

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

Akumulace přebytků energie z OZE do vodíku

Accumulation of energy surplus from RES to hydrogen

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Management energetiky a elektrotechniky

Vedoucí práce: Ing. Jiří Beranovský Ph.D., MBA

**Bc. Petr Vaněk
Praha, 2021**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaněk** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **465831**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Management energetiky a elektrotechniky**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Akumulace přebytků energie z OZE do vodíku

Název diplomové práce anglicky:

Accumulation of energy surplus from RES to hydrogen

Pokyny pro vypracování:

- Analýza možností využití přebytků energie z FVE systémů do vodíku.
- Návrh ekonomického cyklu využití, například: FVE, elektrolyzér, akumulace, palivový článek.
- Sestavení energetické bilance a ekonomického modelu pro vzorový projekt.
- Vyhodnocení variant, shrnutí a vyhodnocení výsledků, formulace závěrů.

Seznam doporučené literatury:

ENABLING FACTORS FOR ALTERNATIVELY-POWERED CARS AND VANS IN THE EUROPEAN UNION [online]. 2020 [vid. 2020-12-25]. Dostupné z: www.eafo.eu.
International Finance Corporation (2015) Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants In partnership with a project Developer's GulDe, Available at https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/a1b3dbd3-983e-4ee3-a67b-cdc29ef900cb/IFC+Solar+Report_Web+_08+05.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kZePDPG
o Ing. František Žák: Provoz fotovoltaických elektráren připojených do distribuční sítě, přednáška na ZČU, 2011
o PPDS 2011, Příloha č. 4 - Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy
o Ing. Vladimír Korenc, Dr. Ing. Tomáš Bůbela; Problematika regulace jalového výkonu u fotovoltaických elektráren; Odborný článek firmy ELCOM, a.s., 2012

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Beranovský, Ph.D., MBA, katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **26.01.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

Ing. Jiří Beranovský, Ph.D., MBA
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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 Praze dne

Bc. Petr Vaněk

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Beranovskému Ph.D., MBA za odborné vedení a také za ochotu, čas a cenné rady poskytnuté v průběhu vytváření této diplomové práce. Mé poděkování patří také Ing. Tomáši Králíkovi, Ph.D. za hodnotné rady k ekonomické části práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval také mé rodině a přátelům za jejich podporu a trpělivost.

Abstrakt

Diplomová práce pojednává o problematice akumulace přebytků energie z OZE do vodíku. V práci je popsán rozvoj vodíkových technologií v minulosti a předpokládaný vývoj těchto technologií v budoucnosti. Detailně je zpracována analýza současného stavu technologie a zejména možnosti jejího využití pro akumulaci energie z obnovitelných zdrojů, konkrétně z fotovoltaické elektrárny. Rozebrána je také problematika legislativy spojené s instalací vlastní elektrárny a příslušného akumulčního systému a dotačních programů, které lze v současnosti využít. Na tuto analýzu je navázáno návrhem konkrétního ekonomického a energetického cyklu využití vodíkové technologie ve spojení s obnovitelným zdrojem energie. Návrh obsahuje model kompletního sestavení systému pro výrobu a akumulaci elektrické energie z fotovoltaické elektrárny, výpočet energetické bilance rodinného domu a průzkumem trhu získaná data o jednotlivých komponentech vodíkového hospodářství. Aby bylo možné porovnat vodíkovou technologii s momentálně běžně využívanými technologiemi, projekt je vypracován nejen v referenční variantě s akumulací do vodíku, ale také ve variantě s akumulací do baterií a ve variantě s prodejem přebytků do distribuční sítě. Pro všechny varianty jsou v práci určeny předpoklady, stanoveny ekonomické parametry a na jejich základě vypočteny kritéria ekonomické efektivity. Dle těchto kritérií jsou varianty porovnány a je diskutováno reálné využití vodíkové technologie. Zpracovány jsou také citlivostní analýzy na důležité vstupní parametry.

Klíčová slova: vodík, akumulace, fotovoltaická elektrárna, obnovitelné zdroje energie, elektrolýza, palivový článek

Abstract

The diploma thesis deals with the issue of accumulation of energy surplus from RES to hydrogen. The thesis describes both the past development of hydrogen technologies and expected future progress. Detailed analysis of the current situation about the technology and possible application of hydrogen accumulation in connection with RES, namely PV power plant, is performed. The thesis also deals with law and subsidies issues connected to such a project. Based on the analysis of the current situation the economic and energy cycle is presented. A complete system for production and accumulation of energy to hydrogen is designed, the energetic balance of the house is calculated and data about components of the system are stated. The project is prepared not only in reference variation with accumulation to hydrogen, but in a variation with accumulation to batteries and in a variation with selling the energy surplus to the distribution grid. For all variations, indispensable assumptions are stated and economic parameters are defined. Variations of the project are compared on the basis of calculated economic efficacy criteria. The diploma thesis focuses also on the discussion of the real applicability of accumulation of energy surplus to hydrogen. What-if analyses of fundamental inputs are also prepared.

Keywords: hydrogen, accumulation, photovoltaic power plant, renewable sources of energy, electrolysis, fuel cell

Obsah

Seznam tabulek	viii
Seznam obrázků	ix
Seznam použitých zkratk a symbolů	x
Úvod	1
Motivace a cíl práce.....	3
1 Rozvoj akumulace do vodíku	5
1.1 Minulý vývoj vodíkové technologie.....	5
1.2 Očekávaný budoucí vývoj.....	6
1.2.1 První fáze	7
1.2.2 Druhá fáze	7
1.2.3 Třetí fáze.....	7
2 Analýza současného stavu	8
2.1 Nová zelená úsporám.....	8
2.2 Legislativa	9
2.3 Současný stav elektrolýzy vody	10
2.3.1 Alkalická elektrolýza (AEC)	12
2.3.2 PEM elektrolýza.....	12
2.3.3 Vysokoteplotní elektrolýza (SOEC).....	13
2.4 Zásobník na vodík.....	13
2.4.1 Zásobníky na plynný vodík	14
2.4.2 Zásobníky na tekutý vodík.....	15
2.4.3 Skladování adsorpcí do jiného materiálu	15
2.5 Přeměna vodíku na elektrickou energii.....	16
2.5.1 PEMFC	18
2.5.2 AFC.....	19
2.5.3 SOFC	20
3 Návrh systému pro akumulaci.....	21
3.1 Model spotřeby domácnosti	22
3.2 Fotovoltaické panely	22
3.2.1 Optimální počet fotovoltaických panelů.....	23
3.3 Varianta 1A – akumulace do vodíku (dlouhodobá).....	27
3.3.1 Elektrolyzér.....	28
3.3.2 Zásobník na vodík.....	30
3.3.3 Palivový článek	31
3.4 Varianta 1B – akumulace do vodíku (krátkodobá).....	32
3.4.1 Změny oproti variantě 1A.....	32
3.5 Varianta 2A – akumulace do baterií (dlouhodobá).....	33
3.5.1 Baterie.....	34

3.6	Varianta 2B – akumulace do baterií (krátkodobá)	35
3.6.1	Změny oproti variantě 2A.....	35
3.7	Varianta 3 – prodej přebytků do sítě	35
3.8	Prvky systému společné pro obě varianty	35
3.8.1	Wattrouter	35
3.8.2	Měnič.....	36
3.5.3	Čtyřkvadrantní elektroměr.....	36
4	Stanovení ekonomických parametrů.....	37
4.1	Doba životnosti.....	37
4.2	Inflace	37
4.3	Diskont	38
4.4	Cena elektrické energie.....	39
4.5	Eskalace ceny elektrické energie.....	40
4.6	Financování projektu.....	40
4.7	Vážená cena kapitálu.....	41
4.8	Ostatní náklady.....	41
4.9	Přiznaná dotace z programu Nová zelená úsporám.....	42
5	Ekonomické hodnocení variant.....	43
5.1	Cash flow	43
5.2	Diskontované a kumulované hotovostní toky.....	46
5.3	NPV.....	47
5.4	IRR	49
5.5	T_n a T_{nD}	50
5.6	Vyhodnocení výsledků.....	50
6	Citlivostní analýzy	52
6.1	Citlivostní analýza na diskont	52
6.2	Citlivostní analýza na inflaci	54
6.3	Citlivostní analýza na cenu elektrické energie	55
6.4	Citlivostní analýza na změnu spotřeby elektrické energie.....	56
6.5	Citlivostní analýza na eskalaci ceny elektrické energie.....	57
6.6	Citlivostní analýzy na úrok cizího kapitálu.....	58
6.7	Citlivostní analýza na podíl cizího kapitálu.....	59
6.8	Citlivostní analýza na výši počáteční investice.....	60
6.9	Shrnutí citlivostních analýz.....	62
	Závěr.....	63
	Literatura	66
	Přílohy	74
	Příloha A	74
	Příloha B	98
	Příloha C	98
	Příloha D.....	102

