují kapacit od desítek pF do stovek μF . Zatímco superkondenzátory dosahují kapacit několik tisíc faradů. Disponují svorkovým napětím od 1 V do 3 V, v závislosti na použitém elektrolytu. Další jejich výhodou je schopnost velice rychlého nabíjení a vybíjení, v řádu pár sekund, díky minimálnímu vnitřnímu odporu. Dále pak životnost, buď 10 let nebo asi milion cyklů nabití/vybití. Mohou pracovat ve velkém rozsahu teplot bez většího ovlivnění funkčnosti a dosahují účinností až 95 %.

Nevýhoda spočívá v jejich vysokém samovybíjení a také napětí na svorkách je závislé na množství náboje, kterým je kondenzátor nabit.

Proto jsou vhodné spíše do aplikací, kde je potřeba akumulátor rychle a cyklicky vybit/nabít.¹⁴

Množství elektrické energie uložené v elektrickém poli superkondenzátoru:

$$E_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (J) \quad (2.14)$$

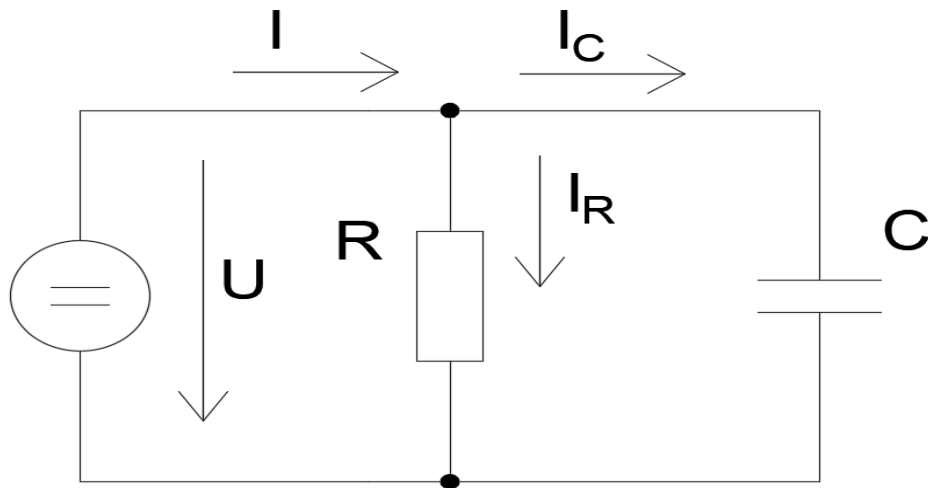
kde:

C ...kapacita superkondenzátoru (F)

U ...napětí na svorkách superkondenzátoru (V)

Vztah (2.14) lze odvodit pomocí základního obvodu s kondenzátorem, ohmickým odporem a zdrojem stejnosměrného napětí (proudový zdroj) při uvažování přechodného děje.

¹⁴ TICHÝ, Tomáš: *Přednášky z předmětu Výroba elektronických zařízení (B1M13VEZ)*, FEL ČVUT v Praze, 2019.



Obr. 2.4: Obvod s kondenzátorem – odvození velikosti energie elektrického pole kondenzátoru¹⁵

Pro obvod v obr 2.4 si napíšeme proudovou rovnici v uzlu podle 1. kirchhoffova zákona:

$$I = i_R(t) + i_C(t) = \frac{u(t)}{R} + C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (2.15)$$

Dále obě strany rovnice (2.15) vynásobíme členem $u(t) \cdot dt$, abychom dostali členy rovnice do energetického vyjádření (bilance):

$$u(t) \cdot I \cdot dt = \frac{u^2(t)}{R} \cdot dt + C \cdot u(t) \cdot du(t) \quad (2.16)$$

V rovnici (2.16) levá strana odpovídá celkové dodané energii do obvodu ze zdroje stejnosměrného napětí U . Člen $\frac{u^2(t)}{R} \cdot dt$ odpovídá ztrátové energii na rezistoru R , Jouleovo teplo. A poslední člen $C \cdot u(t) \cdot du(t)$ odpovídá právě přírůstku energie elektrického pole akumulující se v kondenzátoru C , tento člen odpovídá tedy derivaci (změně) el. pole $E_{el} \Rightarrow C \cdot u(t) \cdot du(t) = dE_{el}$.

$$C \cdot u(t) \cdot du(t) = dE_{el} \quad (2.17)$$

Nyní rovnici (2.17) integrujeme:

$$C \cdot u(t) \cdot du(t) = dE_{el} / \int$$

$$E_{el} = \int_0^U C \cdot u(t) \cdot du(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (2.18)$$

Rovnice (2.18) tedy odpovídá rovnici (2.14).

¹⁵ PANKRÁČ, Vítězslav: *Přednášky z předmětu Elektromagnetické pole (B1B17EMP)*, FEL ČVUT v Praze, 2019.

2.2.1.2. Akumulace elektrické energie do magnetického pole cívky

V této technologii se využívá supravodivých materiálů a jejich supravodivosti (nulový činný odpor). Pro dosažení supravodivosti je potřeba, aby cívka ze supravodivého materiálu byla chlazená pod kritickou teplotu T_C , která činí asi 4 K pro nízkoteplotní supravodiče (pro chlazení se používá tekuté hélium) a asi 77 K pro vysokoteplotní supravodiče (chlazení tekutým dusíkem). Dále pak magnetická indukce B působící na cívku musí být nižší než kritická hodnota B_C . S hodnotou B_C je přímo spojená hodnota proudu I cívku, která přispívá k působícímu B , a proto z hodnoty B_C jsme schopni určit právě nejdůležitější kritickou hodnotu proudu I_C cívku. Právě na velikosti proudu závisí množství akumulované energie. Pro nabíjení se používá stejnosměrný proud.

Právě vysokoteplotní supravodiče jsou do budoucna zajímavou technologií, kvůli vyšší pracovní teplotě. Tato technologie dosahuje účinností 85 % až 90 % a cívky jsou schopny velice rychlého vybíjení, a tedy poskytnutí vysokého množství energie za krátký čas.

Nevýhodou je právě nutnost účinného chlazení, které musí působit po celou dobu akumulace energie. Pokud bychom mohli chladit cívku neomezeně dlouho, mohli bychom také neomezeně dlouho danou energii skladovat bez větších ztrát.

Největší postavené akumulátory s kapacitou energie kolem 10 MJ jsou používány experimentálně ve fyzice nebo pro jadernou fúzi.¹⁶

Množství elektrické energie uložené v magnetickém poli cívky:

$$E_{mag} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (J) \quad (2.19)$$

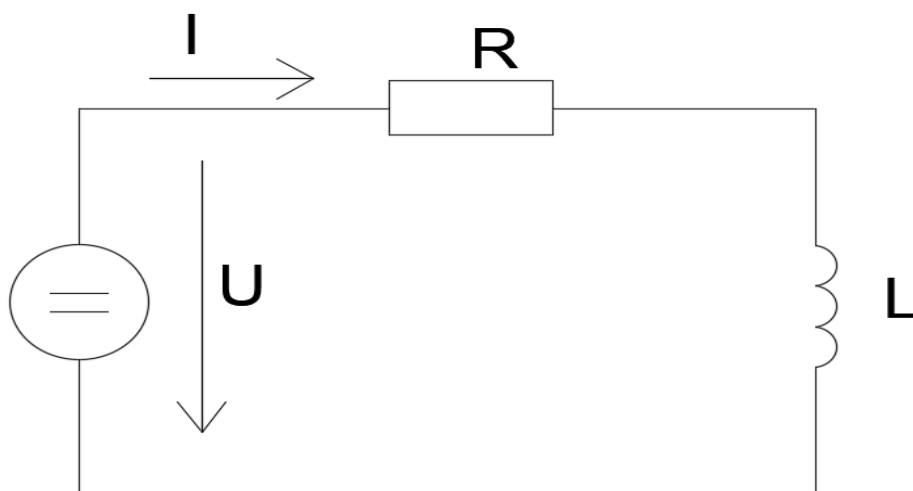
kde:

L ...indukčnost cívky (H)

I ...proud cívku (I)

Vztah (2.19) lze odvodit pomocí základního obvodu s cívku, ohmickým odporem a zdrojem stejnosměrného napětí při uvažování přechodného děje.

¹⁶ KUBA, Jan: *Přednášky z předmětu Electrical engineering technological processes (B1B13TEP)*, FEL ČVUT v Praze, 2019.



Obr. 2.5: Obvod s cívkou – odvození velikosti energie magnetického pole cívky¹⁷

Pro obvod v obr 2.5 si napíšeme napět'ovou rovnici podle 2. kirchhoffova zákona:

$$U = i(t) \cdot R + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (2.20)$$

Dále obě strany rovnice (2.20) vynásobíme členem $i(t) \cdot dt$, abychom opět dostali energetickou bilanci této rovnice:

$$i(t) \cdot U \cdot dt = R \cdot i^2(t) \cdot dt + L \cdot i(t) \cdot di(t) \quad (2.21)$$

V rovnici (2.21) levá strana odpovídá celkové dodané energii do obvodu ze zdroje stejnosměrného napětí U . Člen $R \cdot i^2(t) \cdot dt$ odpovídá ztrátové energii na rezistoru R , Jouleovo teplo. A poslední člen $L \cdot i(t) \cdot di(t)$ odpovídá právě přírůstku energie magnetického pole akumulující se v cívce L , tento člen odpovídá tedy derivaci (změně) mag. pole $E_{mag} \Rightarrow C \cdot u(t) \cdot du(t) = dE_{mag}$.

$$L \cdot i(t) \cdot di(t) = dE_{mag} \quad (2.22)$$

Nyní rovnici (2.22) integrujeme:

$$L \cdot i(t) \cdot di(t) = dE_{mag} / \int$$

$$E_{mag} = \int_0^I L \cdot i(t) \cdot di(t) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (2.23)$$

Rovnice (2.23) tedy odpovídá rovnici (2.19).

¹⁷ PANKRÁČ, Vítězslav: *Přednášky z předmětu Elektromagnetické pole (B1B17EMP)*, FEL ČVUT v Praze, 2019.

3 ELEKTROLÝZA VODY A DRUHÝ ELEKTROLÝZÉRŮ

3.1 Elektrolýza vody

Účelem elektrolýzy vody je pomocí vnější dodané energie rozštěpit vodu H_2O na vodík H_2 a kyslík O . Potřebné množství energie (tepelné i elektrické) ΔH pro rozložení jednoho molu vody je dáno změnou Gibbsovy energie ΔG . Elektrolýzu vody s účelem výroby vodíku je možné rozdělit podle teploty na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Pro nízkoteplotní teplota vody je menší než $100\text{ }^\circ\text{C}$ a energie pro rozložení vody je tvořena pouze elektrickou energií ΔG . Pro vysokoteplotní je potřeba vodu zahřát na teploty nad $700\text{ }^\circ\text{C}$ a energie pro rozložení vody je tvořena elektrickou energií ΔG a z části dodanou tepelnou energií $T\Delta S$. Aby elektrolýza mohla probíhat, musí napětí mezi elektrodami dosáhnout alespoň hodnoty reverzibilního napětí U_{rev} . Dalším zajímavým napětím z pohledu elektrolýzy je termoneutrální napětí U_T . Při tomto napětí všechnu potřebnou energii dodává právě elektrický zdroj, a tudíž není potřeba vodu jinak zahřívát, $T\Delta S = 0\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.^{18 19}

Látka	H (298 K) ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	S (298 K) ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)
H_2O (l)	-285,829	69,948
H_2 (g)	0	130,679
O_2 (g)	0	205,146

Tab. 3.1: Tabulka použitých entropií a entalpií

Rovnice pro elektrolýzu vody:



¹⁸ Volně dlě: CHISHOLM, Greig a Leroy CRONIN. Hydrogen From Water Electrolysis. *Storing Energy* [online]. Glasgow: Elsevier, 2016, s. 319-326 [cit. 2020-10-30]. ISBN 978-0-12-803440-8. Dostupné z: http://www.chem.gla.ac.uk/cronin/media/papers/Chisholm-Chapter_16_2016.pdf

¹⁹ TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. CENTRÁLNÍ VÝROBA VODÍKU. *Chemické listy* [online]. 2017, **111**(2), 123-125 [cit. 2020-10-30]. ISSN 1213-7103 (on-line). Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2017_02_121-128.pdf

Změna entropie:²⁰

$$\Delta S^0 = S^0_{H_2} + \frac{1}{2}S^0_{O_2} - S^0_{H_2O} \quad (\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}) \quad (3.2)$$

kde:

$S^0_{H_2}$...entropie ideálního plynného vodíku při 25 °C

$S^0_{O_2}$... entropie ideálního plynného kyslíku při 25 °C

$S^0_{H_2O}$... entropie ideální kapalné vody při 25 °C

Po dosazení tabulkových hodnot ideálních entropií při teplotě 25 °C:

$$\Delta S^0_{298,15\text{ K}} = 130,679 + \frac{1}{2}205,146 - 69,948 = 163,304 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Změna entalpie:

$$\Delta H^0 = H^0_{H_2} + \frac{1}{2}H^0_{O_2} - H^0_{H_2O} \quad (\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}) \quad (3.3)$$

kde:

$H^0_{H_2}$...standartní entalpie formace plynného vodíku při 25 °C

$H^0_{O_2}$... standartní entalpie formace plynného kyslíku při 25 °C

$H^0_{H_2O}$... standartní entalpie formace kapalné vody při 25 °C

Po dosazení tabulkových hodnot ideálních entropií při teplotě 25 °C:

$$\Delta H^0 = 0 + \frac{1}{2}0 - (-285,829) = 285,829 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

²⁰ JEFF, Cruzan. Gibbs Energy. *Xaktly* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://xaktly.com/GibbsEnergy.html>

Změna Gibbsova energie:

Změna Gibbsovy energie ΔG , představuje potřebné množství elektrické energie k rozložení vody.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}) \quad (3.4)$$

kde:

T ...termodynamická teplota, pro kterou je energie počítána (provozní teplota elektrolyzáru) $25\text{ }^\circ\text{C} = 298,15\text{ K}$

ΔH^0 ...odpovídá celkovému množství energie potřebné k rozložení vody ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)

$T\Delta S^0$...odpovídá množství potřebné tepelné energie pro rozložení vody ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)

Po dosazení:

$$\Delta G^0_{298,15\text{ K}} = 285,829 \cdot 10^3 - 298,15 \cdot 163,304 \doteq 237,14 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Reverzibilní napětí:

$$U_{rev} = \frac{\Delta G^0_{298,15\text{ K}}}{n \cdot F} \quad (\text{V}) \quad (3.5)$$

kde:

n ...počet nutných elektronů pro výrobu jedné molekuly vodíku, $n = 2$

F ...Faradayova konstanta, $F = 96\,485,33\text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$

Po dosazení:

$$U_{rev} = \frac{237,14 \cdot 10^3}{2 \cdot 96\,485,33} \doteq 1,23\text{ V}$$

Termoneutrální napětí:

$$U_T = \frac{\Delta H^0_{298,15\text{ K}}}{n \cdot F} \quad (\text{V}) \quad (3.6)$$

Po dosazení:

$$U_T = \frac{285,829 \cdot 10^3}{2 \cdot 96\,485,33} \doteq 1,48\text{ V}$$

Účinnost elektrolýzy z pohledu napětí:²¹

$$\varepsilon_V = \frac{U_T}{U} \cdot 100\% \quad (\%) \quad (3.7)$$

kde:

U ...reálné pracovní napětí mezi elektrodami (V)

Napětí U představuje reálné napětí naměřené mezi elektrodami, jsou v něm zahrnuty i napěťové ztráty na elektrodách vznikající průchodem stejnosměrného proudu.

Způsoby elektrolýzy vody v závislosti na pracovním napětí a typu elektrolyzéro			
Pracovní napětí U	Rozklad vody	Napěťová účinnost ε_V	Takto lze provozovat elektrolyzéry
$U < U_{rev}$	Neprobíhá	-	Vysokoteplotní, nízkoteplotní
$U_{rev} < U < U_T$	Endotermicky	Nad 100 %	Vysokoteplotní
$U = U_T$	Izotermicky	100 %	Vysokoteplotní, nízkoteplotní
$U > U_T$	Exotermicky	Pod 100 %	Vysokoteplotní, nízkoteplotní

Tab. 3.2: Elektrolýza vody v elektrolyzéro v závislosti na pracovním napětí

Exotermní reakce – Při reakci vzniká teplo, které se uvolňuje.

Endotermní reakce – Pro vznik reakce je nutné teplo dodat.²²

Přestože se ε_V nazývá napěťová účinnost, jedná se pouze o relativní číslo reprezentující poměr mezi referenčním termoneutralním napětím U_T a skutečně nastaveným pracovním napětím U na elektrodách elektrolyzéro.

²¹ SIEMENS. *Efficiency – Electrolysis* [online]. Erlangen: Siemens, 2019, 8.1.2019, (SICM-T10001-00-7400), 3-6 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:139de890-44e1-453b-8176-c3d45c905178/version:1594896797/white-paper-efficiency-en.pdf>

²² Volně dle: BRÍŽDALA, Jan. Exotermní a endotermní reakce. *E-CHEMBOOK* [online]. Třebíč, 2012 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/exotermni-a-endotermni-reakce>

Pokud je pracovní napětí U mezi elektrodami elektrolyzáru menší než hodnota U_{rev} , elektrolyza neproběhne, protože k rozkladu vody nebylo dodáno dostatečné množství elektrické energie odpovídající ΔG .