Seznam tabulek

1.1	Prokázané zásoby fosilních paliv z roku 2010 [32]	5
2.1	Výše podpory z programu Nová zelená úsporám pro rok 2021 [43]	8
3.1	Specifikace monokrystalického panelu Amerisolar 320 Wp [47].....	23
3.2	Výroba a spotřeba elektrické energie v zimním období	24
3.3	Výroba a spotřeba elektrické energie v jarním/podzimním období	25
3.4	Výroba a spotřeba elektrické energie v letním období	26
3.5	Specifikace PEM elektrolyzéru HOGEN HGS S 20 [44,57,72]	29
3.6	Specifikace tlakového zásobníku MyH2 900 [48].....	31
3.7	Specifikace palivového článku GreenHub 2 - 1000 [58].....	32
3.8	Specifikace tlakového zásobníku MyH2 300 [75].....	33
3.9	Specifikace baterie LG Chem Resu 10H [63]	34
3.10	Specifikace měniče Fronius PRIMO 4.6-1 [59]	36
4.1	Výpočet fixních a variabilních nákladů na elektrickou energii	39
4.2	Parametry hypotečního úvěru	41
5.1	NPV všech zkoumaných variant	47
5.2	Investiční náklady na jednu kilowatthodinu akumulární kapacity.....	48
5.3	IRR všech zkoumaných variant	49
5.4	T_n a T_{nD} všech variant projektu	50

Seznam obrázků

2.1	Princip elektrolýzy [10].....	11
2.2	Vliv změny teploty a tlaku na účinnost alkalické elektrolýzy [18].....	11
2.3	Princip PEM elektrolýzy [8].....	12
2.4	Energetické nároky na průběh vysokoteplotní elektrolýzy [15] (upraveno).....	13
2.5	Tlaková lahev, kterou lze napojit přímo na elektrolyzér [48].....	14
2.6	Nádoba na uskladnění tekutého vodíku [36]	15
2.7	Princip funkce palivového článku [37]	17
2.8	Porovnání účinnosti palivových článků s konvenčními zařízeními [37]	18
2.9	Schéma palivového článku PEMFC [37]	19
3.1	Lokalita rodinného domu spolu se směrovou růžicí [49,50] (upraveno)	21
3.2	Monokrystalický solární panel [65]	22
3.3	Graf spotřeby a výroby elektrické energie v rámci zimního dne.....	24
3.4	Graf spotřeby a výroby elektrické energie v rámci jarního/podzimního dne	25
3.5	Graf spotřeby a výroby elektrické energie v rámci letního dne	26
3.6	Schéma systému pro akumulaci přebytků z FVE do vodíku [42] (upraveno)	27
3.7	Metody výroby vodíku s jednotlivými podmínkami a účinnostmi [15].....	28
3.8	Souhrn palivových článků [39] (upraveno).....	31
3.9	Schéma systému pro akumulaci přebytků z FVE baterií [42] (upraveno)	34
4.1	Inflace v ČR od 1Q/2019 do 4Q/2022 [67]	38
5.1	Přehled hotovostních toků pro variantu 1A.....	43
5.2	Přehled hotovostních toků pro variantu 2A.....	44
5.3	Přehled hotovostních toků pro variantu 1B	44
5.4	Přehled hotovostních toků pro variantu 2B	45
5.5	Přehled hotovostních toků pro variantu 3	45
5.6	Průběh kumulovaného cash flow pro všechny varianty	46
5.7	NPV a IRR pro porovnávané varianty	49
6.1	Citlivostní analýza NPV na změnu diskontu	53
6.2	Citlivostní analýza NPV na změnu inflace.....	54
6.3	Citlivostní analýza NPV na změnu ceny elektrické energie	55
6.4	Citlivostní analýza NPV na změnu spotřeby elektrické energie	56
6.5	Citlivostní analýza NPV na změnu eskalace ceny elektrické energie	57
6.6	Citlivostní analýza NPV na změnu úroku cizího kapitálu.....	58
6.7	Citlivostní analýza NPV na změnu podílu cizího kapitálu na investici	59
6.8	Citlivostní analýza NPV na výši počáteční investice pro varianty s vodíkem.....	60
6.9	Citlivostní analýza NPV na výši počáteční investice pro varianty 2A, 2B a 3.....	62

Seznam použitých zkratek a symbolů

AEC		Alkaline Electrolysis Cell (alkalický elektrolyzér)
AFC		Alkaline Fuel Cell (alkalický palivový článek)
C		uhlík
$CDCF$	[CZK]	kumulvaný diskontovaný cash flow
CE		conformité européenne (shoda s požadavky EU)
CF		cash flow (hotovostní tok)
CF_t	[CZK]	cash flow v roce t
CO		oxid uhelnatý
CO ₂		oxid uhličitý
CZK		česká koruna
ČNB		Česká národní banka
ČR		Česká republika
ČVUT		České vysoké učení technické v Praze
d	[%]	daň z příjmu
D	[CZK]	objem cizího kapitálu
DCF_t	[CZK]	diskontovaný cash flow v roce t
DPH		daň z přidané hodnoty
E	[CZK]	objem vlastního kapitálu
E_{AT}	[J]	akumulovaná energie
E_{ND}	[J]	energie akumulovaná do dalšího dne
E_{NFVE}	[J]	energie nedodaná z FVE, tedy koupená z distribuční sítě
E_{SC}	[J]	celková spotřebovaná energie
E_{ST}	[J]	energie spotřebovaná v čase T
E_{VC}	[J]	celková vyrobená energie
E_{VS}	[J]	vyrobená energie, která je ihned spotřebována
E_{VT}	[J]	energie vyrobená v čase T
ERÚ		Energetický regulační úřad
EU		Evropská Unie
EUA		European Union Allowance (emisní povolenka)
EUA		European Union Aviation Allowance (emisní povolenka)
EUR		euro
FVE		fotovoltaická elektrárna
H		vodík
HTGR		High Temperature Gas Cooled Nuclear Reactor (vysokoteplotní plynem chlazený jaderný reaktor)
IRR		Internal Rate of Return (vnitřní výnosové procento)
KOH		hydroxid draselný
LiBH ₄		borohydrid lithný
m	[kg]	hmotnost
M_m	[kg·mol ⁻¹]	molární hmotnost
MCFC		Molten Carbonate Fuel Cell (palivový článek s uhlíčanovou taveninou)
MID		Measuring Instruments Directive (směrnice pro měřicí přístroje)

MPPT		Maximum Power Point Tracking (schopnost sledování bodu maximálního výkonu)
NaOH		hydroxid sodný
NASA		National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro letectví a vesmír)
NaY		zeolit
NPV		Net Present Value (čistá současná hodnota)
OZE		obnovitelné zdroje energie
p	[Pa]	tlak
p.a.		per annum
P_N	[W]	nominální výkon
P_t	[CZK]	příjem v roce t
PAFC		Phosphoric Acid Fuel Cell (palivový článek s kyselinou fosforečnou)
PEM		Proton Exchange Membrane (protonově výměnná membrána)
PEMFC		Proton Exchange Membrane Fuel Cell (palivový článek s protonově výměnnou membránou)
PVGIS		Photovoltaic Geographical Information System
r	[%]	diskont
R	[J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹]	molární plynová konstanta
r_d	[%]	náklady na cizí kapitál
r_e	[%]	náklady na vlastní kapitál
SOEC		Solid oxide electrolyser cell (elektrolyzér na bázi pevných oxidů)
SOFC		Solid Oxide Fuel Cell (palivový článek na bázi pevných oxidů)
T	[s]	čas
T_n	[s]	prostá doba návratnosti
T_{nD}	[s]	diskontovaná doba návratnosti
T_p	[s]	doba životnosti projektu
T_t	[K]	termodynamická teplota
USD		americký dolar
V	[m ³]	objem
V_t	[CZK]	výdaj v roce t
WACC	[%]	vážená cena kapitálu
η	[%]	účinnost
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota

Úvod

Ekologie je jedno z nejdůležitějších témat současnosti. Mnoho oborů je dnes regulováno různými nařízeními, která mají zmírnit jejich dopad na životní prostředí. Mezi takový obor spadá i samotná energetika, a tudíž je logické, že tlaky na zmírnění následků výroby elektrické energie jsou enormní. Jako příklad lze uvést klimaticko-energetický balíček, jenž byl uzákoněn v roce 2009. V rámci tohoto balíčku byly stanoveny 3 hlavní cíle – celkové snížení emisí skleníkových plynů o 20 % oproti úrovni z roku 1990, zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie (dále jen OZE) na 20 % z celkové produkce a zvýšení energetické účinnosti o 20 %. S pravděpodobností hraničící s jistotou lze očekávat, že snahy prosadit obnovitelné zdroje energie na úkor konvenčních zdrojů, jako jsou například uhelné elektrárny, budou do budoucna sílit. Z hlediska životního prostředí je tato skutečnost velmi pozitivní. Je však třeba vzít v úvahu, že Česká republika nemá v obnovitelných zdrojích energie zdaleka takový potenciál jako jiné státy EU (Norsko, Rakousko atd.). Po zvážení přírodních dispozic, které naše krajina má, je možné, že bude nutné investovat do OZE, které budou ekonomicky nevýhodné a budou vyžadovat značné dotace jak při výstavbě, tak při následném provozu. Tato skutečnost pravděpodobně citelně zvýší cenu elektrické energie pro konečné zákazníky. [1,2]

Pokud tento scénář opravdu nastane, mnoho lidí bude hledat levnější zdroj elektrické energie, který je zároveň ekologicky šetrný. Vzhledem k zeměpisným podmínkám ČR se jeví jako ideální zdroj malá fotovoltaická elektrárna (dále jen FVE) na střeše rodinného domu, a proto se touto, dnes nejrozšířenější, variantou domácí výroby elektrické energie v rámci této diplomové práce zabývám. Malá FVE skýtá několik výhod, z nichž nejdůležitější je především finanční úspora, energetická soběstačnost objektu, ohleduplnost k životnímu prostředí, dlouhá životnost elektrárny, nízké provozní náklady, poměrně snadná a rychlá instalace a také možnost získání dotace na výstavbu. Všechny tyto aspekty jsou velmi důležité při rozhodování, zda do projektu investovat či nikoliv.

V budoucích letech lze očekávat prudký nárůst počtu FVE především na střeších rodinných domů. Od roku 2016 je tento nárůst již pozorován a předpokládá se, že bude pokračovat i v letech příštích. Jedním z důvodů jsou ceny komponentů pro elektrárnu, neboť mezi lety 2010 a 2019 došlo k poklesu těchto cen o více než 80 %. Dalším důvodem je také vyšší bezpečnost a spolehlivost provozu. Během první vlny po ekonomické krizi v roce 2010 bylo mnoho FVE vyrobeno nekvalitně a hrozilo nezanedbatelné riziko požáru. To dnes již neplatí, provozovatelé mají k dispozici mnohem vyšší zabezpečení proti požáru a také kvalitní monitoring provozu. Důležitým aspektem pro nárůst počtu FVE jsou také dotační programy. Podrobněji se těmto dotacím věnuje kapitola 2.2. V současné době navíc poslanecká sněmovna ČR projednává novely energetického zákona a zákona o podporovaných zdrojích energie. Tyto novely by měly přinést další pozitivní změny, které udělají investici do FVE atraktivnější.

Elektrická energie je sama o sobě neskladovatelná komodita. To znamená, že elektrickou energii je nutné využít přesně v okamžiku její výroby. Pokud má být elektřina využita později ve vhodné dobu, je nutné ji akumulovat. Tato akumulace probíhá formou transformace elektrické energie na jinou formu energie, kterou lze nějakým způsobem uložit a následně využít. Takový proces značně zvýší energetickou soběstačnost objektu. Při výběru vhodné varianty akumulace je však nutné vzít v úvahu její ekonomickou náročnost, účinnost a reálné využití v daném projektu. Existuje několik možností, jak elektrickou energii akumulovat. V rámci této práce věnuji pozornost především akumulaci do vodíku. Aplikace tohoto způsobu akumulace přebytků

energie z FVE na střeše rodinného domu není dnes v reálných projektech prozatím prakticky vůbec využívána. Cílem práce je tedy provést průzkum trhu, zkoumat reálné využití aplikace vodíkové technologie do rodinného domu, na základě dat z celosvětového trhu stanovit kritéria ekonomické efektivity (NPV, IRR) a porovnat tuto technologii s dnes rozšířenou variantou akumulace do baterií. Hlavní přínos této diplomové práce tedy spočívá v prozkoumání trhu a s využitím dat získaných z praxe v posouzení technické proveditelnosti a ekonomické rentability aplikace vodíkového hospodářství k FVE na střeše rodinného domu. Model pro výpočet ekonomických kritérií je plně automatizovaný, lze tedy vložit vlastní vstupní data a model přepočítá výsledná kritéria pro nově vložená data.

Motivace a cíl práce

Základním problémem, který tato diplomová práce řeší, je zodpovězení otázky, zda je technicky proveditelné a ekonomicky rentabilní akumulovat přebytky energie z FVE na střeše rodinného domu do vodíku. Vzhledem ke skutečnosti, že vodíkové hospodářství ve spojení s obnovitelnými zdroji energie není v roce 2021 cenově konkurenceschopné v porovnání s ostatními běžně využívanými variantami akumulace přebytků, je důležitým výstupem této práce také porovnání s variantou akumulace do baterií a variantou prodeje přebytků energie z FVE do distribuční sítě, neboť tyto metody nakládání s přebytky jsou dnes poměrně rozšířené. Porovnání projektů z hlediska investora je provedeno na základě výpočtu kritérií ekonomické efektivity, konkrétně čisté současné hodnoty NPV (Net Present Value) a vnitřního výnosového procenta IRR (Internal Rate of Return). Jako pomocné ekonomické ukazatele jsem využil prostou dobu návratnosti T_n a diskontovanou dobu návratnosti T_{nD} . Po porovnání výstupů pro zkoumané varianty je možné diskutovat potenciální výši dotace na vodíkovou technologii či jiný způsob financování, aby došlo k snížení počáteční investice a akumulace do vodíku byla ekonomicky smysluplná pro běžného člověka. Zároveň jsem zodpověděl otázku, která z porovnávaných možností dává větší smysl pro dlouhodobou akumulaci a která spíše pro krátkodobou, a tato tvrzení jsem podložil relevantními výpočty. Vytvořil jsem tedy celkem 5 variant projektu. Varianta 1A využívá akumulaci do vodíku na delší dobu (akumulováno je tedy větší množství energie), varianta 2A využívá krátkodobější akumulaci, varianta 1B se zaměřuje na využití dlouhodobější akumulace do baterií, varianta 2B potom na krátkodobější akumulaci do baterií a nakonec varianta 3 počítá s prodejem veškerých přebytků do sítě. V rámci diskuze ohledně výše podpory je nutné vzít v úvahu i ekologický aspekt problému, neboť akumulace do lithiových baterií má na životní prostředí větší dopad, především kvůli těžbě a následné likvidaci lithia, než ekologicky čistší akumulace do vodíku.