Pokud je pracovní napětí U svou velikostí mezi U_{rev} a U_T , elektrolyzáru dodává dostatečné množství elektrické energie v podobě ΔG , aby mohl nastat rozklad vody, ale ještě je nutno dodat tepelnou energii v podobě $T\Delta S$. Součet $T\Delta S$ a ΔG se musí rovnat celkové potřebné energii pro rozklad vody ΔH . Tento způsob provozování elektrolyzáru umožňují pouze vysokoteplotní elektrolyzáry, pro nízkoteplotní tento způsob provozu použít nelze, protože mají pouze elektrickou energii ΔG danou U , ale ta sama o sobě nestačí.

Při provozování elektrolyzáru s pracovním napětím na elektrodách $U = U_T$ je veškerá potřebná energie pro rozklad vody ΔH dodána v podobě elektrické energie ΔG . Tento způsob provozu lze použít jak pro vysokoteplotní, tak pro nízkoteplotní,

Pokud je pracovní napětí U větší než termoneutrální napětí U_T , při rozkladu vody se uvolňuje teplo do okolí. Tento způsob provozu lze opět použít jak pro nízkoteplotní, tak pro vysokoteplotní elektrolyzáry.

Dále je z tabulky vidět, že s rostoucím napětím na elektrodách klesá napěťová účinnost. Ovšem při zvyšování napětí se zároveň zvyšuje hustota elektrického proudu, množství reakcí, a tedy i množství vyráběného vodíku.

Celková energetická účinnosti vodíku vyrobeného v elektrolyzáru:

$$\varepsilon = \frac{\text{množství energie získané z 1 kg vodíku jako paliva}}{\text{množství energie potřebné k výrobě 1 kg vodíku}} \quad (\%) \quad (3.8)$$

Obecně se celková účinnost ε vyrobeného 1 kg vodíku pomocí elektrolyzy vody udává kolem 55 %.

3.2 Druhy elektrolyzáru

Existují 3 hlavní typy technologií elektrolyzáru, alkalický, proton exchange membrane (PEM) a vysokoteplotní (solid oxide). Liší se nejen svou konstrukcí, ale i účelem použití. Alkalický a PEM elektrolyzáry se řadí mezi nízkoteplotní a momentálně patří mezi nejrozšířenější typy. Nejnovější technologií je vysokoteplotní elektrolyzáru, ovšem jeho vy-

užití je ztíženo právě vysokou požadovanou teplotou, a proto se zatím staví jako experimentální. Jednotlivé články elektrolyzérů se dají sériově spojovat do tzv. stacků a tak zvyšovat množství vyprodukovaného vodíku.

3.2.1 Alkalický elektrolyzér

Jedná se o první komerčně vyráběný elektrolyzér. Charakteristický je právě elektrolytem, který tvoří z 25–30 hm % hydroxid draselný KOH, zbytek je voda. Elektrody jsou obvykle vyrobeny z niklu a jsou odděleny porézním separátorem. Smícháním vodíku a kyslíku by docházelo k uvolňování energie a možným explozím, to je nebezpečné, a proto je nutné tyto dvě složky při výrobě oddělit. K tomu slouží separátor. Ten je nejčastěji na bázi azbestu, polymeru a jeho úkol je propouštět anionty OH^- a elektrolyt mezi elektrodami a zároveň udržet vyrobený vodík na katodě a kyslík na anodě. Tato separace není nikdy 100 %. Napětíová účinnost ε_V se pohybuje v hodnotách 62 – 82 % a pracovní teplota do 100 °C. Dále pak pracovní napětí U se pohybuje v rozsahu 1,8 – 2,4 V, proudová hustota 0,2 – 0,4 $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ a čistota vyprodukovaného vodíku až 99,8 %.

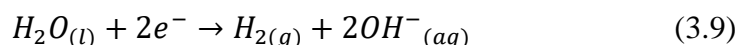
Z výše uvedených vlastností i plynou omezení alkalického elektrolyzéra, tedy může být provozován do tlaků cca 30 barů (3 MPa), nízká možnost regulace zatížení. Nedodržení obou těchto parametrů by vedlo k zvyšování rizika havárie elektrolyzéra v důsledku zvyšování difuze vodíku skrze separátor ke kyslíku a opačně.

Jeho výhodami jsou nízká pořizovací cena v porovnání s PEM elektrolyzéry, provozní teplota do 100 °C a celkově je to dobře zvládnutá technologie. Pro účely kontinuální produkce vodíku při konstantním příkonu je tohle nejlepší volba z ekonomického pohledu.

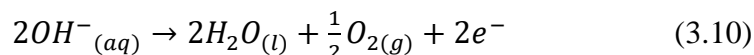
Všechny parametry jsou pouze orientační a jelikož se jedná o stále se vyvíjející technologii, můžeme najít u různých firem odlišné parametry jejich elektrolyzérů.

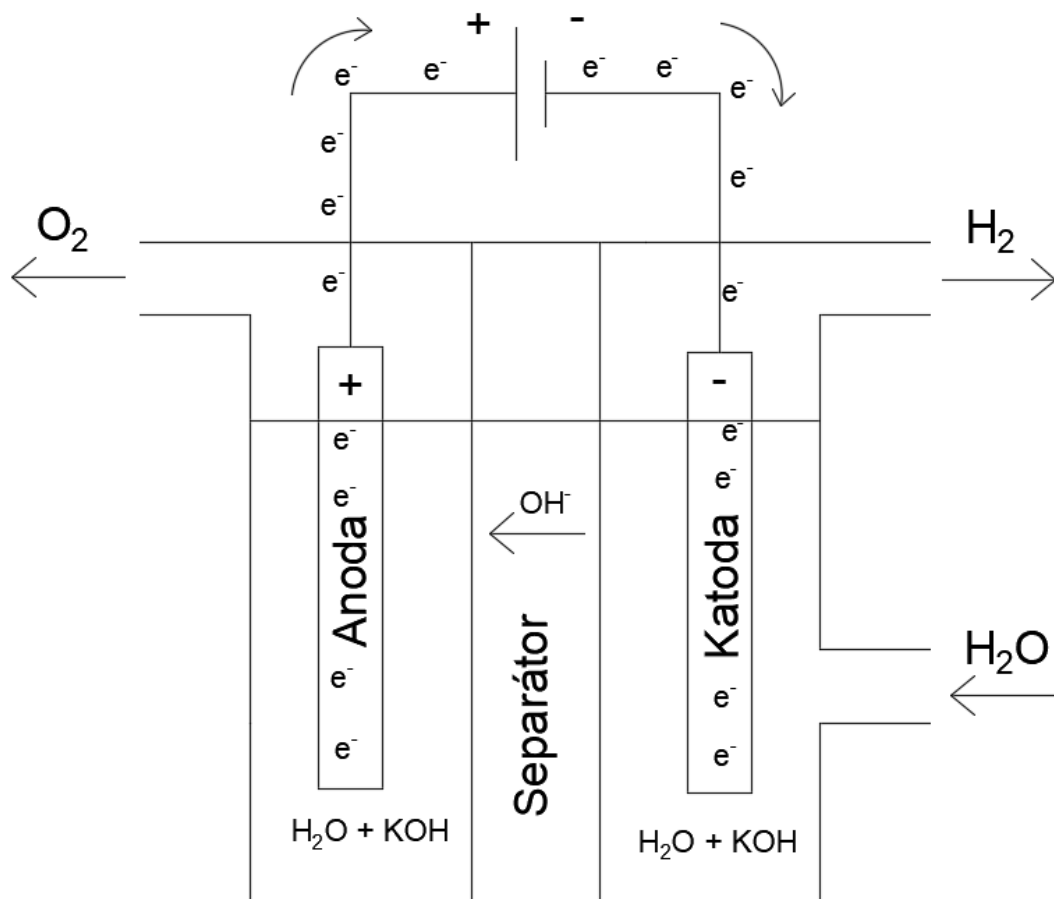
Na katodě dochází k redukci a na anodě k oxidaci.

Děj na katodě popisuje tato chemická reakce (redukce):



Děj na anodě popisuje tato chemická reakce (oxidace):





Obr. 3.1: Schéma alkalického elektrolyzér

3.2.2 PEM elektrolyzér

Jedná se o elektrolyzér s kyselou elektrolyzou vody. Jako elektrolyt je zde použita pevná membrána vodivá pro kationty vodíku H^+ . Tato membrána zároveň slouží jako separátor produkovaného vodíku na jedné straně a kyslíku na druhé straně. Membrána bývá nejčastěji vyrobena ze sulfonovaných fluorovaných polymerů jako například Nafion o tloušťce 25 až 250 μm . Pro aplikace s častou regulací zatížení z minima na maximum je potřebná větší tloušťka, aby se zamezilo nadměrné difuzi vyprodukovaných H_2 a O_2 . Na druhou stranu větší tloušťka představuje větší odpor pro přenos H^+ , a tedy klesá napěťová účinnost elektrolyzér. Zvolená tloušťka tedy musí tvořit kompromis.

Tato technologie se vyznačuje dále použitím platinových kovů jako katalyzátorů pro zrychlení oxidačních a redukčních reakcí. Proto do katody, kde probíhá redukce, se přidává platina a do anody, kde probíhá oxidace, se přidává iridium.

V celém systému, na rozdíl od alkalických elektrolyzérů, cirkuluje pouze voda. To přináší technologicky snadnější řešení. Napěťová účinnost ε_V se pohybuje v hodnotách 67 – 82 % a pracovní teplota do 100 °C. Dále pak pracovní napětí U se pohybuje typicky v rozmezí 1,8 – 2,2 V, proudová hustota 0,6 - 2 A·cm⁻² a čistota vyprodukovaného vodíku až 99,8 %.

Mezi hlavní výhody patří možnost provozu od 0 % až po 100 % nominálního výkonu, jejich celkově menší rozměry a vyšší účinnost díky nižším ohmickým ztrátám v elektrolytu.

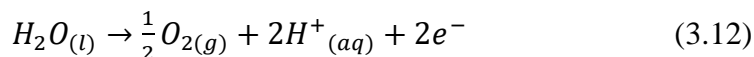
Hlavní nevýhodou je cena daná hlavně náklady na katalyzátory z platinových kovů.

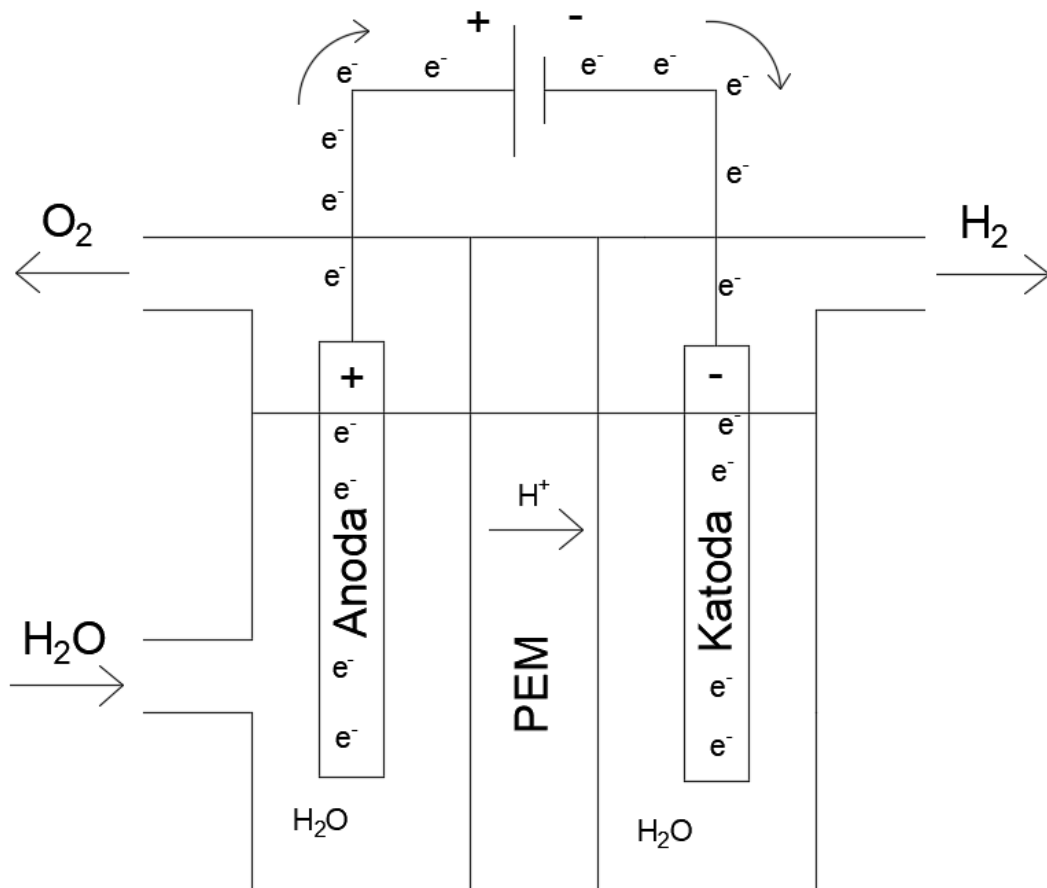
Právě výše zmíněná schopnost regulace provozu od 0 % až po 100 % tuto technologii předurčuje pro použití k fotovoltaickým panelům, větrným elektrárnám anebo pro využití spočívající v levném nakupování elektrické energie, když vznikají její přebytky. Tuto technologii použiji pro mou bakalářskou práci.

Děj na katodě popisuje tato chemická reakce (redukce):



Děj na anodě popisuje tato chemická reakce (oxidace):





Obr. 3.2: Schéma PEM elektrolyzéro

3.2.3 Vysokoteplotní elektrolyzér

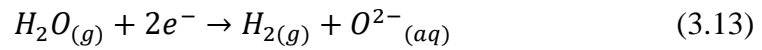
Někdy také označován jako solid oxide electrolyzer (SOE). Jak už název napovídá, provozní teplota se pohybuje v teplotách od 700 do 900 °C. Při takovýchto teplotách se jako palivo pro elektrolyzu nepoužívá voda, ale vodní pára. Použitý elektrolyt je v pevném skupenství (SO) z materiálu jako YSZ (yttriem stabilizovaný oxid zirkoničitý). Na rozdíl od PEM, zde díky vysokým pracovním teplotám není potřeba používat platinové kovy jako katalyzátor, místo nich lze použít nikl. Katoda je vyráběna z cermetu, což je kompozitní materiál složený z niklu a keramiky. Anoda je vyráběna z LSM (manganitan lanthan dopovaný stronciem).

Tato technologie je unikátní právě kombinací energií pro rozložení vody. Jednak je zde pro rozklad použita elektrická energie ΔG jako u nízkoteplotních elektrolyzérů. Ale navíc se zde využívá tepelná energie $T\Delta S$ definovaná provozní teplotou (až 900 °C), která

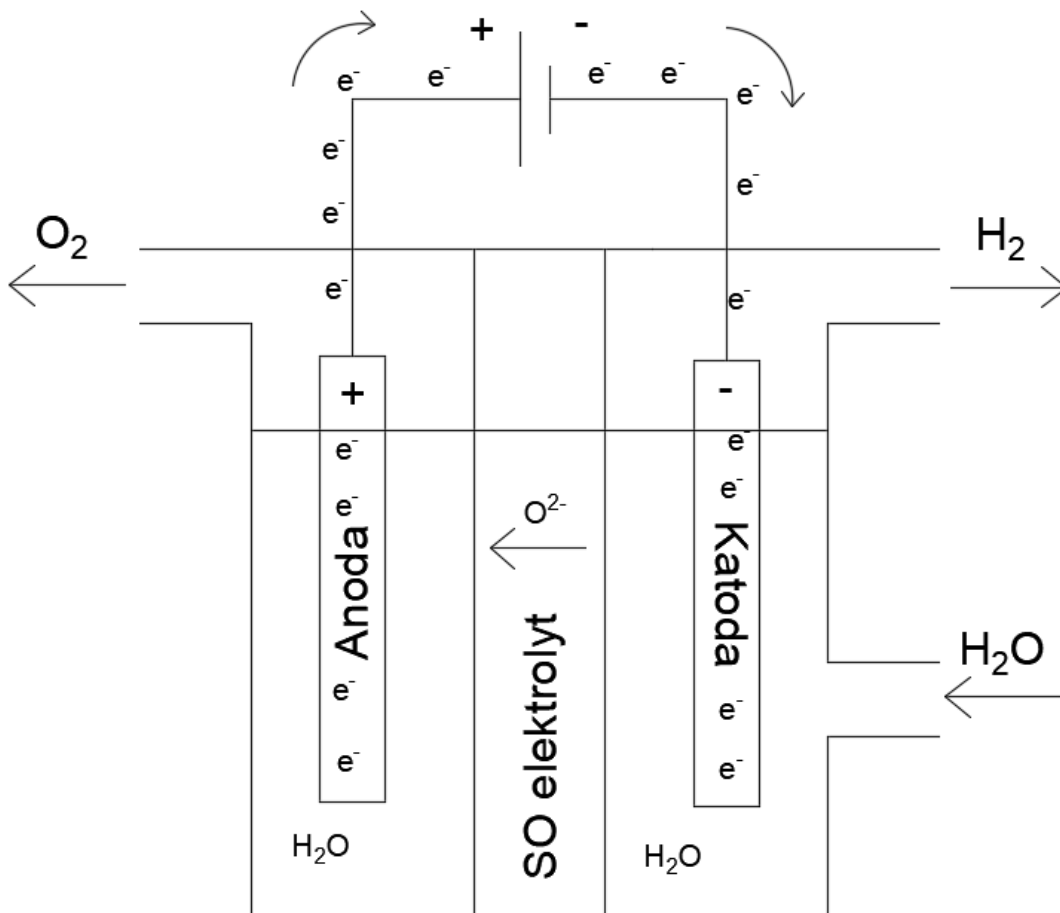
částečně nahradí elektrickou energii (až 25 – 30 % z celkové potřebné energie ΔH). Výsledná napěťová účinnost ε_V je větší než 100 % v závislosti na provozní teplotě. Jako jediný typ elektrolyzáru je tento možno provozovat ve třech provozních stavech.