Vyřešení této otázky je důležité v rámci České republiky i celého světa. Geografická poloha a přírodní podmínky nedovolují v rámci ČR produkovat na celostátní úrovni takové množství elektrické energie z obnovitelných zdrojů jako například v sousedním Rakousku, proto je důležitá domácí výroba. Ekologický aspekt výroby elektrické energie z OZE je již zohledněn ve státní podpoře v rámci programu Nová zelená úsporám. Podpora akumulace čistě vyrobené energie do vodíku by však prozatím musela být nastavena na podstatně vyšší úroveň, protože se jedná o technologii nerozšířenou na trhu. Z tohoto důvodu je technologie v dnešní době drahá, neboť na trhu chybí konkurence, která by cenu komponentů systému pro akumulaci elektrické energie do vodíku snížila. Toto snížení lze však důvodně očekávat v budoucích letech vzhledem k předpokládaným rozsáhlým investicím především ze strany Evropské unie. Problém akumulace do vodíku je velmi důležitý i v celosvětovém měřítku, neboť se jedná o naprosto ekologicky čistý způsob ukládání energie pro pozdější využití.

Nejprve jsem v kapitole 1 krátce rozebral vývoj vodíkové technologie v minulých letech a také predikce ohledně vývoje budoucího. Následně jsem v rámci kapitoly 2 analyzoval současný stav, tedy jaké technologie elektrolyzátorů, zásobníků vodíku a palivových článků jsou na dnešním trhu k dispozici. Na základě rešeršní činnosti jsem stanovil parametry jednotlivých technologií a dle těchto parametrů jsem byl schopen zvolit, která technologie je nejvhodnější pro aplikaci ve spojení s FVE. Samotným cílem této práce je následně průzkumem trhu získat dostatečné množství dat, abych byl schopen provést objektivní výpočet kritérií ekonomické efektivity. Jedná se o data technická, zejména účinnost zařízení, energetická spotřeba, náklady na provoz a doba životnosti, a ekonomická, tedy cena daného zařízení. Dle dispozic

zkoumaného rodinného domu jsem vypočítal optimální velikost FVE, která by mohla být umístěna na jeho střeche. Na základě odborného odhadu spotřeby elektrické energie domácnosti a výroby elektrické energie FVE jsem stanovil parametry, které musí splňovat jednotlivé komponenty systému. K těmto konkrétním zařízením jsem průzkumem především zahraničního trhu získal data nezbytná pro výpočty, těmto datům se věnuje kapitola 3. V kapitole 4 jsem stanovil zjednodušující předpoklady, které jsem před samotným výpočtem přijal. Prostor jsem věnoval také stanovení vstupních ekonomických parametrů, které ovlivňují kritéria ekonomické efektivity. Jedná se především o inflaci, diskont nebo eskalaci ceny elektrické energie.

V kapitole 5 diplomové práce jsem zpracoval samotný výpočet NPV, IRR a ostatních ekonomických kritérií pro varianty akumulace přebytků elektrické energie do vodíku, do klasických baterií a také pro prodej přebytků do distribuční sítě. Vytvořil jsem citlivostní analýzy, které zhodnotily, jaké parametry jsou pro rentabilitu projektu zásadní, tedy že mohou změnit rozhodnutí, zda investici provést či nikoliv. Diskutoval jsem také minimální výši státní podpory, která by byla pro momentální využití vodíkového hospodářství nezbytná, a navrhnul jsem způsob komunitního financování, který by počáteční investici snížil. Citlivostním analýzám se věnuje kapitola 6.

Pro důkladnější proniknutí do problematiky vodíkového hospodářství jsem také zpracoval rešeršní práci, která teoreticky popisuje akumulaci do vodíku. Tento text je součástí diplomové práce pod názvem Příloha A – Úvod do problematiky akumulace do vodíku. Jedná se o text s doplňujícími informacemi o technologii. Tyto informace pomohou čtenáři proniknout hlouběji do problematiky akumulace do vodíku, avšak stěžejní text je obsahem samotné diplomové práce.

Veškeré výpočty využití v rámci studie jsou taktéž obsaženy v přílohách, konkrétně se jedná o Přílohu B – Výpočty k akumulaci do vodíku.

Příloha C obsahuje řezy a plány rodinného domu a především střechy, na kterou jsou fotovoltaické panely instalovány.

V Příloze D čtenář nalezne kalkulaci k financování cizím kapitálem od finančního poradce.

Kapitola 1

Rozvoj akumulace do vodíku

Vodík je bezesporu velmi slibnou technologií do budoucna. Vzhledem k značně omezeným zásobám fosilních paliv je zřejmé, že obnovitelné zdroje (spolu s jadernými elektrárnami, které však nejsou předmětem této práce), budou muset v příštích desítkách let zaujmout hlavní roli v celém energetickém odvětví. Aby to bylo možné, je nezbytně nutné, aby existoval ekologicky čistý a ekonomicky efektivní způsob, jak energii z OZE akumulovat. V následující tabulce jsou zobrazeny prokázané zásoby fosilních paliv z roku 2010.

Tab. 1.1: Prokázané zásoby fosilních paliv z roku 2010 [32]

Palivo	Zásoby [-]	Energie v zásobách [ZJ]	Těžba v roce 2010 [-]	Těžba v roce 2010 [ZJ]	Zásoby [roky]
Uhlí	861 miliard tun	21,5	7,3 miliard tun	0,18	119
Zemní plyn	187 bilionů m ³	7,8	3,2 bilionů m ³	0,13	58
Ropa	1 526 miliard barelů	9,7	30 miliard barelů	0,19	51
Celkem	-	39	-	0,5	78

Než se celé vodíkové hospodářství dostalo na úroveň dnešní doby, předcházely tomu desítky let vývoje, výzkumu a objevování. V moderní době, která je ve znamení ekologické šetrnosti, se vodík jeví jako ideální příležitost, neboť potenciál této technologie je obrovský. Vzhledem k tomuto potenciálu je již dnes čistý vodík součástí strategií do budoucích let a desetiletí. V následujících kapitolách tedy krátce rozebírám jak minulý vývoj, tak očekávané budoucí zastoupení vodíku v průmyslu a energetice.

1.1 Minulý vývoj vodíkové technologie

Vodík jako takový je znám již velmi dlouhou dobu. Až v roce 1932 byl však objeven první stabilní izotop, deuterium. O dva roky později, v roce 1934, byl oznámen objev i nestabilního izotopu vodíku, takzvaného tritia. [32]

První zmínky o pozorování fenoménu elektrolýzy vody pochází z roku 1789. Průkopníky v oboru elektrolýzy vody jsou Nicholson a Carlisle. Na počátku první průmyslové revoluce v roce 1800 objevili tito dva vědci skutečnost, že vodu lze rozložit na vodík a kyslík. O přibližně 100 let později, v roce 1902, bylo v provozu již 400 jednotek na elektrolýzu vody a v roce 1939 bylo zprovozněno první velké výrobní zařízení, které dokázalo produkovat až 10 000 Nm³ vodíku za hodinu. Následoval rok 1948, jenž se zapsal do dějin jako rok vzniku prvního přetlakového elektrolyzátoru. Tento elektrolyzátor vymyslel a sestavil profesor Zdansky. Další vývoj byl již poměrně rychlý, v roce 1966 byl vyvinut první elektrolytický systém s pevným polymerem a v roce 1972 pak proběhla první elektrolýza vody s pevným oxidem. Počátky pokročilé alkalické elektrolýzy se datují do roku 1978. Tím započala elektrolýza vody tak, jak je z velké části známa

v dnešní době. Momentálně dochází ke zdokonalování starších technologií spolu s vyvíjením technologií nových, za zmínku stojí protonově výměnné membrány využívané pro moderní jednotky na elektrolýzu. Tento typ membrány byl vyvinut společností ABB ve Švýcarsku mezi lety 1976 a 1989, avšak k rozmachu této technologie a jejímu rozšířenějšímu využití v praxi dochází až v posledních letech. [6,14]

Spolu s výrobou vodíku byly objeveny i nové formy jeho uskladnění. Mimo již známého skladování ve formě stlačeného plynu se začalo využívat i zkapalnění vodíku. První vodík byl zkapalněn v roce 1898. Tento úspěch si připsal skotský chemik James Dewar. [31]

Technologie spalování vodíku ve speciálních spalovacích motorech je poměrně dlouho zkoumaná. Výzkumné centrum spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka při Fakultě strojní ČVUT se podílí na výzkumu této technologie již od roku 1978. Rok 1998 byl prvním rokem projektu s názvem Vodíkový motor jako budoucí pohon automobilů. Na tomto projektu spolupracovala s ČVUT i Technická univerzita v Liberci. Nejen díky tomuto výzkumu, ale také kvůli dalším důležitým projektům, se stala technologie spalování vodíků poměrně rozšířenou v průmyslu. [40]

Historie palivových článků sahá až do roku 1839. V tomto roce vytvořil první prototyp britský vědec sir William Robert Grove. Tento prototyp sestával z platinových elektrod, které byly ponořeny do kyseliny sírové. Ta plnila funkci elektrolytu. Termín palivový článek však byl použit až o 50 let později, pronesli ho vědci Ludwig Mond a Charles Langer. První úspěšné zařízení s palivovým článkem vyrobil v roce 1932 Francis Thomas Bacon. Původní kyselý elektrolyt tento vědec nahradil zásaditým. V šedesátých letech 20. století byly již palivové články využívány pro vesmírné moduly agenturou NASA. [37]

1.2 Očekávaný budoucí vývoj

Mnoho států již vyjádřilo příslib podpory vodíkových technologií. Aby tyto sliby však bylo možné dodržet, je nezbytně nutné, aby investiční náklady na tuto technologii poklesly. Cestou k výraznějšímu využívání vodíku je tedy zvýšení účinnosti elektrolyzérů a palivových článků, zvýšení životnosti jednotlivých komponent a zjednodušení designu a výroby, aby byly drahé materiály při výrobě používány co nejméně. Dle studie z března 2021 je reálné, aby v krátkodobém horizontu klesly investiční náklady na technologie přibližně o celých 40 %, v dlouhodobém horizontu dokonce o 80 %. Dobrou zprávou je, že v posledních letech dochází k poklesu ceny zelené energie (ze solární a větrné energie). Ještě lepší zprávou pak je, že stejný trend odborníci očekávají i do let budoucích. Právě zelená energie má být pilířem pro využití vodíku v energetice, neboť akumulace vodíku vyřeší problém s tím, že výroba zelené energie je závislá pouze na počasí, je nepředvídatelná a v praxi tedy dochází k výrobě často v době, kdy na tuto energii není adekvátní poptávka. Příkladem se snaží jít Evropská Unie a Chile. Tyto celky mají za cíl instalaci několika desítek GW elektrolyzérů v příštích několika letech. Protože politika EU ohledně vodíku je velmi důležitá a přímo se České republiky dotýká, věnují ji samostatný prostor dále v této kapitole. [78]

Využití vodíkové technologie je zásadně zakomponováno v Zelené dohodě pro Evropu. Dle plánů Evropské komise by měly do roku 2050, který je posledním rokem výše zmíněné Zelené dohody, dosáhnout kumulativní investice do výroby vodíku z obnovitelných zdrojů 180 až 470 miliard €. Další investice ve výši 3 až 18 miliard € jsou plánovány na podporu výroby nízkouhlíkového vodíku z fosilních paliv. Důležitý je také fakt, že vznikem kompletního řetězce v oblasti vodíkové technologie by měl vzniknout až jeden milion pracovních míst. Dle odhadů analytiků Evropské komise by po úspěšném dokončení Zelené dohody měl čistý vodík pokrýt až

24 % celosvětové spotřeby energie. Tato hodnota by znamenala, že roční prodej vodíku by dosahoval až 630 miliard €. Zelená dohoda je rozdělena do tří fází rozvoje hospodářství založeného na čistém vodíku. [30]

1.2.1 První fáze

První fáze je plánována mezi lety 2020 a 2024. Jejím cílem je především dekarbonizovat stávající výrobu vodíku, tedy snížit poměr vodíku vyrobeného z fosilních paliv. Součástí plánu je také podpora nových možností použití. Základem této fáze je instalace 6 GW elektrolyzérů vodíku z OZE. Ty by měly vyrobit až milion tun vodíku z obnovitelných zdrojů energie během první fáze projektu. Momentálně je v EU již nainstalován 1 GW elektrolyzérů. [30]

1.2.2 Druhá fáze

Tato fáze bude probíhat od roku 2024 do roku 2030. Cílem této fáze je instalovat minimálně 40 GW elektrolyzérů. Ty dle plánů vyrobí 10 milionů tun vodíku. Vodík v této fázi již nebude využíván pouze v chemickém průmyslu (dnes je při výrobě amoniaku a methanolu využíván vysokouhíkový vodík), ale rozšíří se i na další odvětví průmyslu a dopravy. Za zmínku stojí ocelářství (zde má vodík potenciál položit základ výroby oceli s nulovými emisemi) a nejen nákladní automobilová, ale také námořní a železniční doprava. [30]

1.2.3 Třetí fáze

V rámci poslední fáze, která končí rokem 2050 a začíná v roce 2030, bude vodík již zaveden ve všech odvětvích, kde byla doposud dekarbonizace velmi obtížná. Celková vyspělost vodíkového hospodářství bude na vysoké úrovni. Prostřednictvím výroby syntetického kapalného leteckého petroleje pomocí vodíku také bude dekarbonizována letecká doprava. [30]

Kapitola 2

Analýza současného stavu

Vodík v roce 2021 zatím není v porovnání s ostatními palivy konkurenceschopný. Při vzájemném porovnání různých způsobů výroby vodíku je patrné, že vodík z obnovitelných zdrojů energie ani vodík z fosilních paliv se zachycováním uhlíku není konkurenceschopný vodíku vyrobeného klasickým způsobem z fosilních paliv. Průměrné náklady v EU vynaložené na výrobu jednoho kilogramu vodíku jsou v případě výroby z fosilních paliv 1,5 €, v případě výroby z fosilních paliv se zachycováním uhlíku minimálně 2 € a v případě výroby z OZE dokonce 2,5 až 5,5 € v závislosti na využitém zdroji a na přírodních podmínkách jednotlivých států EU. Do těchto nákladů navíc nejsou započteny náklady na CO₂. Dobrou zprávou pro vodíkové hospodářství však jsou rychle se snižující náklady. Za posledních 10 let došlo ke snížením nákladů na elektrolyzéry o 60 %, za dalších 10 let by dle odhadů měly klesnout na polovinu současné hodnoty. Pozitivní je také informace, že jsou již zavedeny normy ohledně bezpečnosti nakládání s vodíkem. Mimo jiné je již z části připravena infrastruktura pro transport vodíku, neboť je postaveno přes 1 500 km potrubí, které je vyhrazeno právě pro přepravu tohoto paliva. [30]

2.1 Nová zelená úsporám

Důležitým dotačním programem, který momentálně funguje na českém trhu, je Nová zelená úsporám. Výše dotace se liší dle typu fotovoltaického systému a jeho velikosti. V následující tabulce je souhrn částek, které lze pro daný typ systému využít, s platností pro rok 2021.