Pro budoucí využití se tato technologie jeví jako vhodná pro propojení s technologiemi produkující vysokopotenciální teplo, například jaderné reaktory nové generace, koncentrační solární elektrárny nebo spalovny odpadů.

Děj na katodě popisuje tato chemická reakce (redukce):



Děj na anodě popisuje tato chemická reakce (oxidace):



Obr. 3.3: Schéma vysokoteplotního elektrolyzáru

Druh elektrolyzéry	Alkalický	PEM	Vysokoteplotní
Pracovní napětí (V)	1,8 až 2,4	1,8 až 2,2	$U < 1$ nebo $U \geq 1$
Pracovní teplota (°C)	< 100	< 100	700 až 1000
Proudová hustota (A/cm ²)	0,2 až 0,4	0,6 až 2	-
Napět'ová účinnost (%)	62 až 82	67 až 82	-
Pracovní tlak (MPa)	0,1 až 3	0,1 až 4	0,1 až 1
Elektrická energie na výrobu 1 m ³ vodíku (kWh/Nm ³ H ₂)	4,5 až 7	4,5 až 7,5	-
Životnost systému (v letech)	20 až 30	10 až 20	-

Tab. 3.3: Základní parametry různých druhů elektrolyzérů

4 TRH S ELEKTRINOU

Abychom mohli elektrolyzátor vůbec provozovat, je zapotřebí mimo vodu dodávat elektrickou energii. Pro svůj návrh jsem vybral nakupování elektrické energie na organizovaném krátkodobém denním trhu. Zde je cena elektřiny proměnlivá v závislosti na aktuální poptávce a nabídce. Zejména je tento trh charakteristický proměnlivou cenou elektřiny během dne, kdy máme možnost (například ve večerních hodinách, kdy je přebytek) nakupovat energii za velice nízké ceny v porovnání se smluvně stanovenou tarifní cenou od různých obchodníků.

4.1 Rozdělení podle odpovědnosti za odchylku

V energetické soustavě je nutno dodržovat rovnost mezi vyráběnou a spotřebovanou elektrickou energií. Případné nedodržení této rovnosti by vedlo k zhoršení parametrů dodávané elektrické energie a v konečném důsledku by mohl nastat blackout. Proto všechny národní elektroenergetické soustavy jsou podřízeny dispečinku. Právě dispečink zaručuje rovnováhu výkonu v síti pomocí regulačních energií. V ČR tuto službu zabezpečuje společnost Česká energetická přenosová soustava, a. s. (dále jen ČEPS, a.s.). Aby byli odběratelé motivováni tuto rovnováhu neporušovat, a tím nezpůsobovat nutnost regulace energie, jsou v případě porušení nasmlouvaných podmínek pokutováni. Zde se nám trh rozděluje podle odpovědnosti za vzniklou odchylku jednotlivých subjektů na velkoobchodní a maloobchodní.²³

Operátor trhu (OTE, a.s.) – řadí se mezi licencované subjekty a dohlíží na obchodní transakce a případné vzniklé odchylky v důsledku nedodržení nasmlouvaných parametrů. Vzniklé odchylky změří, vyúčtuje a stará se o jejich vyrovnání subjektem zodpovědným za odchylku. Jeho primárním zaměřením je organizování a zajištění fungování rovnosti nabídky a poptávky na organizovaném krátkodobém trhu s elektřinou a plynem. Navíc slouží jako informační databáze s daty o trhu s elektřinou a plynem. Dále OTE,

²³ SALAVEC, Jiří. Trh s elektřinou - specifika, účastníci trhu a rozdělení. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2017, 9.6.2017 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/tag/trh-s-elektrinou>

a.s. spravuje český Rejstřík obchodování s emisními povolenkami, kde jsou přesně evidovány údaje o pohybu emisních povolenek.

4.1.1 Maloobchodní trh (MOT)

Na tomto trhu jsou dva druhy subjektů, obchodník a spotřebitel, typicky domácnost. Zde odpovědnost za případnou odchylku přechází ze spotřebitele na obchodníka.

Mezi obchodníky na maloobchodním trhu patří poskytovatelé distribučních soustav jako České energetické závody (dále jen ČEZ distribuce, a. s.), EG.D, a. s., distribuce Pražská energetika (dále jen PREDistribuce, a. s.).

Subjekty MOT se nemohou účastnit na organizovaném krátkodobém trhu.

4.1.2 Velkoobchodní trh (VOT)

Na velkoobchodním trhu mají zodpovědnost za případnou odchylku všichni účastníci. Například výrobce musí dodržet nasmlouvané množství energie, které vyrobí a zároveň obchodník, jenž ji od výrobce nakupuje, musí odebrat nasmlouvané množství. Případně vztah obchodník a spotřebitel, typicky společnosti.

Subjekty VOT se mohou účastnit na organizovaném krátkodobém trhu, organizovaným právě OTE, a.s.. Vztah subjektů VOT k OTE, a.s. je veden jako subjekt zúčtování (SZ).

Mezi obchodníky na velkoobchodním trhu patří poskytovatelé distribučních soustav VN, NN jako ČEZ distribuce, a. s., EG.D, a.s., PREDistribuce, a. s.. Dále pak jako obchodník poskytující přenosovou soustavu velmi vysokého napětí (dále jen VVN) a zvláště vysokého napětí (dále jen ZVN) je společnost ČEPS, a.s..

Místa, kde se obchoduje elektrická energie v rámci organizovaného krátkodobého trhu, jsou burzy: Evropská energetická burza (dále jen EEX), Energetická burza Praha (dále jen PXE), dále pak OTE, a.s..

4.2 Organizovaný trh

Organizaci trhu zajišťují burzy nebo OTE, a.s.. Systém funguje na podobném principu jako aukce, jednotliví účastníci zadávají své nabídky a poptávky. Po uplynutí stanovené doby se vyhodnotí průtnutí křivek nabídky a poptávky a zrealizují se obchody za danou cenu a množství energie. Případně jsou jednotlivé kontrakty párovány okamžitě, pokud existuje poptávka s odpovídající nabídkou. Další možností je stanovit po určitou dobu hranici, za kterou jsme ochotni dané množství energie prodat, nakoupit.

4.2.1 Krátkodobý trh

Na tomto trhu se sjednávají kontrakty na dny až hodiny dopředu. Obchodovat zde mohou pouze SZ.

Podle časového rámce kontraktu se rozlišuje trh na:

Blokový trh

Zde se obchoduje se třemi časovými rozpětími dodávky elektrické energie:

- 1, Base load = dodávka elektrické energie na celý den
- 2, Peak load = dodávka elektrické energie od 8. do 20. hodiny
- 3, Off-Peak load = dodávka elektrické energie od 20. do 8. hodiny

Denní trh

Zde se obchoduje s energií na každou hodinu následujícího dne dopředu. Výsledkem je 24 aukcí, za každou hodinu jedna. Dále výsledkem aukce pro danou hodinu, například 13. hodina dne, je množství a cena zobchodované energie.

Vnitrodenní trh

Zde se obchoduje s energií v daných dnech a minimálně hodinu dopředu. Tento trh je zejména výhodný pro obchodování přebytků vznikajících během dne ve fotovoltaických nebo větrných elektrárnách.

Vyrovnávací trh

Tento trh je používán provozovateli přenosové soustavy pro nakupování regulačních energií se zpožděním půl hodiny.

4.3 Potřebné smlouvy pro obchod na velkoobchodním trhu jakožto odběratel obchodující na organizovaném krátkodobém trhu skrze OTE

4.3.1 Smlouvy o zúčtování odchylek

- Uzavře se s OTE, a.s.²⁴

²⁴ Volně dle: *ASOCIACE ENERGETICKÝCH MANAŽERŮ. Trh s elektřinou: úvod do liberalizované energetiky [online]. 2. aktualizované vydání. Praha: Asociace energetických manažerů, 2016, 297-304 [cit. 2020-10-30]. ISBN 978-80-260-9212-4. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eee1fa66875530f33e8a/kniha-trh-s-elektřinou.pdf>.*

- Jejím uzavřením se OTE, a.s. zavazuje vyhodnocovat, zúčtovat a vypořádat odchylky vznikající na mé straně, jakožto odběratele. Zároveň stvrzením se já zavazují k peněžnímu vyrovnání vzniklých odchylek.
- Jelikož projekt bude pod C-Energy Planá s.r.o., jsou splněny základní předpoklady k jednání o Smlouvě o zúčtování odchylek
- Po uzavření smlouvy o zúčtování odchylek se fyzická nebo právnická osoba stává SZ a může uzavírat smlouvy na krátkodobém trhu.

4.3.2 Smlouva o přístupu na organizovaný krátkodobý trh s elektřinou

- Pro uzavření této smlouvy je nutné být SZ, tedy uzavřít nejdříve smlouvu o zúčtování.
- Po uzavření této smlouvy mohou obchodovat na organizovaném krátkodobém trhu s elektřinou prostřednictvím OTE, a.s..

4.3.3 Smlouva o připojení

- Uzavře se s provozovatelem distribuční soustavy, jehož vedení chci využívat.
- Před uzavřením smlouvy má právo distributor mé požadavky odmítnout z důvodu případného nadměrného zatížení sítě v daném místě, v důsledku nadměrného odebíraného příkonu v MW.
- Jejím uzavřením se provozovatel distribuční soustavy zavazuje k zajištění smluvně dohodnutého rezervovaného příkonu pro dané odběrné místo. A zároveň se já, jakožto odběratel zavazují k uhrazení podílu vzniklých nákladů na připojení.

5 EKONOMICKÉ POSOUZENÍ INVESTIC

Pro posouzení investic v ekonomii používáme různá kritéria. Výsledkem kritéria může být jedna hodnota, která prezentuje soubor parametrů, informací plynoucích z investice. K vyhodnocení vypočtené hodnoty slouží kritériální podmínky.

5.1 Kritéria ekonomické efektivity

Tato kritéria slouží k posouzení, zda danou investici doporučit nebo ne. Dále slouží k porovnání několika variant investic mezi sebou. Pro naše rozhodování je vhodné použít pouze jedno z kritérií. Mezi vhodná kritéria se řadí čistá současná hodnota (dále jen NPV), vnitřní výnosové procento (dále jen IRR) a roční ekvivalentní peněžní tok (dále jen RCF).²⁵

5.1.1 Prostá doba návratnosti PP

Toto kritérium nám říká, kdy si investice vydělá sama na sebe, kdy se mi vrátí investované peníze. Aby toto kritérium dokázalo správně vybrat, musí být porovnávané investice z podobných oborů a jejich výdělky přibližně konstantní. Spíše než rozhodovací kritérium slouží jako ukazatel doby splacení investice sebou samotnou. Toto kritérium nám nic neříká o tom, co se děje po době splacení.

Výpočet prosté doby návratnosti PP:

$$\sum_{t=0}^{PP} CF_t \geq 0 \quad (\text{rok}) \quad (5.1)$$

kde:

CF_t ...roční cashflow (peněžní tok) (Kč)

t...jednotlivé roky provozu investice (rok), $t \in \langle 0; PP \rangle$

t = 0...začátek výstavby projektu

Kritériální podmínka:

$$PP == MIN \quad (5.2)$$

²⁵ STARÝ, Oldřich: *Přednášky z předmětu Základy podnikání (B1B16ZPU)*, FEL ČVUT v Praze, 2019.

Tuto sumu lze chápat tak, že když budeme přičítat k počáteční investici roční cashflow, tak pro jaký čas t (rok), součet již nebude záporný, ale alespoň roven 0. Velikost PP chceme minimalizovat.

5.1.2 Výnosnost investice (return of investment) ROI

Jedná se o relativní kritérium, kdy výstupní hodnota je v procentech. Vyjadřuje průměrný cashflow za celou dobu životnosti investice vztažený na počáteční investici. Jeho výhodou je jednoduché určení. Nevýhodou je, že se jedná o relativní kritérium, které by mohlo i zcela nesmyslnou investici upřednostnit před jinou, protože výsledná hodnota ROI nám nic neříká o velikosti investovaných peněz ani o velikosti cashflow. Další nevýhodou je, že zanedbává časovou hodnotu peněz.

Výpočet výnosnosti investice ROI:

$$ROI = \frac{\sum_{t=0}^T CF_t}{I} * 100 \% \geq 0 \quad (\%) \quad (5.3)$$

kde:

CF_t ...roční cashflow (peněžní tok) (Kč)

T ...doba výnosu investice (rok)

t ...jednotlivé roky provozu investice (rok), $t \in \langle 0; T \rangle$

I ...počáteční investice (Kč)

$t = 0$...začátek výstavby projektu

Kritériální podmínka:

$$ROI == MAX \quad (5.4)$$

Velikost ROI chceme maximalizovat.

5.1.3 Čistá současná hodnota (Net present value) NPV

Jedná se o diskontovaný součet ročních cashflow plynoucí z investice. Toto kritérium je velice vhodné pro určování ekonomické efektivity investice a také pro porovnávání investic mezi sebou, pokud mají stejnou dobu životnosti. Ukazuje nám příspěvek investice k hodnotě firmy. Pro určení NPV je potřeba stanovit diskont. Diskont představuje časovou cenu peněz, cenu ušlé příležitosti, vyjadřuje naše požadavky a očekávání od investice a jeho určení je klíčové pro posuzování investice. Pro stanovení diskontu existuje spousta hledisek, jež je nutno zohlednit. Ty hlavní, které bychom měli zahrnout

jsou: roční míra inflace, riziko dané investice, možnost investovat do nízkorizikové investice a také uvážit, že pokud jsme si zřídili půjčku kvůli investici s nějakým úrokem, tak by bylo vhodné, aby míra diskontu kryla i ji.

Výpočet čisté současné hodnoty NPV:

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1 + r)^{-t} \text{ (Kč)} \quad (5.5)$$

kde:

CF_t ...roční cashflow (peněžní tok) (Kč)

r ...diskont (%)

t ...jednotlivé roky provozu investice (rok), $t \in \langle 0; T \rangle$

T ... doba výnosu investice (rok)

$t = 0$...začátek výstavby projektu

Kriteriální podmínka:

$$NPV == MAX \quad (5.6)$$

Pokud máme investici, která má vydělávat, tedy CF převážně kladné, požadujeme, aby $NPV \geq 0$, tehdy investici doporučíme. Pokud je $NPV = 0$, investice přesně splnila naše očekávání, která jsme vyjádřili pomocí diskontu, nic víc ani nic méně. Pokud vyjde NPV kladné, investice byla ještě výhodnější, než jsme původně předpokládali. Pokud vyjde NPV záporné, investice nesplňuje naše požadavky a doporučíme bychom ji odmítnout. Při porovnávání investic mezi sebou, vybereme tu s největším NPV.

Pokud máme investici, jejíž účel není peněžní výnos (například investice do kotle), tak NPV bude vycházet záporné. Při porovnávání investic, u nichž se počítá se záporným NPV, vybereme tu s největším NPV, tedy nejméně záporným.

5.1.4 Vnitřní výnosové procento IRR

Jedná se o relativní kritérium. IRR je taková hodnota diskontu, pro kterou se NPV rovná nule. Jinak řečeno, pokud bychom investici při výpočtu NPV odhadli diskontem rovným IRR, tak by investice přesně splnila očekávání. Pro jeho použití je potřeba stanovit diskont pro danou investici. S daným diskontem následně výsledné IRR porovnáme a požadujeme, aby $IRR \geq r$.

Nevýhodou může být komplikace ve výpočtu, kdy v závislosti na době životnosti investice T , nám vzniká rovnice o řádu T a o T řešení, přičemž musíme vybírat pouze z reálných kořenů. Dále zde opět platí nevýhoda procent, které nám nic neříkají o velikosti

peněz. Navíc pokud CF mění znaménka, existuje podle počtu změn úměrné množství IRR.

Výpočet vnitřního výnosového procenta IRR:

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1 + IRR)^{-t} = 0 \quad (\%) \quad (5.7)$$

kde:

CF_t ...roční cashflow (peněžní tok) (Kč)

r ...diskont (%)

t ...jednotlivé roky provozu investice (rok), $t \in \langle 0; T \rangle$

T ... doba výnosu investice (rok)

$t = 0$...začátek výstavby projektu

Kritériální podmínka:

$$IRR == MAX \quad (5.8)$$

V tomto kritériu chceme maximalizovat IRR a pokud pomocí něj vybíráme z více investic, doporučíme tu s největším IRR.

Komplikace mohou vznikát, pokud NPV a IRR nevybírají stejně, poté je potřeba rozhodovat se podle dalších parametrů.

5.1.5 Roční ekvivalentní peněžní tok RCF

Toto kritérium slouží k porovnání investic s různou dobou technické životnosti. Pro výpočet používá vypočtené NPV jednotlivých investic a jeho účelem je tedy porovnat investice, které nelze přímo porovnat pomocí NPV právě kvůli různé životnosti.

Výpočet ročního ekvivalentního peněžního toku RCF:

$$RCF = NPV \cdot a_{T\check{z}} \quad (\text{Kč}) \quad (5.9)$$

$$a_{T\check{z}} = \frac{q^T \cdot (q-1)}{q^T - 1} \quad (-) \quad (5.10)$$

$$q = (1 + r) \quad (-) \quad (5.11)$$

kde:

$a_{T\check{z}}$...poměrná annuita dané investice (-)

r ...diskont, pro všechny investice zvolen stejný (%)

T ...doba výnosu dané investice (rok)

Kritériální podmínka:

$$RCF == MAX \quad (5.12)$$

5.2 Ekvivalentní výrobní náklady vodíku

Tyto náklady v sobě zahrnují stálé roční provozní náklady jako mzdy, náklady na údržbu. Dále v sobě zahrnují proměnné náklady za elektrickou energii a vodu a zahrnují také v sobě diskont v podobě poměrné anuity.

5.2.1 Ekvivalentní roční výrobní náklady na výrobu celkového množství H_2 za rok

Tyto náklady jsou vztaženy na celkovou roční produkci H_2 .

Výpočet ekvivalentních ročních výrobních nákladů na výrobu celkového množství H_2 za rok:

$$Nvr = CF \text{ roku } 0 \cdot a_{Tz} + (\sum_{t=0}^T TNE_t + TNV_t + NUM_t)/T \quad (\text{Kč} \cdot \text{r}^{-1}) \quad (5.13)$$

kde:

$CF \text{ roku } 0$...součet všech počátečních investic za jednotlivá zařízení (Kč)

t ...jednotlivé roky provozu investice (rok), $t \in \langle 0; T \rangle$

T ... doba výnosu investice (rok)

a_{Tz} ...poměrná anuita dané investice (-)

TNE_t ... Celkové roční náklady za nakoupenou el. energii v roce t ($\text{Kč} \cdot \text{r}^{-1}$)

TNV_t ... Celkové roční náklady na vodu v roce t ($\text{Kč} \cdot \text{r}^{-1}$)

NUM_t ... Roční náklady na údržbu, obsluhu a mzdy v roce t ($\text{Kč} \cdot \text{r}^{-1}$)

5.2.2 Poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 kg H_2

Tyto náklady dostaneme vydělením Nvr celkovým množstvím vyrobeného H_2 za do životnosti investice.

Výpočet poměrných ekvivalentních ročních výrobních nákladů na 1 kg H_2 :

$$n_{vr,kg} = \frac{T \cdot Nvr}{\sum_{t=0}^T TVH_2_t} \quad (\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{r}^{-1} H_2) \quad (5.14)$$

kde:

t ...jednotlivé roky provozu investice (rok), $t \in \langle 0; T \rangle$

T ... doba výnosu investice (rok)

TVH_2_t ...Celkové roční množství vyrobeného vodíku v roce t ($\text{Kg} \cdot \text{r}^{-1}$)

5.2.3 Poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 MWh z H₂

Tyto náklady dostaneme vydělením $n_{vr,kg}$ výhřevností vodíku.

Výpočet poměrných ekvivalentních ročních výrobních nákladů na 1 MWh z H₂:

$$n_{vr,MWh} = \frac{n_{vr,kg}}{V_{H_2}} \quad (\text{Kč} \cdot \text{MWh}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}) \quad (5.15)$$

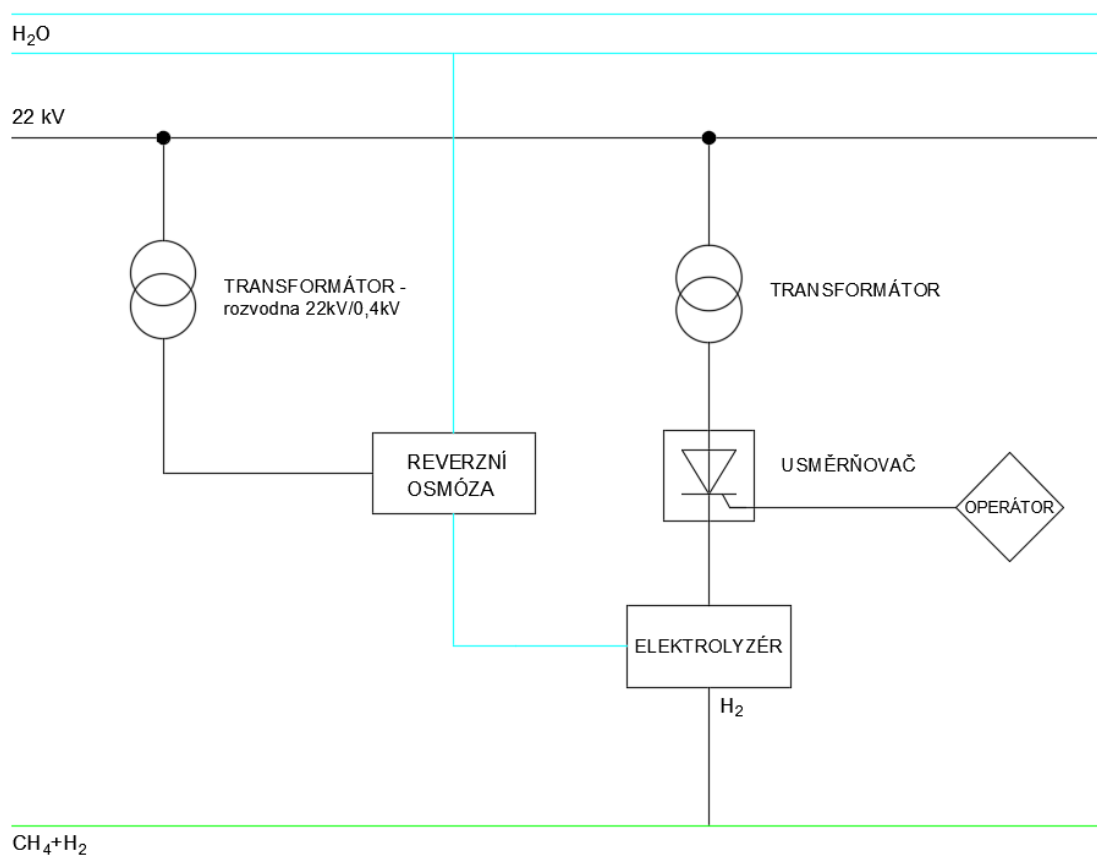
kde:

V_{H_2} ...Výhřevnost vodíku ($\text{MWh} \cdot \text{kg}^{-1}$)

6 EKONOMICKÝ MODEL

6.1 Technologické uspořádání

Výběr elektrolyzátoru je založen na požadavku jmenovitého příkonu 5 MW a aby byl typu PEM. Elektrolyzátor s usměrňovačem, reverzní osmózou (RO) a dalšími komponentami bude zastřešen ve stávajících prostorách teplárny, kde bude k dispozici přípojka na 400 V. Rozvod vody pro RO bude začleněn do již stávajícího rozvodu vody teplárny.



Obr. 6.1: Technologické schéma

6.2 Vstupní data

Cenu a množství energie pro napájení elektrolyzátoru z distribuční sítě 22 kV (VN) převzmu z hodnot denního trhu roku 2020. Budu předpokládat, že má spotřeba bude spadat do množství zobchodované elektrické energie a cena 1 MWh bude odpovídat marginální nákupní ceně pro danou hodinu. Operátor bude sledovat denní trh a bude nastavovat

maximální výkupní cenu 1 MWh, za kterou ještě nakoupí elektrickou energii 5 MWh pro další hodinu.

Pro první provozní rok mého modelu s elektrolyzérem jsem vzal tedy roční hodnoty denního trhu s elektřinou za rok 2020 a použil je jako typický průběh roku. Tato data jsem následně vzal a navýšil je o roční míru inflace silové elektřiny na denním trhu. Ceny regulovaných složek silové elektřiny jsem také pro další roky navyšoval o roční míru inflace regulované složky silové elektřiny. Takto jsem dostal data o elektrických energiích na 20 let dopředu. Roční míru inflace silové elektřiny na denním trhu jsem stanovil pomocí geometrického průměru z hodnot inflace od roku 2014 až 2020. Nákupní cenu vody jsem také každý rok navýšil o inflaci vůči předešlému roku. Dále bude na každý rok nastavena jedna fixní maximální výkupní cena za 1 MWh elektrické energie, tyto ceny budou vycházet z výchozí ceny 1 MWh. Výchozí cena elektrické energie $1\,000\text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$ odpovídá maximální nákupní ceně 1 MWh pro 1. rok. Výchozí ceny pro další roky vycházejí z výchozí ceny $1\,000\text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$ pomocí přičtení zvolené částky. Vyrobený vodík bude vtlačován do stávajících průmyslových plynovodů zemního plynu firmy C-Energy Planá s.r.o. a následně bude spotřebován jako palivo v jejich plynových motorech. Motory jsou schopny pracovat i při 16 % hmotnostního podílu vodíku v zemním plynu. Budu předpokládat, že všechnen vyrobený vodík bude takto vtlačen do rozvodů. Ve výsledku to znamená, že firma bude muset nakupovat o vyrobené množství vodíku méně zemního plynu, a navíc o toto množství vodíku zaplatí méně za emisní povolenky.

Prodejní cenu vodíku jsem stanovil stejnou jako cenu zemního plynu + navíc použitím vodíku místo zemního plynu nám plyne úspora na emisních povolenkách, protože spalování vodíku je bezemisní.

V roce 0 se provedou všechny výstavby a potřebné úkony. Od roku 1 bude elektrolyzér provozován až po dobu jeho životnosti.

Roční míra inflace ira: 2,8 %

Roční míra inflace silové elektřiny na denním trhu irs: 1,4 %²⁶

²⁶ OTE. Statistika. *OTE* [online]. Praha: OTE, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, [cit. 2021-3-2]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocni-zprava?date=2020-01-01>

Roční míra inflace regulované složky silové elektřiny irr: 1,7 %²⁷
Emise CO₂ ze spalování zemního plynu EZP: 0,2 t CO₂·MWh⁻¹²⁸
Výhřevnost vodíku VH₂: 0,03 MWh·kg⁻¹²⁹
Kurz eura Ke: 1 euro...25,7 Kč
Cena vody jakožto paliva a chlazení elektrolyzáru CV: 80,09 Kč·Nm⁻³³⁰
Cena emisní povolenky CEP_{EUR}: 49 EUR·t⁻¹ CO₂³¹
Prodejní cena zemního plynu za MWh CP: 17 EUR·MWh⁻¹³²
Vypočtená prodejní cena vodíku za kg CH_{2kg}: 22,77 Kč·kg⁻¹ H₂
Vypočtená prodejní cena vodíku za MWh CH_{2MWh}: 688,76 Kč·kg⁻¹ H₂
Roční náklady na obsluhu, údržbu a mzdy NUM: 2 % z investičních nákladů

²⁷ ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. ERÚ vydává cenová rozhodnutí stanovující regulované ceny v elektroenergetice a plynárenství pro příští rok. *Www. eru.cz* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 28. 11. 2019 [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://www. eru.cz/-/eru-vydava-cenova-rozhodnuti-stanovujici-regulovane-ceny-v-elektroenergetice-a-plynarenstvi-pro-pristi-rok>

²⁸ DOLEŽEL, Jiří. Výpočet úspor emisí oxidu uhličitého (CO₂). In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha, 2006, 16.1.2006 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument6794.html>

²⁹ DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Vodíkové hospodářství. In: *HYTEP* [online]. Husinec-Řež, 2007, 25.1.2007 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vodikove-hospodarstvi/654-vodikove-hospodarstvi>

³⁰ NOVÁK, Petr. Vodné a stočné v 219 městech ČR. In: *Skrblík* [online]. Praha: PUEBLO, 2021, 8.2.2021 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.skrblík.cz/energie/voda/cena-vody/>

³¹ GRECMAN, Daniel. Cena emisních povolenek přesáhla v pátek 49 EUR/t, další růst je možný. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2021, 2.5.2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/emise-co2/cena-emisnich-povolenek-presahla-patek-49-eur-t-dalsi-rust-mozny>

³² OTE. Výsledky vnitrodenního trhu plyn. *OTE* [online]. Praha: OTE, 2020, 24.12.2020 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/plyn/vnitrodenni-trh?date=2020-12-01>

6.3 Přehled cen všech složek podílejících se na ceně elektřiny

Ceny v níže uvedených tabulkách jsou bez započtení DPH.³³

Provozovatel distribuční soustavy	Hladina napětí	Měsíční cena za roční rezervovanou kapacitu v Kč·MW ⁻¹ a měsíc	Cena za použití sítí VVN a VN v Kč·MWh ⁻¹
ČEZ Distribuce, a. s.	VVN	71 703	37,2
	VN	176 388	59,54
EG.D, a.s.	VVN	68 153	42,47
	VN	160 717	56,63
PREdistribuce, a.s.	VVN	75 223	36,05
	VN	194 060	47,87

Tab. 6.1: Cena za rezervovanou kapacitu a použití sítí provozovatele distribuční soustavy

Cena za systémové služby CSYS (Kč·MWh ⁻¹)	93,30
Cena na úhradu nákladů spojených s POZE CPOZE (Kč·MW ⁻¹ ·měsíc ⁻¹)	65 510,69
Cena za OTE COTE (Kč·OM ⁻¹ ·měsíc ⁻¹)	3,91
Cena za rezervovaný příkon CRP (Kč·MW ⁻¹) – jednorázový výdaj ³⁴	200 000
Daň z elektřiny CD (Kč·MWh ⁻¹)	28,30

Tab. 6.2: Ostatní složky výsledné ceny elektřiny

³³ ENERGETICKÝ REGULÁČNÍ ÚŘAD. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 9/2020 ze dne 27. listopadu 2020, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a ostatní regulované ceny. *Energetický regulační věstník* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2020, 30.11.2020, **20**(8), 4-23 [cit. 2021-3-2]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5890146/ERV8_2020.pdf/dd7e9fcc-b3e2-4151-9eff-3ccc5fd3971b

³⁴ ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě*. In.: Zlín: AION CS, 2016, ročník 16, 7/2016, číslo 16. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-16>

Náklady za účast na organizovaném denním trhu

Cena za získání statutu subjekt zúčtování CSZ (Kč)	100 000
Cena za činnost zúčtování CČZ (Kč·měsíc ⁻¹)	15 000
Cena za poskytování skutečných hodnot účastníkům trhu s elektrinou CPH (Kč·měsíc ⁻¹)	1 000
Cena za činnost organizace trhu COT (Kč·MWh ⁻¹)	1,42
Cena za činnost poskytování údajů z evidence o obchodních transakcích CPT (Kč·měsíc ⁻¹)	2875

Tab. 6.3: Poplatky za účast na krátkodobém denním trhu

6.4 Elektrolyzér SILYZER 200

První zvažovaná možnost je elektrolyzér SILYZER 200 od německé společnosti Siemens. Návrh vychází z parametrů nabídky této společnosti ze dne 7.4.2020. SILYZER 200 je už od výroby koncipovaná jako balíček, ve kterém je elektrolyzér, usměrňovač, transformátor a regulační systém. Samotný elektrolyzér je typu PEM a je tedy vhodný pro regulovaný provoz. Obecně pro PEM elektrolyzéry je nutná vyšší čistota vody v porovnání s alkalickými elektrolyzéry. Proto pro jeho použití je nutné vybrat adekvátní čističku napájecí vody do elektrolyzéro, například reverzní osmózu.

SILYZER 200	
Typ	PEM
Jmenovitý elektrický příkon jednoho článku Pi (MW)	1,25
Čas najetí na 100 % zatížení	Do 10 s
Výstupní tlak H ₂ p (MPa)	až 3,5
Čistota vodíku (%)	99,5 až 99,9

Měrná výroba H ₂ z 1 MW el. příkonu za hodinu MVH (kg·h ⁻¹)	16
Délka životnost (pracovní hodiny)	>80 000
Měrná spotřeba vody na výrobu 1 m ³ H ₂ MSV (l·Nm ⁻³ H ₂)	1,5
Účinnost (%)	61,8
Měrná spotřeba el. energie na 1 kg H ₂ MSE (kWh·kg ⁻¹ H ₂)	62,5
Měrné investiční výdaje (EUR·kW ⁻¹)	1500

Tab. 6.4: Parametry SILYZERU 200

- Přepočít: 1 kg H₂ = 11,89 Nm³ H₂

Výsledný navržený elektrolyzátor se skládá ze 4 článků řazených do série o výsledném jmenovitém elektrickém příkonu 5 MW, výrobou 80 kg·h⁻¹ H₂ a spotřebou vody 1427 l·h⁻¹. Produkovaný vodík má teplotu 80 °C a tlak 3,5 MPa. Celkové investiční výdaje poté činí 7,5 mil. euro.