Tab. 2.1: Výše podpory z programu Nová zelená úsporám pro rok 2021 [43]

Typ systému	Výše podpory [CZK]
Solární termický systém pro přípravu teplé vody	35 000
Solární termický systém pro přípravu teplé vody a přitápění	50 000
FV systém pro přípravu teplé vody s přímým ohřevem	35 000
FV systém bez akumulace s tepelným využitím přebytků (celkový využitelný zisk > 1 700 kWh·rok ⁻¹)	55 000
FV systém s akumulací (celkový využitelný zisk > 1 700 kWh·rok ⁻¹)	70 000
FV systém s akumulací (celkový využitelný zisk > 3 000 kWh·rok ⁻¹)	100 000
FV systém s akumulací (celkový využitelný zisk > 4 000 kWh·rok ⁻¹)	150 000
FV systém efektivně spolupracující se systémem vytápění a přípravy teplé vody s tepelným čerpadlem	150 000
FV systém bez akumulace s tepelným využitím přebytků (celkový využitelný zisk > 3 000 kWh·rok ⁻¹)	80 000

Kromě této podpory je možné využít i dotaci na zpracování odborného posudku ve výši 5 000 CZK. V případě projektu v rámci diplomové práce však vzhledem k poloze zkoumaného objektu na Vysočině není možné využít další potenciální zvýhodnění pro žadatele

z Ústeckého, Karlovarského a Moravskoslezského kraje. Taktéž nelze využít zvýhodnění pro majitele památkově chráněných objektů. [44]

Program Nová zelená úsporám je financován z výnosů prodeje emisních povolenek EUA (European Union Allowance) a EUAA (European Union Aviation Allowance). Hlavním cílem tohoto programu je zlepšit stav životního prostředí tím, že dojde ke snížení produkce skleníkových plynů a také k úspoře energie v konečné spotřebě. [44]

K přiznání dotace je zapotřebí splnit několik důležitých podmínek. Ty popíšu v následujících bodech:

- Žadatelem může být právnická i fyzická osoba, která je vlastníkem rodinného domu. Jelikož investor je současně vlastníkem domu, tato podmínka je splněna.
- Minimálně 50 % podlahové plochy je určeno k trvalému bydlení a dům musí být zapsán v katastru nemovitostí. Vzhledem ke skutečnosti, že v domě jsou dvě bytové jednotky, je tato podmínka splněna. [77]
- Rodinný dům nesmí mít více než tři samostatné bytové jednotky a ne více než dvě nadzemní podlaží, jedno podzemní podlaží a podkroví. Tato podmínka je splněna, neboť dům obsahuje dvě bytové jednotky, jedno podkroví a jedno podzemní podlaží, kde je umístěn sklep. [77]
- Celková výroba FVE nesmí přesahovat stávající spotřebu objektu. Jak je uvedeno níže v textu, výroba fotovoltaické elektrárny pokrývá celoroční spotřebu domu přibližně z 50 %. Tato podmínka je také splněna. [77]
- Rodinný dům, na kterém má být elektrárna umístěna, nesmí být v exekuci. Také tato podmínka je splněna. [77]
- Pro žádost o dotaci na hybridní systém s baterií, který je využíván v rámci varianty 2A a 2B, navíc zákon předepisuje podmínku na minimální kapacitu baterie. Ta musí činit nejméně 1,25násobek výkonu fotovoltaických panelů. V obou případech je tato podmínka též splněna. [77]
- Varianta 3 však nepočítá s akumulací. Vzhledem k této skutečnosti se objevuje další podmínka, že pro přiznání dotace je nutné spotřebovat minimálně 70 % vyrobené elektrické energie. Z výpočtů v Příloze B na listu Model – V3 však vyplývá, že spotřebováno bude pouze přibližně 61 % energie ročně. Zbylých 39 % energie bude prodáno do distribuční sítě. V tomto případě tedy podmínka splněna není a dotace pro tuto variantu přiznána být nemůže.

Vzhledem ke splnění podmínek výše lze očekávat, že dotace bude investorovi přiznána. Čekací doba na vyplacení se pohybuje od dvou týdnů do tří měsíců od dokončení díla. V rámci modelu bude tedy dotace započítána do prvního roku projektu. Současně platí, že příjemce dotace je povinen zachovat účel používání předmětu dotace po stanovenou dobu udržitelnosti, která činí 10 let ode dne vydání registrace a rozhodnutí o přidělení dotace. [77]

2.2 Legislativa

Výstavba fotovoltaické elektrárny na střechu rodinného domu se řídí zákonem č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu. Tento zákon je znám pod názvem Stavební zákon. Stavba neleží v chráněné krajinné oblasti či památkové zóně a energie vyrobená elektrárnou bude využita pro vlastní spotřebu. Nejedná se tedy o výrobu elektrické energie, ale o technické zařízení dané budovy. Instalace fotovoltaických panelů dle § 79 odstavce

6 stavebního zákona nevyžaduje územní řízení (schvalovací proces, který řeší umístění staveb na daném pozemku a v daném území). FVE také splňuje následující podmínky:

- Stavebními úpravami se nezasahuje do nosných konstrukcí stavby.
- Nemění se vzhled stavby ani způsob užívání stavby (panely kopírují rovinu střechy, nejsou v žádném místě podepřené a budovu v žádném místě nepřevyšují).
- Nevyžaduje se posouzení vlivů na životní prostředí.
- Provedení nemůže negativně ovlivnit požární bezpečnost stavby.

Z toho důvodu není vyžadováno dle § 103 odst. 1 písm. d) stavebního zákona stavební povolení ani ohláška. Tyto dokumenty nejsou vyžadovány také z důvodu, že výkon elektrárny nepřesahuje 20 kWp. [52]

Pro malé FVE s výkonem nepřesahujícím 10 kWp není vyžadována licence dle novely energetického zákona č. 131/2015 Sb. Tuto licenci poskytuje Energetický regulační úřad (dále ERÚ). Provozovatel takové elektrárny bez licence se navíc nestává podnikatelem. [53]

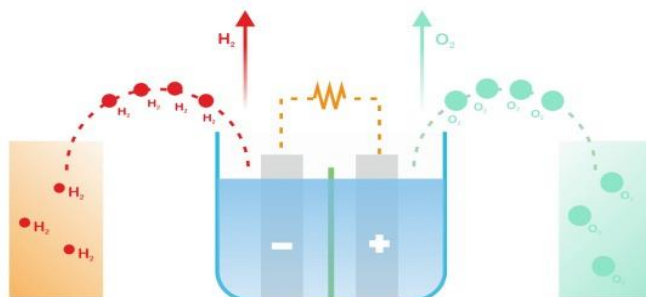
Připojením elektrárny do sítě se zabývá vyhláška ERÚ o podmínkách připojení k elektrizační soustavě č. 16/2016 Sb. Jednou z podmínek pro připojení do sítě je zamezení přetokům do sítě. Toho v tomto případě docílím využitím wattrouteru. Vzhledem k nízkému výkonu FVE také není nutné platit daň z elektrické energie. Ta by musela být placena až při výkonu nad 30 kWp. [54]

2.3 Současný stav elektrolýzy vody

Elektrolýza vody je proces, při kterém vzniká vodík. Vodík je možné vyrábět i z fosilních paliv, ovšem v rámci toho dochází k značným emisím skleníkových plynů. Výroba vodíku z fosilních paliv je nazývána reforming a vzhledem k jeho samotné podstatě je zřejmé, že pro využití v kombinaci s OZE není tento způsob na rozdíl od elektrolýzy vody využitelný. Pro elektrolýzu vody je však nutné dodat v porovnání s reformingem mnohem větší množství energie. To dělá z elektrolýzy vody energeticky, a tedy i ekonomicky, podstatně náročnější metodu přípravy vodíku. To je hlavní důvod, proč je tímto způsobem prozatím vyrobeno pouze 2 % vodíku. Toto řešení se však jeví jako ideální pro případ akumulace přebytků z obnovitelných zdrojů energie, neboť fotovoltaické, na něž se tato práce zaměřuje, ale i větrné a vodní elektrárny vyrábí elektřinu často v době, kdy ji spotřebitel není schopen využít. Vznikají tedy přebytky, které se buď musí mařit (což je samozřejmě neekologické i neekonomické řešení) nebo akumulovat. Tyto přebytky se dají skvěle využít právě pro elektrolýzu vody na vodík. Kvůli vhodnému napojení na obnovitelné zdroje energie je tento způsob přípravy pro projekt diplomové práce zcela zásadní. Absolutně největší výhodou tohoto způsobu výroby je bezesporu ekologická stránka. Při přípravě vodíku touto metodou nedochází ke vzniku emisí, kromě vodíku vzniká pouze jako vedlejší produkt kyslík. Právě tato skutečnost dělá z vodíku palivo budoucnosti jak pro energetiku, tak pro automobilový průmysl. [5,11,16]