Daňové odpisy elektrolyzátoru SILYZER 200 - odpisová skupina 3 (10 let odpisování) – zrychlené odpisování					
Rok	1	2	3	4	5
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	19 275 000	34 695 000	30 840 000	26 985 000	23 130 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	173 475 000	138 780 000	107 940 000	80 955 000	57 825 000

Daňové odpisy elektrolyzátoru SILYZER 200 - odpisová skupina 3 (10 let odpisování) – zrychlené odpisování					
Rok	6	7	8	9	10
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	19 275 000	15 420 000	11 565 000	7 710 000	3 855 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	38 550 000	23 130 000	11 565 000	3 855 000	0

Tab. 6.5: SILYZER 200 – roční zrychlené daňové odpisy

6.5 Elektrolyzátor SILYZER 300

Druhý zvažovaný elektrolyzátor je také od společnosti Siemens, jedná se o jejich nejnovější technologii. SILYZER 300 je také už z výroby dodán jako balíček, ve kterém je elektrolyzátor, usměrňovač, transformátor a regulační systém. Návrh vychází z parametrů nabídky této společnosti ze dne 7.4.2020. Samotný elektrolyzátor je typu PEM a je tedy

vhodný pro regulovaný provoz. Vyznačuje se vysokou modularitou. Základem je jeden článek o jmenovitém elektrickém příkonu cca 0,72 MW. Tyto články je opět možné sériově skládat a zatím největší postavený SILYZER 300 je v Německu o jmenovitém příkonu 17,5 MW, složený z 24 článků.

SILYZER 300	
Typ	PEM
Jmenovitý elektrický příkon jednoho článku Pi (MW)	0,72
Čas najetí na 100 % zatížení	Do 10 s
Výstupní tlak H ₂ p (MPa)	až 3,5
Čistota vodíku (%)	99,5 až 99,9
Měrná výroba H ₂ z 1 MW el. příkonu za hodinu MVH (kg·h ⁻¹)	19,6
Délka životnost (pracovní hodiny)	>80 000
Měrná spotřeba vody na výrobu 1 m ³ H ₂ MSV (l·Nm ⁻³ H ₂)	1,5
Účinnost (%)	75
Měrná spotřeba el. energie na 1 kg H ₂ MSE (kWh·kg ⁻¹ H ₂)	51,5
Měrné investiční výdaje (EUR·kW ⁻¹)	700

Tab. 6.6: Parametry SILYZERU 300

- Přepočít: $1 \text{ kg H}_2 = 11,89 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$

Výsledný navržený elektrolyzátor se skládá ze 7 článků řazených do série o výsledném jmenovitém elektrickém příkonu 5 MW, výrobou $98 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \text{ H}_2$ a spotřebou vody $1730 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Produkovaný vodík má teplotu $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlak $3,5 \text{ MPa}$. Celkové investiční výdaje poté činí 3,5 mil. euro.

Daňové odpisy elektrolyzátoru SILYZER 300 - odpisová skupina 3 (10 let odpisování) – zrychlené odpisování					
Rok	1	2	3	4	5
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	8 995 000	16 191 000	14 392 000	12 593 000	10 794 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	80 955 000	64 764 000	50 372 000	37 779 000	26 985 000

Daňové odpisy elektrolyzéry SILYZER 300 - odpisová skupina 3 (10 let odpisování) – zrychlené odpisování					
Rok	6	7	8	9	10
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	8 995 000	7 196 000	5 397 000	3 598 000	1 799 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	17 990 000	10 794 000	5 397 000	1 799 000	0

Tab. 6.7: SILYZER 300 – roční zrychlené daňové odpisy

6.6 Průmyslová reverzní osmóza – RO – 4000

Jedná se o blok reverzní osmózy (dále jen RO) pro čištění vody pro technické účely od české společnosti Milvit Water. Přes tento blok půjde veškerá voda do elektrolyzéry. Její průtok činí 4000 l·h⁻¹. Elektrický příkon 1500 W, napájecí sdružené napětí 400 V a proud 8,7 A. Poměr mezi odpadní a filtrovanou vodou je 1:1. Je tedy vhodná jak pro návrh se SILYZEREM 200, tak i pro SILYZER 300. Navíc obsahuje vysokotlaké čerpadlo. Investiční výdaje činí 350 000 Kč bez DPH. Firma poskytuje kompletní servis RO v podobě výměny filtrů a případného vyčištění. Životnost RO jako celku je dána zejména životností čerpadla, proto lze životnost odhadovat přibližně stejnou jako elektrolyzérů, tedy 20 let.³⁵

Reverzní osmóza - 4000	
Sdružené napětí U _s (V)	400
Elektrický příkon P _i (kW)	1,5
Polypropylenová vložka (životnost – 12 měsíců) (Kč·ks ⁻¹)	105
Uhlíková vložka (životnost 1 – 3 roky) (Kč·ks ⁻¹)	255
Uhlíkový pachový filtr (životnost 2 – 5 let) (Kč·ks ⁻¹)	500
Membrána RO (životnost 3 – 5 let) (Kč·ks ⁻¹)	1 900

Tab. 6.8: Základní elektrické parametry a spotřební části reverzní osmózy

³⁵ MILVIT WATER. Průmyslová reverzní osmóza - RO - 4000. *Úpravy vody* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.upravyvody.cz/267-prumyslova-reverzni-osmoza-ro-4000.html>

Daňové odpisy reverzní osmózy – odpisová skupina 3 (10 let odpisování) - zrychlené odpisování					
Rok	1	2	3	4	5
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	35 000	63 000	56 000	49 000	42 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	315 000	252 000	196 000	147 000	105 000

Daňové odpisy reverzní osmózy – odpisová skupina 3 (10 let odpisování) - zrychlené odpisování					
Rok	6	7	8	9	10
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	35 000	28 000	21 000	14 000	7 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	70 000	42 000	21 000	7 000	0

Tab. 6.9: Reverzní osmóza – roční zrychlené daňové odpisy

6.7 Elektrolyzér GenFuel 5 MW

Posledním zvažovaný elektrolyzér je od americké firmy PLUGPOWER. Návrh vychází z parametrů nabídky této společnosti ze dne 10.12.2020. Elektrolyzér je dodáván jako balíček obsahující samotný elektrolyzér, usměrňovač, regulační systém a čističku napájecí vody. V balíčku chybí transformátor pro připojení na distribuční síť 22 kV. Cenu transformátoru jsem odhadl na základě nabídek transformátorů, které byly společnosti C-Energy Planá s.r.o. poskytnuty již dříve pro jiné účely a jeho účinnost jsem uvažoval 99,5 %. Elektrolyzér je opět typu PEM a firma PLUGPOWER nabízí širokou nabídku článků o jmenovitém elektrickém příkonu od 50 do 2500 kW.

GenFuel 5 MW	
Typ	PEM
Jmenovitý elektrický příkon jednoho článku P _i (MW)	1
Čas najetí na 100 % zatížení	Do 5 minut – nezahřátý stroj Do 30 s – již zahřátý stroj
Výstupní tlak H ₂ p (MPa)	0,4 až 4
Čistota vodíku (%)	-

Měrná výroba H ₂ z 1 MW el. příkonu za hodinu MVH (kg·h ⁻¹)	18
Délka životnost (pracovní hodiny)	80 000
Měrná spotřeba vody na výrobu 1 m ³ H ₂ MSV (l·Nm ⁻³ H ₂)	1,03
Účinnost (%)	84
Měrná spotřeba el. energie na 1 kg H ₂ MSE (kWh·kg ⁻¹ H ₂)	55,56
Měrné investiční výdaje (EUR·kW ⁻¹)	800

Tab. 6.10: Parametry GenFuel 5 MW

- Přepočet: 1 kg H₂ = 11,11 Nm³ H₂

Výsledný elektrolyzátor o jmenovitém el. příkonu 5 MW je složen z pěti článků nazvaných ALLGASH, každý o jmenovitém el. příkonu 1 MW. GenFuel 5 MW vyrobí 90 kg·h⁻¹ H₂ a spotřebuje 1030 l·h⁻¹ vody. Produkovaný vodík má teplotu 70 °C a tlak 4 MPa. Celkové investiční výdaje poté činí 4 mil. euro.

Daňové odpisy elektrolyzátoru GenFuel 5 MW – odpisová skupina 3 (10 let odpisování) – zrychlené odpisování					
Rok	1	2	3	4	5
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	10 280 000	18 504 000	16 448 000	14 392 000	12 336 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	92 520 000	74 016 000	57 568 000	43 176 000	30 840 000

Daňové odpisy elektrolyzátoru GenFuel 5 MW – odpisová skupina 3 (10 let odpisování) – zrychlené odpisování					
Rok	6	7	8	9	10
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	10 280 000	8 224 000	6 168 000	4 112 000	2 056 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	20 560 000	12 336 000	6 168 000	2 056 000	0

Tab. 6.11: GenFuel 5 MW – roční zrychlené daňové odpisy

Daňové odpisy transformátoru – odpisová skupina 3 (10 let odpisování) - zrychlené odpisování					
Rok	1	2	3	4	5
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	300 000	540 000	480 000	420 000	360 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	2 700 000	2 160 000	1 680 000	1 260 000	900 000

Daňové odpisy transformátoru – odpisová skupina 3 (10 let odpisování) - zrychlené odpisování					
Rok	6	7	8	9	10
Roční odpis RNO (Kč·r ⁻¹)	300 000	240 000	180 000	120 000	60 000
Zůstatková cena ZC (Kč)	600 000	360 000	180 000	60 000	0

Tab. 6.12: Transformátor – roční zrychlené daňové odpisy

6.8 Cenové porovnání investic do SILYZERU 300, 200 a Gen-Fuel 5 MW

V příloženém modelu v softwaru MS Excel lze libovolně nastavovat cenu elektřiny pro každý rok, za kterou budeme elektrickou energií 5 MWh ještě nakupovat danou hodinu. Diskont byl pro všechny 3 investice zvolen 10 %. Diskont zahrnuje roční míru inflace, riziko spojené s investicí, vlastní zisk a také zohledňuje fakt, že investované peníze by bylo možné investovat do jiné, méně rizikové investice. Všechny varianty mají stejnou předpokládanou dobu životnosti a pro uvažovanou výchozí cenu 1 000 Kč za 1 MWh el. energie vychází životnost na 20 let.³⁶

Maximální cena elektřiny pro každý rok, za kterou ještě nakupujeme el. energii 5 MWh pro každou hodinu CM (Kč·MWh ⁻¹) (výchozí cena 1000 Kč·MWh ⁻¹)			
Rok	Kč·MWh ⁻¹	Rok	Kč·MWh ⁻¹
1	1 000	11	1 200
2	1 005	12	1 220
3	1 035	13	1 240
4	1 065	14	1 260
5	1 090	15	1 280
6	1 120	16	1 300
7	1 145	17	1 320
8	1 140	18	1 340
9	1 170	19	1 360
10	1 180	20	1 380

Tab. 6.13: Výkupní parametry ceny 1 MWh elektřiny pro každý rok

³⁶ OTE. Statistika. OTE [online]. Praha: OTE, 2021, 8.4.2021 [cit. 2021-3-2]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocni-zprava?date=2020-01-01>

Roční náklady na údržbu a mzdy jsem stanovil jako 2 % z celkové výše ceny počáteční investice pro všechny tři varianty. Jsou do nich zahrnuty náklady na výměnu všech filtrů RO, náklady spojené s pravidelnou údržbou a revizí všech strojů. Životnost filtrů je uvažována jako průměrná, nicméně tato položka představuje tak nízké náklady, že je prakticky zanedbatelná.

SILYZER 300 – Počáteční investice a CF roku 0 investice		
	Počáteční investice (Kč)	Roční náklady na údržbu a mzdy (Kč·r ⁻¹)
SILYZER 300 - Pi = 5 MW	89 950 000	91 400
Reverzní osmóza 4000 l·h ⁻¹	350 000	
Platba OTE, a.s. za získání statutu subjekt zúčtování	100 000	
Cena za rezervaci příkonu	1 000 000	
CF roku 0	91 400 000	

Tab. 6.14: SILYZER 300 – počáteční investice

SILYZER 200 – Počáteční investice a CF roku 0 investice		
	Počáteční investice (Kč)	Roční náklady na údržbu a mzdy (Kč·r ⁻¹)
SILYZER 200 - Pi = 5 MW	192 750 000	194 200
Reverzní osmóza 4000 l·h ⁻¹	350 000	
Platba OTE za získání statutu subjekt zúčtování	100 000	
Cena za rezervaci příkonu	1 000 000	
CF roku 0	194 200 000	

Tab. 6.15: SILYZER 200 – počáteční investice

GenFuel 5 MW – Počáteční investice a CF roku 0 investice		
	Počáteční investice (Kč)	Roční náklady na údržbu a mzdy (Kč·r ⁻¹)
GenFuel 5 MW - Pi = 5 MW	102 800 000	106 900
Transformátor napájecí elektrolyzér	3 000 000	
Platba OTE za získání statutu subjekt zúčtování	100 000	
Cena za rezervaci příkonu	1 000 000	
CF roku 0	106 900 000	

Tab. 6.16: GenFuel 5 MW – počáteční investice

Porovnání roční produkce vodíku a výsledků hospodaření elektrolyzérů SILYZER 200, 300 a GenFuel 5 MW:

Roční produkce a náklady spojené s provozem elektrolyzérů v roce 1 (výchozí cena 1 000 Kč·MWh ⁻¹)			
	SILYZER 300	SILYZER 200	GenFuel 5 MW
Celkové množství nakoupené el. energie za rok TME (MWh·r ⁻¹)	28 280	28 280	28 280
Celkem zapláceno za silovou elektřinu za rok TNS (Kč·r ⁻¹)	18 511 901	18 511 901	18 511 901
Celkové roční množství vyrobeného vodíku TVH ₂ (kg·r ⁻¹)	549 275	452 344	506 495
Celkové roční množství vyrobeného kyslíku TVO ₂ (kg·r ⁻¹)	274 638	226 172	253 247
Celkové roční náklady za nakoupenou el. energii TNE (Kč·r ⁻¹)	37 392 611	37 392 611	37 392 611
Celková roční spotřeba vody TSV (l·r ⁻¹)	9 796 323	8 067 560	5 795 972
Celkové roční náklady na vodu TNV (Kč·r ⁻¹)	792 523	652 666	468 894
Celkové roční výnosy za vodík TVV (Kč·r ⁻¹)	12 505 537	10 298 677	11 531 542
Zisk před započtením úroků, daní a odpisů EBITDA (Kč·r ⁻¹)	-25 770 997	-27 940 800	-26 436 864
Zisk před zdaněním a úroky EBIT (Kč·r ⁻¹)	-30 034 847	-39 873 080	-31 432 605
Zisk před zdaněním EBT (Kč·r ⁻¹)	-30 034 847	-39 873 080	-31 432 605
Čistý zisk EAT (Kč·r ⁻¹)	-30 034 847	-39 873 080	-31 432 605
Roční peněžní tok CF (Kč·r ⁻¹)	-25 770 997	-27 940 800	-26 436 864
Ekvivalentní roční výrobní náklady na výrobu celkového množství H ₂ za rok N _{vr} (Kč·r ⁻¹)	57 785 955	59 964 081	59 169 252
Poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 kg H ₂ n _{vr,kg} (Kč·kg ⁻¹ ·r ⁻¹ H ₂)	99,35	163,83	110,32
Poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 MWh z H ₂ n _{vr,MWh} (Kč·MWh ⁻¹ ·r ⁻¹)	3 005,61	4 956,20	3 337,50

Tab. 6.17: Tabulka roční produkce a spotřeby SILYZERU 200 a 300 a GenFuel 5 MW

Pro výpočet ekvivalentních ročních výrobních nákladů N_{vr} byla použita poměrná anuita $a_{Tz} = 0,12$. Ta byla stanovena pomocí diskontu $r = 10\%$ a životnost pro všechny složky investice byla zvolena společně 20 let. Pro stanovení EBIT jsou použity výkonové účetní odpisy a pro stanovení daně z příjmu je v každém roce zohledněna i položka daná rozdílem účetních a daňových odpisů v daném roce. Pro elektrolyzéry, reverzní osmózu i transformátor jsem použil daňové zrychlené odpisování a odpisovou skupinu 3. Všechna nakoupená energie a voda jsou ihned spotřebovány, proto výdaje jsou zároveň i náklady. Dále jsem uvažoval okamžité proplacení výnosů za vyrobený vodík, proto výnosy jsou příjmy. Pro investici jsem neuvažoval úvěr, a tedy žádné úroky, proto $EBIT = EBT$. Dále zisk každého roku vyšel záporně, proto ani nemohla být zaplácena žádná daň, nicméně tuto ztrátu lze eventuálně uplatnit někdy v dalších 5 letech jako úlevu na dani z příjmu pro společnost. Nakonec tedy $EAT = EBT$. Účetní odpisy elektrolyzérů, reverzní osmózy a transformátoru jsou počítány výkonově a jsou přiloženy v modelu v MS excel.

Výsledné srovnání všech variant na základě NPV:

Pro $r = 10\%$ a doba životnosti 20 let

	SILYZER 300	SILYZER 200	GenFuel 5 MW
Výnosnost investice ROI (%)	-41,99	-19,84	-37,18
Čistá současná hodnota NPV (Kč)	-357 515 985	-437 363 105	-378 311 762

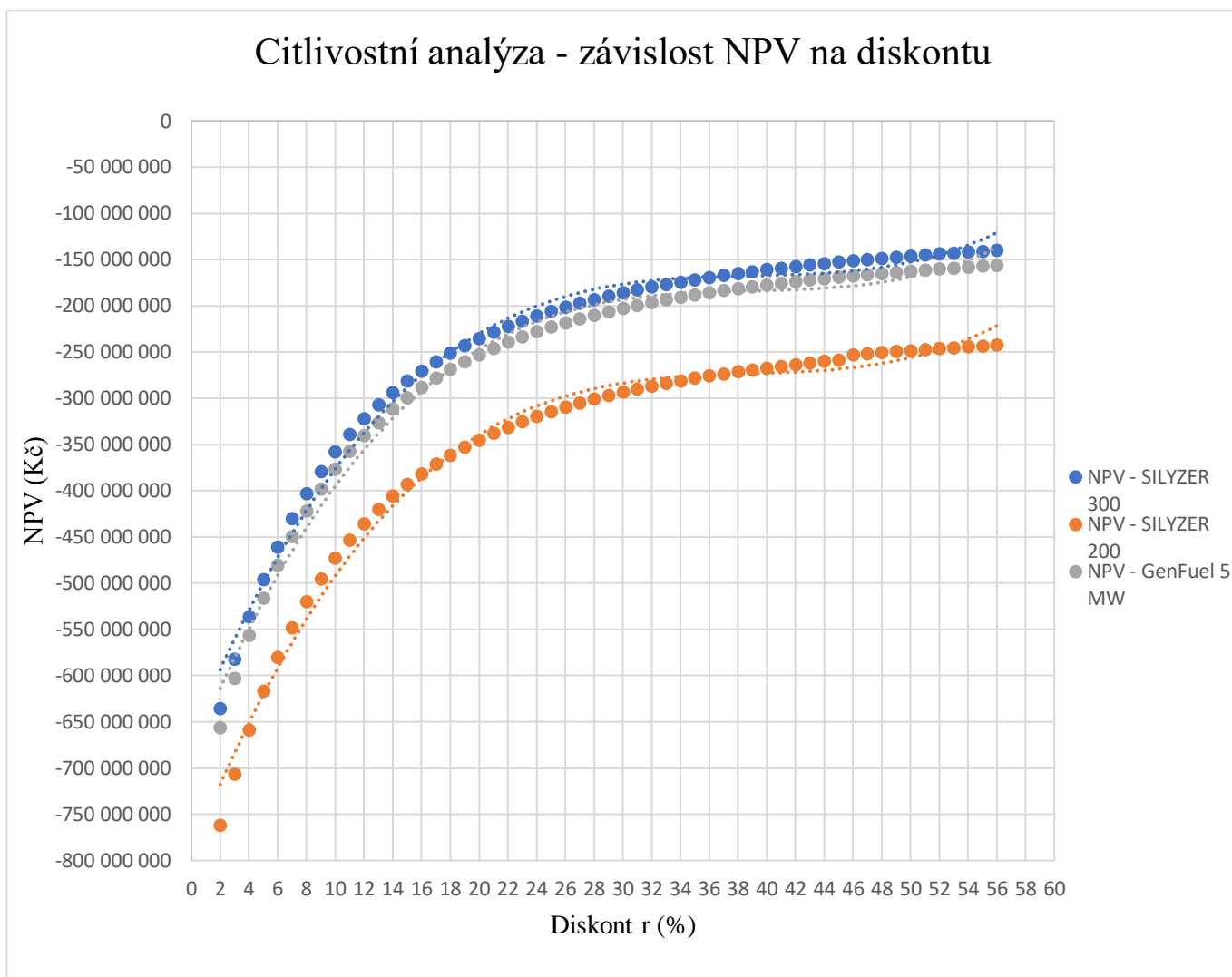
Tab. 6.18: Výsledné NPV a ROI – SILYZER 200 a 300 a GenFuel 5 MW

Z vypočtených hodnot NPV, jež jsou všechny záporné, vidíme, že ani jednu investici nelze doporučit, pokud je účelem investice zisk. Nicméně pokud bychom měli doporučit jednu ze tří variant, doporučili bychom variantu se SILYZEREM 300, která vykazuje největší NPV (nejmenší zápornou hodnotu).

NPV investice do SILYZERU 200 je nejmenší (největší záporné číslo) hlavně proto, protože pořizovací cena elektrolyzérů SILYZER 200 je téměř dvojnásobná v porovnání s elektrolyzéry SILYZER 300 a GenFuel 5 MW.

O ztrátovosti investice nám vypovídá i hodnota ROI každé investice. Zde ovšem největší ztrátovost vykazuje investice do varianty s elektrolyzérem SILYZER 300. To je dáno tím, že roční toky všech tří investic vycházejí hodně podobně, ale nejmenší počáteční

investici vykazuje právě SILYZER 300. A to má za následek, že se průměrné roční ztrátové CF rozloží do menší investice, respektive na každou korunu investice náleží větší část záporného průměrného ročního CF v porovnání s ostatními variantami.



Obr. 6.2: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na diskontu

6.9 Závislost NPV na prodejní ceně vodíku

Abychom mohli investici z finančního pohledu doporučit, požadujeme, aby $NPV \geq 0$. Pro zafixované hodnoty všech ostatních parametrů (diskont, cena vody, cena elektřiny, ...) vychází $NPV = 0$ (při $r = 10\%$), pokud bychom dokázali vyrobený vodík prodávat za cenu:

- $CH_{2,kg} = 153,46 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2$ při investici do SILYZERU 200 -> násobek $K \approx 6,7$
- $CH_{2,kg} = 95,97 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2$ při investici do SILYZERU 300 -> násobek $K \approx 4,2$
- $CH_{2,kg} = 106,78 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2$ při investici do GenFuel 5 MW -> násobek $K \approx 4,7$

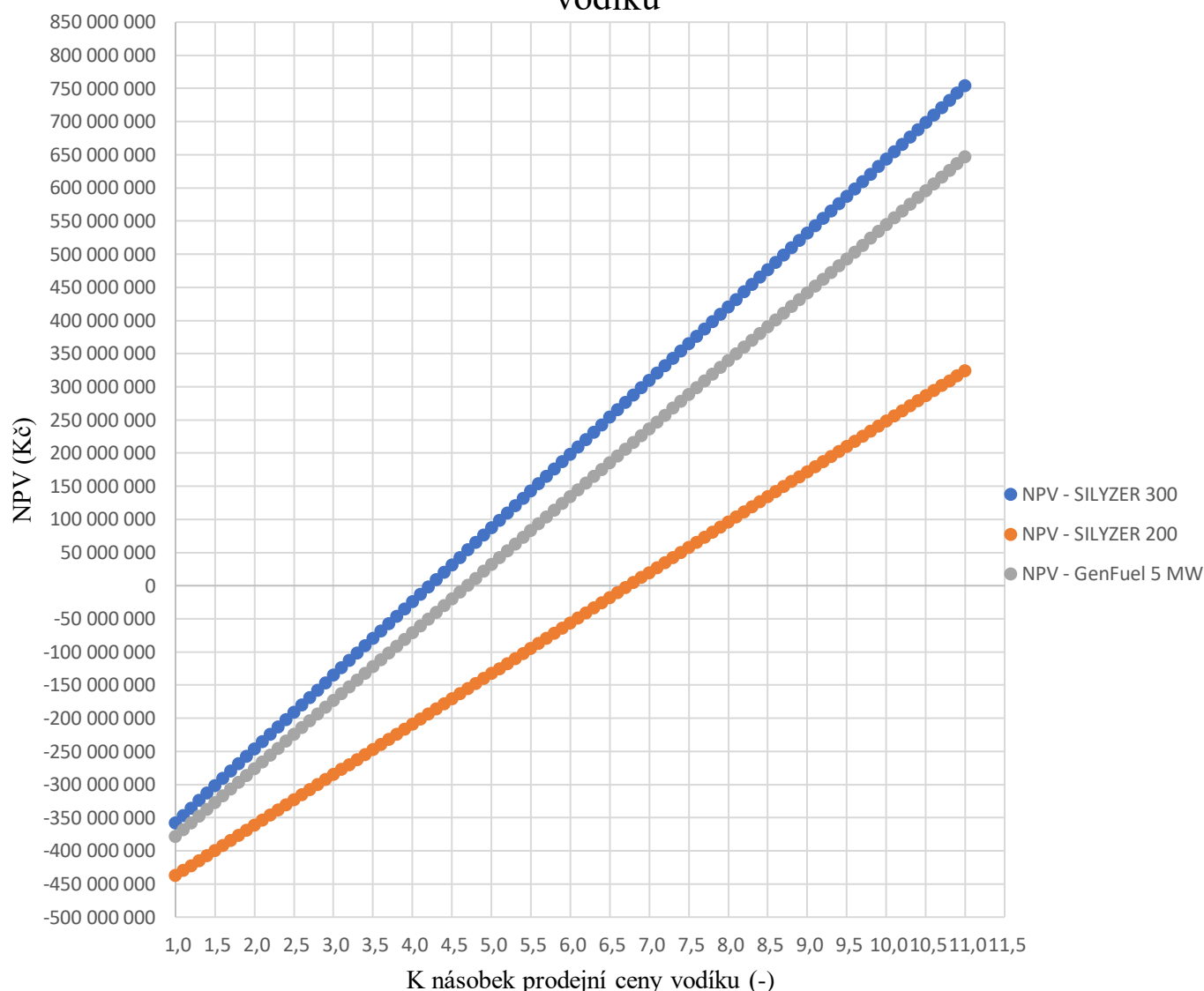
Násobkem K je vždy vynásobena cena vodíku $CH_{2_{kg}} = 22,77 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2$, například $K = 1,1$ znamená navýšení ceny vodíku o 10 %. Násobek $K = 1$ znamená původně vypočítanou cenu vodíku, tedy cena za 1 kg: $CH_{2_{kg}} = 22,77 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2$ nebo cena za 1 MWh: $CH_{2_{MWh}} = 688,76 \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$. Násobek $K = 6,1$ představuje cenu vodíku $CH_{2_{kg}} = 114,50 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2$ a $CH_{2_{MWh}} = 3\,463,09 \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$.

V současné době se cena stlačeného vodíku do tlakových nádob pohybuje kolem 8 euro za kg H_2 (pouze orientační údaj). Ovšem do této ceny se promítají i náklady na stlačení vodíku, náklady na tlakové nádoby, revize, údržba a také náklady na přepravu a skladování. Pro naše účely vtlačování vodíku do soustavy zemního plynu pro vlastní použití nelze použít tuto cenu 8 euro za 1 kg H_2 , protože nedokáže konkurovat ceně zemního plynu pro účely spalování v plynových motorech.

Pokud by nás zajímalo kritérium IRR, jeho výpočet je založen na předpokladu, že diskontované roční CF budou mít převážně kladné hodnoty, aby bylo možné se dostat na takový součet diskontovaných ročních CF od roku 1 a dále, aby po přičtení záporné počáteční investice, vyšla nula, tedy $NPV = 0$. Naše roční CF jsou pouze záporné, proto nelze stanovit reálnou kladnou hodnotu IRR. Z matematického pohledu by bylo možné se dostat při záporných ročních CF na nulový součet, pokud bychom připustili možnost záporného IRR a CF lichých let by muselo být větší než CF sudých let, takto bychom dokázali dostat kladné diskontované hodnoty.

Výpočet prosté doby návratnosti také předpokládá kladné hodnoty ročních CF, proto toto kritérium také nelze určit.

Citlivostní analýza - závislost NPV na K násobku prodejní ceny vodíku

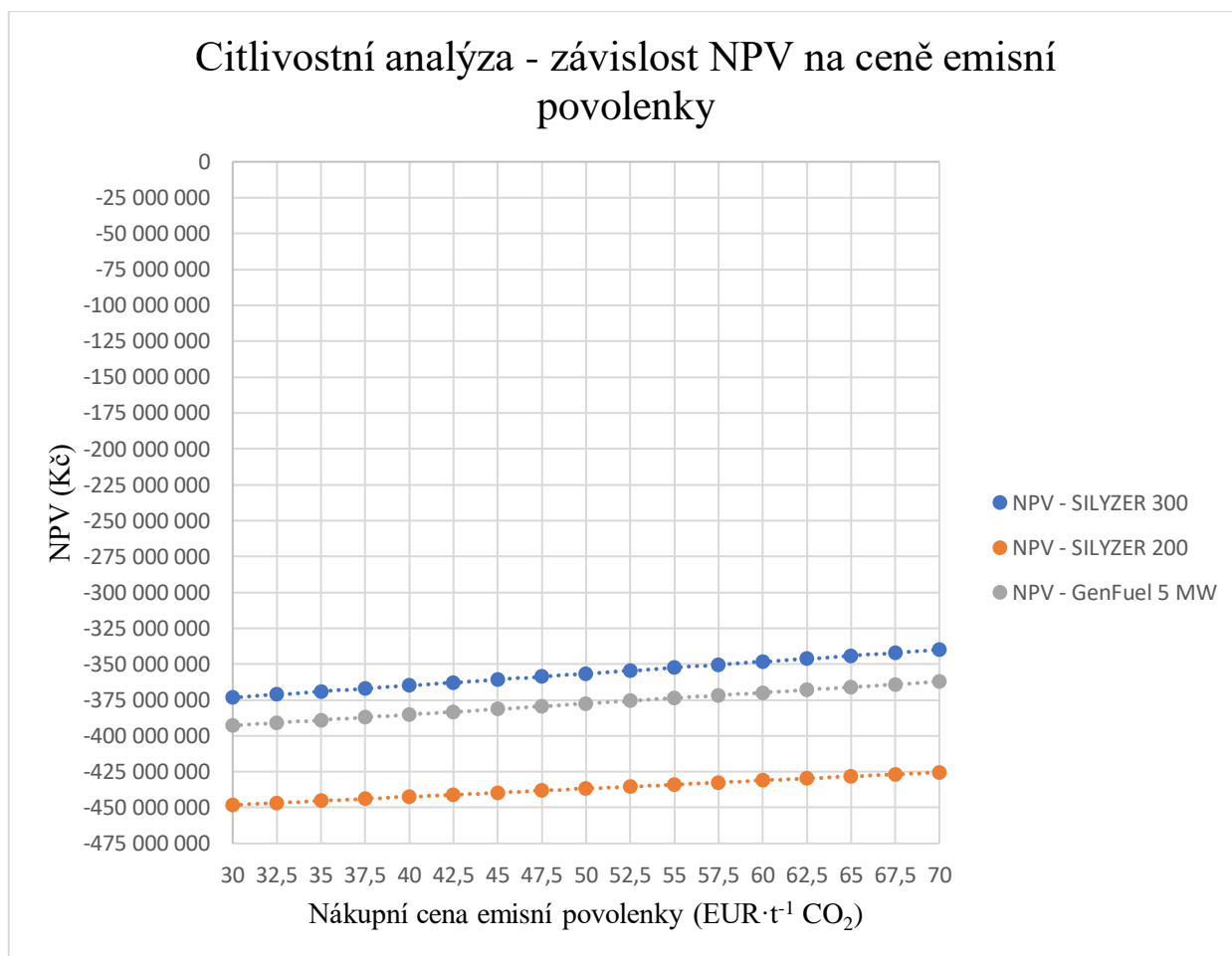


Obr. 6.3: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na K násobku prodejní ceny vodíku

Grafické průběhy v obr. 6.3 nám ukazují lineární růst NPV s cenou vodíku. Dále z grafických průběhů můžeme vyčíst, že s největší směrnicí roste NPV SILYZERU 300 a s nejmenší směrnicí roste NPV SILYZERU 200. To je dáno přesně tím, že nejvíce vodíku ze stejného množství nakoupené elektřiny pro všechny 3 elektrolyzéry vyrobí elektrolyzér SILYZER 300 a nejméně vyrobí SILYZER 200. Elektrolyzér GenFuel 5 MW je svou výrobou a průběhem křivky mezi elektrolyzéry SILYZER 200 a 300.