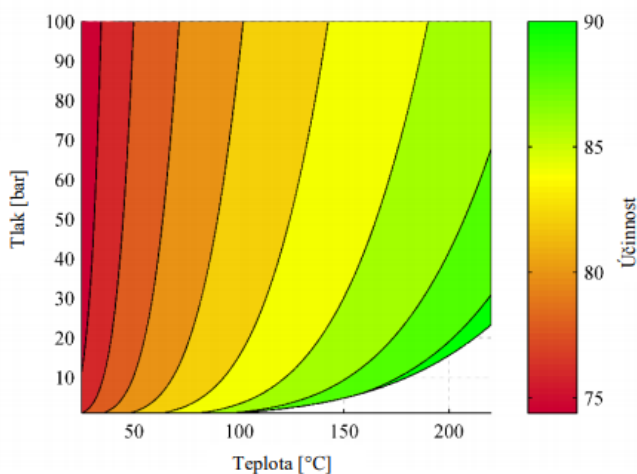
Vodík však lze vyrábět i jiným způsobem než využitím elektrolýzy nebo parního reformingu. Existuje možnost využití parciální oxidace odpadní biomasy. Výroba vodíku z biomasy je však značně omezena vzhledem ke kapacitě zdrojů. Pro Českou republiku platí, že lze díky značné kapacitě využít pro výrobu vodíku v podstatě pouze řepkový šrot či odpad z těžby dřeva. Této tématice není třeba věnovat rozsáhlejší prostor, neboť není záběrem diplomové práce, krátké pojednání však obsahuje Příloha A. [21,22]

Elektrolýza je proces, při kterém je stejnosměrný elektrický proud přiveden na elektrody, aby procházel vodným roztokem a štěpil tak chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem. Na následujícím obrázku je znázorněn princip průběhu elektrolýzy a vznik molekul vodíku a kyslíku. [12]



Obr. 2.1: Princip elektrolýzy [10]

Z vody vzniká kyslík a vysoce čistý vodíkový plyn. Účinnost elektrolýzy vody se pohybuje v rozmezí od 80 % do 92 %, přičemž účinnost procesu ovlivňuje několik vnějších podmínek. Nejvíce je elektrolýza ovlivněna teplotou a tlakem. Obecně platí, že se zvyšující se teplotou účinnost roste. Naopak s rostoucím tlakem dochází k poklesu účinnosti, neboť je zapotřebí dodat větší množství energie. Na obrázku 2.2 je znázorněn současně vliv teploty a tlaku na účinnost elektrolýzy vody. [5,12]



Obr. 2.2: Vliv změny teploty a tlaku na účinnost alkalické elektrolýzy [18]

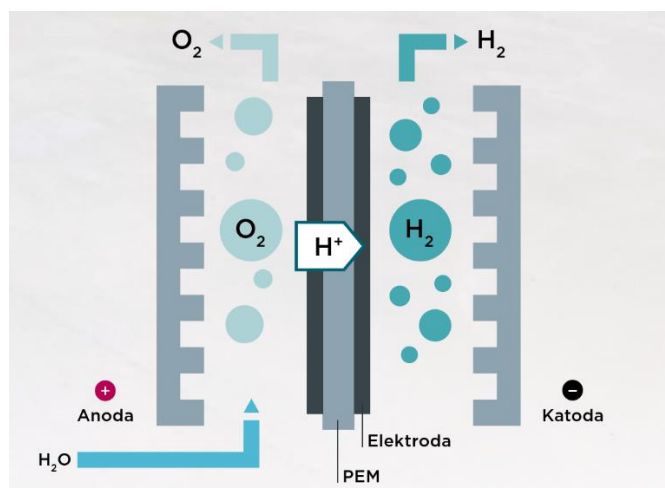
Nyní je třeba zaměřit se na jednotlivé způsoby elektrolýzy vody. V dnešní době se využívají zejména tři metody. Alkalická elektrolýza, PEM elektrolýza a vysokoteplotní elektrolýza. Průmyslově nejvíce využívaná je alkalická elektrolýza vzhledem k nízkým provozním a investičním nákladům. Další dvě metody jsou poměrně nové. Především PEM elektrolýze však je věnován podstatný prostor, jelikož se jedná o metodu, která je využita pro praktickou část této práce, neboť její parametry se jeví jako ideální pro použití v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie. Podrobnější informace o jednotlivých metodách jsou v následujících odstavcích. [14]

2.3.1 Alkalická elektrolyza (AEC)

Jedná se o průmyslově nejvyužívanější metodu elektrolyzy vody. Alkalická elektrolyza je v průmyslovém měřítku využívána i v modulech o výkonech v řádu MW. Protože samotná voda nedisponuje dostatečnou vodivostí, je nutné využít dalších sloučenin, které vlastnosti elektrolytu zlepší. Vzhledem k vyšší účinnosti je více využíván roztok hydroxidu draselného o koncentraci 25-30 %, přičemž účinnost elektrolyzy při využití KOH dosahuje 90,25 %. Při využití hydroxidu sodného, který je také často užíván, klesá účinnost v závislosti na velikosti systému až na 83,33 %. Teplota elektrolytu je udržována na 90 °C. Potenciál využití do budoucích technologií je však značně omezen nižší celkovou účinností výroby vodíku a také omezenou schopností systému pracovat při proměnlivém výkonu. Právě toto omezení je nejzásadnější pro aplikaci k FVE, neboť práce při proměnlivém výkonu je běžně vyžadována ve spojení s obnovitelnými zdroji. [13,15,18,19]

2.3.2 PEM elektrolyza

Tato metoda nízkoteplotní elektrolyzy vody využívá pevný elektrolyt s protonově výměnnou membránou (anglicky Proton Exchange Membrane, odtud zkratka PEM). Na obrázku 2.3 je znázorněn princip této technologie:



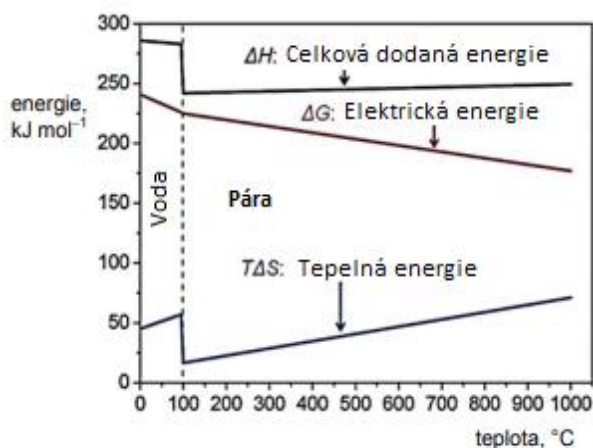
Obr. 2.3: Princip PEM elektrolyzy [8]

Z obrázku výše plyne skutečnost, že elektrolyt se nachází pouze na jedné straně membrány, konkrétně na straně anody. Na rozdíl od alkalické elektrolyzy použití protonově výměnné membrány umožňuje využít jako elektrolyt pouze čistou vodu. Odpadají tedy vysoké nároky a náklady na materiál oběhové soustavy a i samotný hydroxid, který bylo nutné do elektrolytu přidávat. PEM technologie umožňuje dosažení mnohem vyšší proudové hustoty. Katoda je vytvořena pórovitým grafitem, přičemž jako katalyzátor je využita platina. Právě tato skutečnost způsobuje, že PEM elektrolyza je prozatím podstatně dražší než klasická alkalická elektrolyza. Mezi výhody této technologie však patří větší bezpečnost a spolehlivost (vzhledem k absenci žíravého roztoku, který v případě alkalické elektrolyzy cirkuluje oběhem), odolnost materiálu membrány proti velmi vysokému tlaku, aniž by ztratil schopnost účinně zabránit míchání plynů, a v neposlední řadě i skutečnost, že materiály o tloušťce několika málo milimetrů dokáží pracovat s proudovou hustotou až jednotky ampér na centimetr čtvereční. S tím je však spojena velká spotřeba elektrického proudu (hodnota spotřebovaného proudu v případě alkalické elektrolyzy je však také vysoká). Nejdůležitější výhodou použití této metody

v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie je však jednoznačně schopnost elektrolyzáru pracovat v intervalu od 0 % do 100 % nominálního výkonu P_N . Právě z tohoto důvodu jsem zvolil PEM elektrolyzáru jako ideální variantu pro model v rámci diplomové práce. [8,14,15]