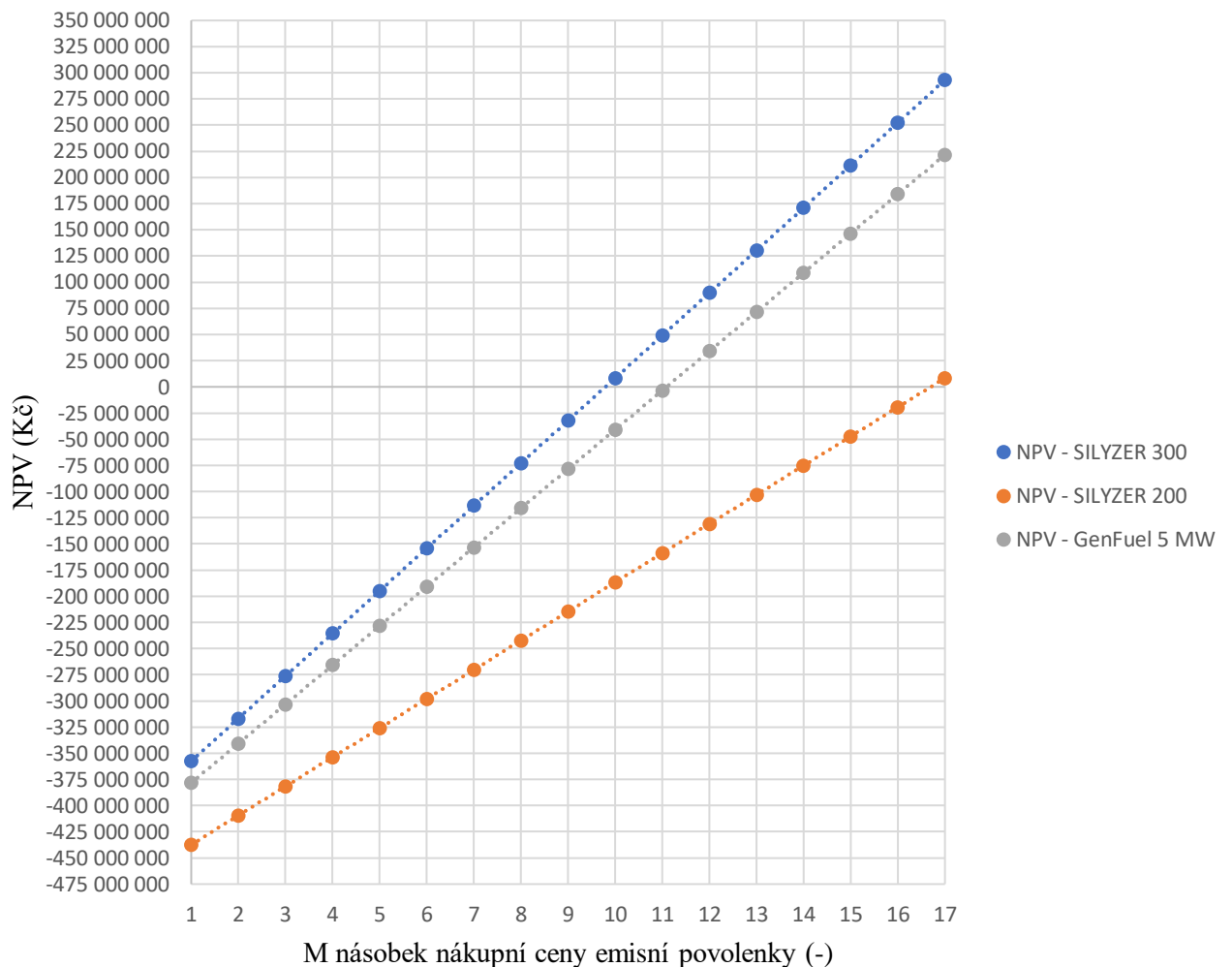
6.10 Závislost NPV na ceně emisní povolenky

Cena emisní povolenky stále roste, v prosinci roku 2020 se cena pohybovala kolem 30 EUR·t⁻¹ CO₂ na Evropském systému obchodování s emisními povolenkami (dále jen EU ETS), jehož je ČR součástí. V současné době (květen 2021) se cena vyšplhala až na hodnotu 49 EUR·t⁻¹ CO₂.



Obr. 6.4: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na ceně emisní povolenky

Citlivostní analýza - závislost NPV na M násobku nákupní ceny emisní povolenky



Obr. 6.5: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na M násobku nákupní ceny emisní povolenky

Násobkem M je vždy vynásobena nákupní cena emisní povolenky $CEP_{EUR} = 49 \text{ EUR} \cdot \text{t}^{-1} \text{ CO}_2$. například $M = 2$ znamená navýšení nákupní ceny emisní povolenky o 100 %, tedy na hodnotu $CEP_{EUR} = 98 \text{ EUR} \cdot \text{t}^{-1} \text{ CO}_2$. Násobek $M = 1$ znamená původně převzatou cenu emisní povolenky z EU ETS, tedy cena $CEP_{EUR} = 49 \text{ EUR} \cdot \text{t}^{-1} \text{ CO}_2$.

Pokud srovnáme tento graf z obr. 6.5 s grafem z obr. 6.3 vidíme, že velikost NPV je více závislá na změně násobku prodejní ceny vodíku než na násobku nákupní ceny emisní povolenky. Například abychom dostali NPV Silyzeru 300 do kladných hodnot, je potřeba M násobek nákupní ceny emisní povolenky CEP_{EUR} roven 10 ($M = 10$), nebo K násobek prodejní ceny vodíku $CH2_{kg}$ roven 4 ($K = 4$).

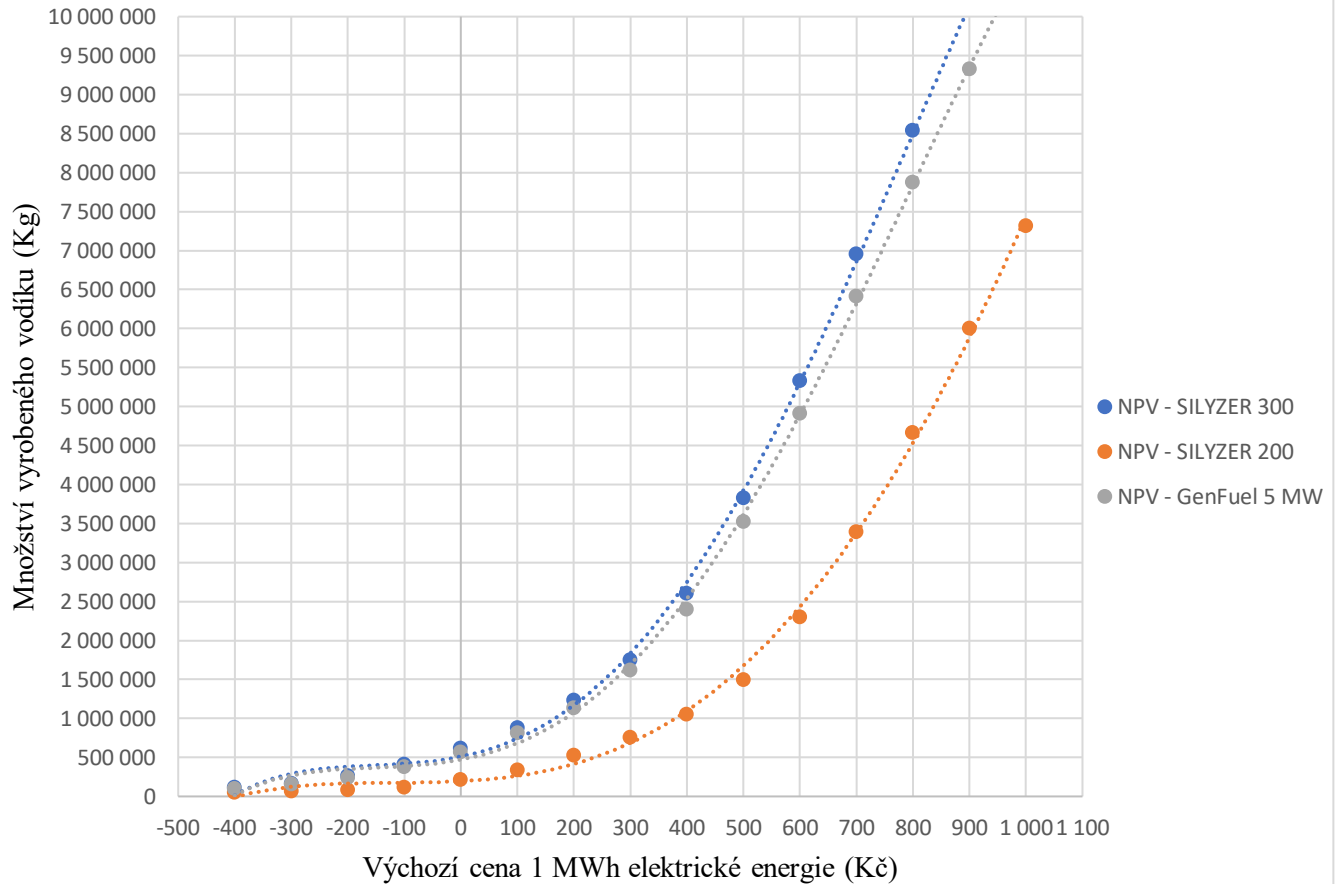
6.11 Závislost NPV na výchozí nákupní ceně 1 MWh el. energie

V níže uvedené tabulce 6.19 jsou znázorněny maximální výkupní ceny 1 MWh el. energie pro každý rok životnosti investice při výchozí ceně 600 Kč·MWh⁻¹. Například pro rok 8 je mezní hranice, za kterou ještě nakoupíme el. energii 5 MWh v každé hodině daného roku, stanovena jako 740 Kč·MWh⁻¹. V roce 8 tedy za vyšší cenu 1 MWh el. energie než 740 Kč·MWh⁻¹ elektřinu nenakupujeme.

Maximální cena pro každý rok, za kterou ještě nakupujeme el. energii 5 MWh (výchozí cena 600 Kč·MWh ⁻¹)			
rok	Kč·MWh ⁻¹	rok	Kč·MWh ⁻¹
1	600	11	800
2	605	12	820
3	635	13	840
4	665	14	860
5	690	15	880
6	720	16	900
7	745	17	920
8	740	18	940
9	770	19	960
10	780	20	980

Tab. 6.19: Výkupní parametry 1 MWh pro každý rok (výchozí cena 600 Kč·MWh⁻¹)

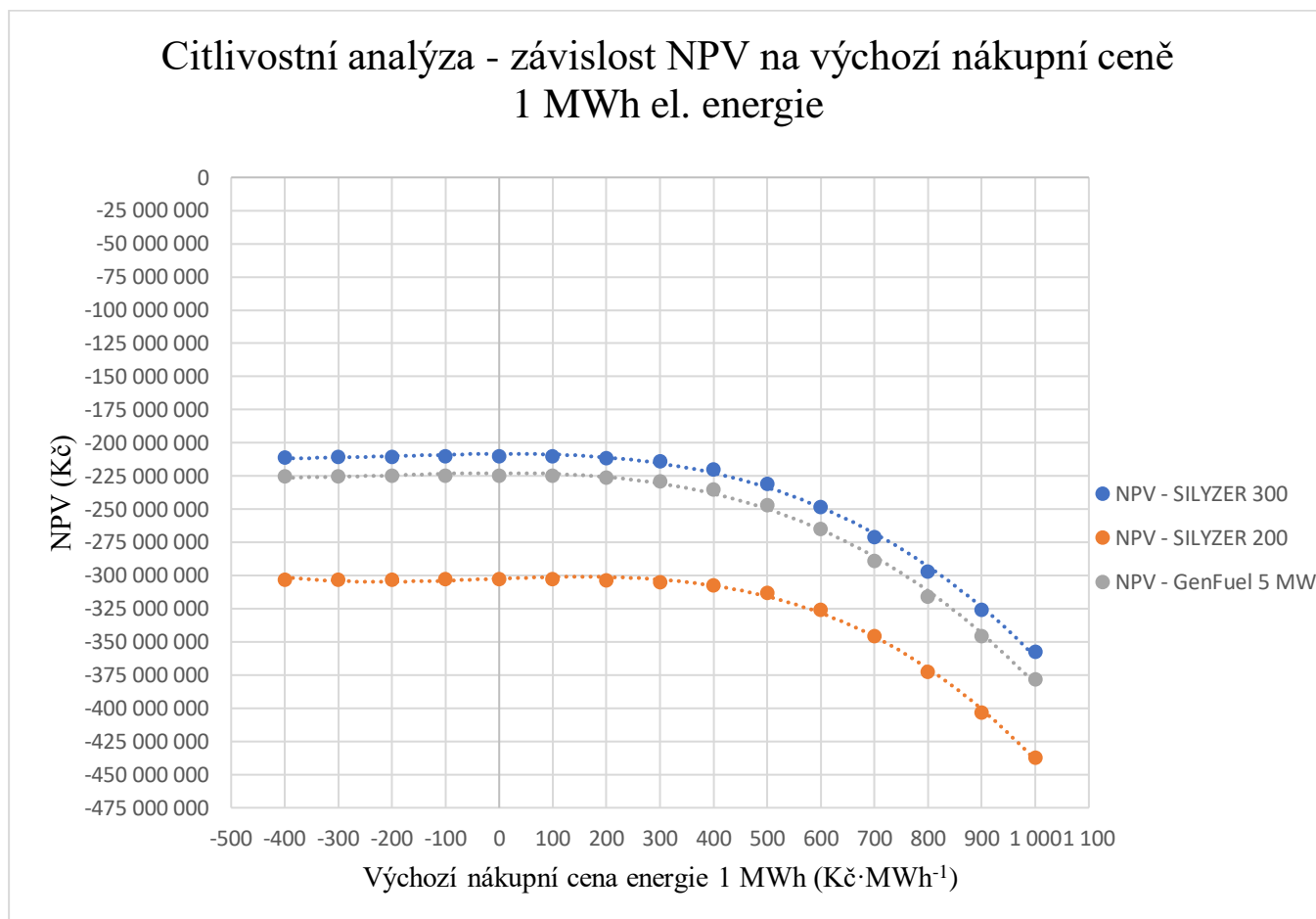
Citlivostní analýza - Celkové množství vyrobeného vodíku elektrolyzérem za dobu provozování 20 let v závislosti na výchozí nákupní ceně 1 MWh el. energie



Obr. 6.6: Graf citlivostní analýzy – závislost množství vyrobeného vodíku na výchozí ceně 1 MWh elektrické energie

Grafické průběhy v obr. 6.5 zobrazují celkové množství vyrobeného vodíku jednotlivými elektrolyzéry za dobu provozování 20 let v závislosti na výchozí nákupní ceně 1 MWh el. energie. Průběh grafu má tvar exponenciály a odpovídá tomu, že čím menší nastavíme výchozí cenu za 1 MWh el. energie, tím menší bude mezní cena 1 MWh elektřiny (pro každý rok provozu elektrolyzéro), za kterou ještě budeme nakupovat el. energii 5 MWh, tím méně bude elektrolyzér v provozu a tím méně vodíku vyrobí. To, že průběh grafu není lineárně rostoucí, ale spíše by se dal aproximovat exponenciálou (případně parabolou pro kladné hodnoty argumentů) nám říká o krátkodobém denním trhu s elektřinou, že kumulovaný počet nabídek v daném roce (počet hodin v da-

ném roce) s rostoucí cenou 1 MWh elektřiny roste exponenciálně. Kumulovaným počtem nabídek se myslí součet nabídek splňující kritérium, že cena 1 MWh el. energie v danou hodinu v daném roce musí být nižší než mezní cena 1 MWh el. energie pro celý daný rok



Obr. 6.7: Graf citlivostní analýzy – závislost NPV na maximální ceně pro nákup energie 1 MWh

Grafické průběhy odpovídají skutečnosti, že cena 1 MWh se na denním trhu elektřiny po celý rok pohybovala zejména nad 300 Kč·MWh⁻¹. Pod tuto hodnotu se cenové nabídky příliš neobjevovaly. A jelikož náklady na výrobu 1 kg vodíku jsou několikanásobné, než jsou výnosy z prodeje toho vodíku, tak čím více energie se nakoupí (tím více vodíku se vyrobí), tím větší jsou roční ztráty.

Proto NPV pro výchozí cenu pod 300 Kč·MWh⁻¹ vychází víceméně konstantní, protože elektrolyzátor v porovnání s výchozí cenou 1 000 Kč·MWh⁻¹ prakticky nevyrábí, je vypnut.

Dále ve vypočteném NPV je zahrnuta i diskontovaná odhadnutá zbytková hodnota elektrolyzátoru. Protože v PEM elektrolyzátoru při vypnutém stavu není žádná kapalina, nejsou

v něm žádné točivé části a elektrody nejsou pod napětím (řízeno usměrňovačem), odhadl jsem zbytkovou hodnotu pomocí rovnice (6.1):

$$\text{Zbytková hodnota} = 0,85 \cdot \text{investiční výdaj} \cdot \left(1 - \frac{A}{B}\right) \quad (\text{Kč}) \quad (6.1)$$

kde:

A...Celkové vyrobené množství vodíku za dobu 20 let (kg), pro výchozí cenu (zkráceně také jako VC) ($\text{Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$)

B... Celkové vyrobené množství vodíku za dobu 20 let (kg), $VC = 1\,000 \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$
 $VC \in \langle -400; 1\,000 \rangle \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$, s krokem $100 \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$

0,85...Odhad, že prodejní cena elektrolyzéry po 1. roce používání poklesne o 15 %.

Zbytková hodnota je výnos a zároveň příjem, proto se zobrazí jak do CF, tak i do výsledku hospodaření v roce prodeje zařízení (elektrolyzéry).

Pro každou hodnotu VC je stanovena zbytková hodnota elektrolyzéry ve 20. roce životnosti. Právě 20. rok životnosti je rokem, kdy výroba elektrolyzérem je ukončena a elektrolyzér je prodán za zbytkovou hodnotu. Ve skutečnosti by výroba nemusela být ukončena a elektrolyzér by po revizi teoreticky mohl pracovat dále, obzvláště pro nízké hodnoty VC, kdy elektrolyzér pro předpokládané roční ceny $1 \text{ MWh el. energie}$ prakticky nebyl využit. Ale pro naše účely bude vhodné předpokládat ukončení výroby, protože další teoretické prodloužení provozu by se mohlo čím dál více vzdalovat odhadnuté ceně $1 \text{ MWh el. energie}$, která by v 21. roce životnosti a dál nastala.

Pro SILYZER 300 je výsledný daňový základ pro 20. rok životnosti investice (po započítání daňových úlev plynoucích ze záporných hodnot EBT předešlých pěti let) záporný na celém intervalu výchozích nákupních cen energie $1 \text{ MWh} \langle -400; 1\,000 \rangle \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$.

Ovšem pro investici do SILYZERU 200 v intervalu VC od $\langle 500; 1\,000 \rangle \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$ a pro investici do GenFuel 5 MW v intervalu VC od $\langle 200; 1\,000 \rangle \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$ vychází kladný daňový základ pro 20. rok životnosti investice i po započítání daňových úlev plynoucích ze záporných hodnot EBT předešlých pěti let.

7 ZÁVĚR

Práce seznamuje čtenáře s různými způsoby akumulace elektrické energie, zejména pak s akumulací do chemické energie vodíku a technologií pro elektrolýzu vody. V další části je navrhnout model pro výrobu vodíku z nakupované elektrické energie na krátkodobém denním trhu organizovaným OTE, a.s.,. Takto vyprodukovaný vodík by se vtláčet do stávajících průmyslových plynovodů zemního plynu společnosti C-Energy Planá s.r.o. a následně by byl využit v jejich plynových motorech. V poslední části jsou stanoveny hodnoty NPV pro různé cenové nabídky elektrolyzérů a jsou provedeny citlivostní analýzy NPV. Citlivostní analýzy zkoumají změnu NPV v závislosti na změně vstupů jako jsou cena emisní povolenky, změna prodejní ceny vodíku, změna diskontu a změna maximální výkupní ceny elektrické energie 1 MWh pro každou hodinu daného roku, kdy uskutečníme nákup elektrické energie 5 MWh.

Mezi zvažované nabídky patřily dva elektrolyzéry od německé společnosti Siemens a jedna nabídka na elektrolyzér od americké společnosti PLUGPOWER.

Elektrolyzéry od společnosti Siemens jsou dodávány jako balíčky obsahující elektrolyzér, usměrňovač, transformátor a regulační systém. Potřeba je ještě investovat do čističky vody (například reverzní osmóza).

Elektrolyzér od společnosti PLUGPOWER je dodáván jako balíček obsahující elektrolyzér, usměrňovač, čističku napájecí vody a regulační systém. Potřeba je ještě investovat do transformátoru pro připojení elektrolyzéro k distribuční soustavě 22 kV.

Všechny tyto tři elektrolyzéry jsou typu PEM (s pevnou membránou, která slouží jako separátor a zároveň slouží jako elektrolyt). Obě dvě společnosti skládají své elektrolyzéry z jednotlivých článků o různých elektrických příkonech tak, aby splnily požadavek poptávky. Pro zvažované použití elektrolyzéro společnosti C-Energy Planá s.r.o. byl požadavek na výsledný elektrický příkon elektrolyzéro 5 MW.

První nabídka od společnosti Siemens byla na elektrolyzér s označením SILYZER 200. Jedná se o starší model a v porovnání s ostatními zvažovanými elektrolyzéry má horší parametry. Jedná se zejména o parametry jako měrná výroba H₂ z 1 MW el. příkonu za hodinu, která činí **16 kg·h⁻¹**. Druhým důležitým parametrem je pořizovací cena elektrolyzéro, která činí **7,5 mil. euro**. Elektrolyzér SILYZER 200 o elektrickém příkonu 5 MW je složen ze 4 článků řazených do série.

Druhá nabídka od společnosti Siemens byla na elektrolyzér s označením SILYZER 300. Jedná se o nejnovější model elektrolyzéro a v porovnání s ostatními zvažovanými elektrolyzéry má nejlepší parametry. Měrná výroba H₂ z 1 MW el. příkonu za hodinu u tohoto elektrolyzéro činí **19,6 kg·h⁻¹** a pořizovací cena elektrolyzéro činí **3,5 mil. euro**. Elektrolyzér SILYZER 300 o elektrickém příkonu 5 MW je složen ze 7 článků řazených do série.

Třetí nabídka od společnosti PLUGPOWER byla na elektrolyzér s označením GenFuel 5 MW. Tento elektrolyzér se svými parametry pohybuje mezi SILYZEREM 300 a SILYZEREM 200. Měrná výroba H₂ z 1 MW el. příkonu za hodinu u tohoto elektrolyzéro činí **18 kg·h⁻¹** a pořizovací cena elektrolyzéro činí **4 mil. euro**. Elektrolyzér GenFuel 5 MW o elektrickém příkonu 5 MW je složen z 5 článků s označením ALLGASH. Pro všechny tyto tři nabídky systémů s elektrolyzérem byly vypočítány čisté současné hodnoty (dále jen NPV).

Na základě výsledných hodnot NPV jednotlivých nabídek elektrolyzéro nelze ani jednu variantu za stávajících podmínek doporučit, všechny jsou ztrátové.

NPV pro variantu s elektrolyzérem SILYZER 200 vychází **-437 363 105 Kč**

NPV pro variantu s elektrolyzérem SILYZER 300 vychází **-357 515 985 Kč**

NPV pro variantu s elektrolyzérem GenFuel 5 MW vychází **-378 311 762 Kč**

Ovšem pokud bychom měli doporučit pouze jednu variantu, doporučili bychom variantu s elektrolyzérem SILYZER 300, jejíž NPV je větší než NPV variant s elektrolyzéry SILYZER 200 a GenFuel 5 MW.

Všechny tři varianty byly počítány s výnosy a příjmy z prodejní ceny vodíku rovné ceně zemního plynu a nákladech ušetřených na emisních povolenkách. Takto stanovená cena vodíku odpovídá **688,76 Kč·MWh⁻¹**. Pro všechny tři varianty vycházely roční peněžní toky záporně. To je dáno tím, že výnosy produkované z vodíku při prodejní ceně 688,76 Kč·MWh⁻¹ nejsou dostatečně vysoké, aby pokryly náklady na nakupovanou elektřinu, jež slouží k napájení elektrolyzéro.

Prodejní cena vodíku ve výši **688,76 Kč·MWh⁻¹** odpovídá minimální ceně, kdy by společnost C-Energy Planá s.r.o. uvažovala o používání vodíku (jakožto paliva) místo zemního plynu pro jejich plynové motory.

Pro doporučenou variantu s elektrolyzérem SILYZER 300 vychází poměrné ekvivalentní roční výrobní náklady na 1 MWh z H₂ **3 005,61 Kč·MWh⁻¹**.

To ovšem znamená, že výnosy z vodíku nedokážou pokrýt náklady na samotnou výrobu vodíku, a proto se s každým vyrobeným kg vodíku zvyšuje ztráta této investice. Z tohoto důvodu se investice do elektrolyzátoru pro společnost C-Energy Planá s.r.o. v současné době jeví jako nesmyslná.

Pokud by se společnost C-Energy Planá s.r.o. rozhodla pro investici do elektrolyzátoru, požadovala by výrobní náklady vodíku maximálně ve stejné výši, jako jsou náklady na nákup zemního plynu a emisních povolenek (vztaženo na 1 MWh elektrické energie).

Neefektivnost investice do elektrolyzátoru dokládá i průběh závislosti NPV elektrolyzátorů pro různé výchozí ceny 1 MWh elektrické energie. Zde je vidět, že čím je menší maximální cena, za kterou ještě budeme nakupovat elektrickou energii 5 MWh, tím méně elektrické energie nakoupíme. A čím méně energie nakoupíme, tím méně budeme vyrábět vodíku a NPV poroste (ale pořád je záporné). To ovšem znamená, že pokud bychom elektrolyzátor již zakoupili, tak se ekonomicky nevyplatí jej provozovat.

Nicméně do budoucna se situace na trhu s vodíkem může a nejspíše bude značně měnit ve prospěch právě investic do vodíkových technologií, mezi které elektrolyzátor patří. Zejména se o to zaslouží politika EU a rozvoj vodíkových technologií (například automobilový průmysl). Navíc společnost C-Energy Planá s.r.o. do budoucna zvažuje výstavbu fotovoltaické elektrárny o elektrickém výkonu přibližně 7 MWp. Právě výkon této fotovoltaické elektrárny by mohl v budoucnu sloužit jako zdroj elektrické energie pro elektrolyzátor. Výsledná kombinace elektrolyzátoru a fotovoltaické elektrárny by mohla dosahovat vyšších hodnot NPV.

Mimo jiné elektrický výkon fotovoltaické elektrárny 7 MWp byl také důvod, proč byl hlavním parametrem při vytváření poptávky po elektrolyzátoru zvolen elektrický výkon elektrolyzátoru ve výši 5 MW.

Práce pokrývá všechny body zadání a při zpracování jsem si uvědomil a zažil, jak obtížné může být, získat konkrétní data a cenové nabídky od výrobců. Rád bych v tomto tématu pokračoval v diplomové práci s vizí rozšířit návrh právě o možnost připojení fotovoltaické elektrárny jakožto zdroje elektrické energie pro napájení elektrolyzátoru.

8 SEZNAM LITERATURY

- [1] ASOCIACE ENERGETICKÝCH MANAŽERŮ. *Trh s elektřinou: úvod do liberalizované energetiky* [online]. 2. aktualizované vydání. Praha: Asociace energetických manažerů, 2016, 297-304 [cit. 2020-10-30]. ISBN 978-80-260-9212-4. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/kniha-trh-s-elektrinou.pdf>.
- [2] BŘÍŽĎALA, Jan. Exotermní a endotermní reakce. *E-CHEMBOOK* [online]. Třebíč, 2012 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/exotermni-a-endotermni-reakce>
- [3] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě*. In.: Zlín: AION CS, 2016, ročník 16, 7/2016, číslo 16. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-16>
- [4] ČEZ. Dlouhé stráně. In: *Svět energie* [online]. Praha: Simopt, 2016 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-cez/precerpavaci-elektrarna-dlouhe-strane>
- [5] DĚRGEL, Martin. Odčitatelné položky od základu daně z příjmů [online]. 31.3.2021 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://www.zivnostnik.cz/33/odcitatelne-polozky-od-zakladu-dane-z-prijmu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4ElRHge_8mMLuP-FRJG7huMNQ/?fbclid=IwAR3xzhvA6sX0OQLkDNFaJZZ-20qyo3Q83uXzSPPdc0EdcHZZr6hsbT3FuSg
- [6] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Vodíkové hospodářství. In: *HYTEP* [online]. Husinec-Řež, 2007, 25.1.2007 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vodikove-hospodarstvi/654-vodikove-hospodarstvi>

- [7] DOLEŽEL, Jiří. Výpočet úspor emisí oxidu uhličitého (CO₂). In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha, 2006, 16.1.2006 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument6794.html>
- [8] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 9/2020 ze dne 27. listopadu 2020, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a ostatní regulované ceny. *Energetický regulační věstník* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2020, 30.11.2020, **20**(8), 4-23 [cit. 2021-3-2]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5890146/ERV8_2020.pdf/dd7c9fcc-b3e2-4151-9eff-3ccc5fd3971b
- [9] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. ERÚ vydává cenová rozhodnutí stanovující regulované ceny v elektroenergetice a plynárenství pro příští rok. *Www.eru.cz* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 28. 11. 2019 [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/-/eru-vydava-cenova-rozhodnuti-stanovujici-regulovane-ceny-v-elektroenergetice-a-plynarenstvi-pro-pristi-rok>
- [10] GRECMAN, Daniel. Cena emisních povolenek přesáhla v pátek 49 EUR/t, další růst je možný. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2021, 2.5.2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/emise-co2/cena-emisnich-povolenek-presahla-patek-49-eur-t-dalsi-rust-mozny>
- [11] HÁJEK, Petr: *Přednášky z předmětu Matematická analýza II (B0B01MA2A)*, FEL ČVUT v Praze, 2018.
- [12] CHISHOLM, Greig a Leroy CRONIN. Hydrogen From Water Electrolysis. *Storing Energy* [online]. Glasgow: Elsevier, 2016, s. 319-326 [cit. 2020-10-30]. ISBN 978-0-12-803440-8. Dostupné z: http://www.chem.gla.ac.uk/cronin/media/papers/Chisholm-Chapter_16_2016.pdf
- [13] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Electrical Energy Storage* [online]. Ženeva: International Electrotechnical Commission,

- 2011 [cit. 2020-10-23]. ISBN 978-2-88912-889-1. Dostupné z:
<https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>
- [14] JEFF, Cruzan. Gibbs Energy. *Xaktly* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z:
<https://xaktly.com/GibbsEnergy.html>
- [15] KONÍČEK, Petr: *Přednášky z předmětu Fyzika I (B1B02FY1)*, FEL ČVUT v Praze, 2018.
- [16] KOREL, Jan. *Projektování a měření přídatného uzemnění vedení VVN a ZVN*. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [17] KUBA, Jan: *Přednášky z předmětu Electrical engineering technological processes (B1B13TEP)*, FEL ČVUT v Praze, 2019.
- [18] MAJLING, Eduard. *Nová technologie zachytávání CO₂. O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2019, 2.11.2019 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z:
<https://oenergetice.cz/emise-co2/vedci-americkeho-mit-vyvinuli-novou-metodu-zachytavani-co2-ze-vzduchu>
- [19] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA, ČZU PRAHA a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC Public, 2011, 27.02.2011, **2011**(2/2011), 6-10 [cit. 2020-10-23]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie--9696>
- [20] MILVIT WATER. *Průmyslová reverzní osmóza - RO - 4000. Úpravy vody* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.upravyvody.cz/267-prumyslova-reverzni-osmoza-ro-4000.html>
- [21] NOVÁK, Petr. *Vodné a stočné v 219 městech ČR*. In: *Skrblík* [online]. Praha: PUEBLO, 2021, 8.2.2021 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.skrblík.cz/energie/voda/cena-vody/>

- [22] OTE. Statistika. *OTE* [online]. Praha: OTE, 2021, 8.4.2021 [cit. 2021-3-2]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocn-zprava?date=2020-01-01>
- [23] OTE. Statistika. *OTE* [online]. Praha: OTE, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, [cit. 2021-3-2]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocn-zprava?date=2020-01-01>
- [24] OTE. Výsledky vnitrodenního trhu plyn. *OTE* [online]. Praha: OTE, 2020, 24.12.2020 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratko-dobe-trhy/plyn/vnitrodenni-trh?date=2020-12-01>
- [25] PANKRÁC, Vítězslav: *Přednášky z předmětu Elektromagnetické pole (B1B17EMP)*, FEL ČVUT v Praze, 2019.
- [26] REICHL, Tomáš. Metal-air baterie. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2015, 9.4.2015 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/metal-air-kov-vzduchova-baterie>
- [27] REICHL, Tomáš. Sodíkové baterie. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2015, 15.5.2015 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/sodikove-baterie-konstrukce-princip-cinnosti-a-aplikace>
- [28] SALAVEC, Jiří. Trh s elektřinou - specifika, účastníci trhu a rozdělení. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2017, 9.6.2017 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/tag/trh-s-elektrinou>
- [29] SIEMENS. *Efficiency – Electrolysis* [online]. Erlangen: Siemens, 2019, 8.1.2019, (SICM-T10001-00-7400), 3-6 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:139de890-44e1-453b-8176-c3d45c905178/version:1594896797/white-paper-efficiency-en.pdf>
- [30] STARÝ, Oldřich: *Přednášky z předmětu Základy podnikání (B1B16ZPU)*, FEL ČVUT v Praze, 2019.

- [31] SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES. Initiating Redox Flow Batteries. *Sumitomo Electric Industries* [online]. Osaka: Sumitomo Electric Industries, 2018, 18.12.2018 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://global-sei.com/company/press/2018/12/prs102.html>
- [32] TICHÝ, Tomáš: Přednášky z předmětu Výroba elektronických zařízení (B1M13VEZ), FEL ČVUT v Praze, 2019.
- [33] TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. CENTRÁLNÍ VÝROBA VODÍKU. *Chemické listy* [online]. 2017, **111**(2), 123-125 [cit. 2020-10-30]. ISSN 1213-7103 (on-line). Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2017_02_121-128.pdf
- [34] ZAPOMĚL, Jaroslav. Akademie věd ČR. *Skladování energie – setrvačnický* [online]. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, 2017 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <http://upase.it.cas.cz/skladovani-energie-setrvacniky/#:~:text=K%20dod%C3%A1v%C3%A1n%C3%AD%20energie%20do%20setrva%C4%8Dn%C3%ADku,pou%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDm%20prost%C5%99edk%C5%AFm%20pro%20skladov%C3%A1n%C3%AD%20energie.>

9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 - Elektrolyzér SILYZER 300 - Tabulky ročních vstupů a výstupů elektrolyzéro, tabulky ročních výnosů a nákladů, výsledné NPV a parametry použitých technologií

Příloha č. 2 - Elektrolyzér SILYZER 200 - Tabulky ročních vstupů a výstupů elektrolyzéro, tabulky ročních výnosů a nákladů, výsledné NPV a parametry použitých technologií

Příloha č. 3 - Elektrolyzér GenFuel 5 MW - Tabulky ročních vstupů a výstupů elektrolyzéro, tabulky ročních výnosů a nákladů, výsledné NPV a parametry použitých technologií

Příloha č. 4 - Grafické průběhy a srovnávací tabulky pro všechny 3 elektrolyzéry (SILYZER 200, 300 a GenFuel 5 MW)

Příloha č. 5 – Výpočetní program