2.3.3 Vysokoteplotní elektrolyza (SOEC)

Jak již název napovídá, aby tato elektrolyza proběhla, je nutné dosáhnout poměrně vysoké teploty. Ideálně je třeba docílit teploty 700-1000 °C. Vzhledem k takto vysoké teplotě však není nutné využít katalyzátor z platinových kovů jako v případě PEM elektrolyzy, což znamená výrazné snížení nákladů na provoz. V porovnání s dvěma výše popsanými metodami elektrolyzy tato spotřebuje mnohem méně elektrického proudu, díky čemuž dosahuje vysokoteplotní elektrolyza účinnosti kolem 92 %. Energie dodávaná do systému je tedy kombinací elektrické energie a tepelné energie, přičemž tepelná energie tvoří přibližně 30 % z celkové dodané energie. Platí pravidlo, že se zvyšující se teplotou se zvyšuje i celkové množství energie, které je třeba soustavě dodat. Zároveň však platí, že se zvyšující se teplotou klesá potřeba elektrické energie a roste potřeba tepelné energie. Tato situace je znázorněna na následujícím obrázku: [14,17]



Obr. 2.4: Energetické nároky na průběh vysokoteplotní elektrolyzy [15] (upraveno)

Právě tepelná energie je mnohem levnější než elektrická. Navíc vysoká teplota urychlí proces reakce, což sníží ztrátu energie, která by byla vynaložena na polarizaci elektrod.

Vysokoteplotní elektrolyza je považována za metodu budoucnosti při využití kogenerace. Konkrétně se jedná o propojení této elektrolyzy s jaderným reaktorem HTGR (High Temperature Gas Cooled Nuclear Reactor) nebo s koncentrační solární elektrárnou. To je však již mimo tematický záběr této práce. [14,15]

2.4 Zásobník na vodík

V předchozí kapitole jsem podal informace ohledně výroby vodíku. Nyní je třeba rozebrat podrobněji další část cyklu vodíkové technologie, a to uskladnění vyrobeného vodíku. Kvalitní uskladnění umožňuje uchovat energii tohoto plynu na pozdější použití. Vyřešení otázky, jak plyn uchovat, je pro celý systém akumulace energie do vodíku naprosto zásadní. Důležitá je vzhledem ke skutečnosti, že vodík tvoří v chemické reakci se vzduchem velmi hořlavou směs, bezpečnost jeho skladování. To musí být nejen bezpečné, ale zároveň

i energeticky efektivní, aby nedocházelo k nežádoucím únikům plynu, a samozřejmě také ekonomicky dostupné. Z podstaty vodíku jako prvku vyplývá, že je možné ho skladovat jak v plynném, tak v kapalném skupenství. Vodík je při velmi nízkých teplotách pevný. Jeho hustota v tomto stavu je $70,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V tomto stavu však v praxi vodík uchovávat nelze, neboť dosáhnout takových vnějších podmínek je prakticky nemožné. Kapalný vodík ovšem vytvořit lze. Aby tento plyn zkapalněl, je nutné, aby teplota byla mezi 21,2 K a 32,0 K. Při vyšších teplotách je již vodík plynný. Základem skladování je zmenšení objemu vodíku. Jeden kilogram vodíku za standardních atmosférických podmínek má objem 11 m^3 . Existuje několik způsobů, jak docílit zvýšení hustoty vodíku v zásobníku, přičemž každý způsob vyžaduje nemalou energii. Plyn může být buď stlačen, nebo lze snížit teplotu pod kritický bod. Obě varianty samozřejmě skýtají jisté výhody a nevýhody, které je nutné definovat a náležitě popsat. Pro skladování vodíku platí, že jisté metody jsou více využívány a jiné méně. V následujících kapitolách tedy rozeberu ty, které jsou pro dnešní aplikace důležité. [23]

2.4.1 Zásobníky na plynný vodík

Zásobníky na stlačený plynný vodík jsou dnes nejběžnějším typem zásobníků. Maximální tlak v klasických nádobách dosahuje až 20 MPa, ovšem nový typ kompozitních nádob vydrží tlak i 80 MPa. Při takovém tlaku již vodík dosahuje hustoty $36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je přibližně polovina hustoty tekutého vodíku. Je zřejmé, že takto stlačený plyn může znamenat nemalé bezpečnostní riziko, zejména pokud je uskladněn v obydlených oblastech. Proto jsou zásobníky vyrobeny ze tří vrstev materiálů. Vnitřní polymerní vrstva je obalena kompozitní vrstvou vyrobenou z uhlíkových vláken, která odolává dlouhodobému namáhání. Vše obklopuje ještě vnější vrstva z aramidu, což je pevný žáruvzdorný syntetický materiál. Tato vrstva je schopná ochránit nádobu před mechanickým poškozením a korozí. Vodík může být stlačen klasickým pístovým kompresorem. Na stlačení 1 kilogramu vodíku z tlaku 0,1 MPa na 80 MPa je zapotřebí dodat energii 2,21 kWh v případě izotermického stlačení. V praxi však izotermického stlačení dosáhnout nelze, proto je hodnota potřebné energie ještě vyšší. Při aplikaci tohoto typu skladování vodíku v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie je ideální využít takový elektrolyzátor, který dokáže vyrábět vodík pod tak velkým tlakem, že ho lze přímo vtlačet do tlakové nádoby. Příklad nádoby na uskladnění stlačeného vodíku v průmyslovém využití je na následujícím obrázku. Moderní elektrolyzéry dokážou vyvinout dostatečný tlak, aby stlačily plyn na požadovaný tlak do tlakových lahví i bez využití kompresoru. [23,24]



Obr. 2.5: Tlaková lahev, kterou lze napojit přímo na elektrolyzátor [48]

2.4.2 Zásobníky na tekutý vodík

Tekutý vodík je skladován při teplotě 21,2 K. Tlak však může být atmosférický. Kryogenní nádoba na uskladnění tekutého vodíku je na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Nádoba na uskladnění tekutého vodíku [36]

Hustota kapalného vodíku je o $0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ vyšší, než hustota pevného vodíku, je tedy rovna $70,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Energetické nároky na dosažení takto nízké teploty jsou však značné, činí až 40 % z energie obsažené v uskladněném vodíku. Zásadní problémy jsou tedy jednak provedení dostatečně energeticky úsporného snížení teploty na potřebnou hodnotu a zároveň dostatečné tepelné odizolování vnitřku nádoby tak, aby nedocházelo k nadměrnému odpařování vodíku. Vlivem nedokonalé tepelné izolace nádoby však vždy dochází k odpařování vodíku, je tedy nutné, aby byla nádoba vybavena přetlakovým mechanismem k upouštění odpařeného vodíku, neboť čím vyšší tlak v nádobě je, tím rychleji dochází k odpařování tekutého vodíku. Jelikož teplo prostupuje do nádoby skrz její stěny, tvar nádoby se volí tak, aby byla plocha stěn minimální. Těto podmínce nejlépe vyhovují sférické nádoby. Výroba velkých sférických zásobníků je však velmi obtížná, a tedy i nákladná. Obecně lze konstatovat, že ztráty vypařováním vodíku jsou přímo úměrné poměru povrchu nádoby ku jejímu objemu. Pro sférickou nádobu o objemu 50 m^3 platí, že se denně vypaří 0,4 % vodíku, pro nádobu s objemem 100 m^3 již pouze 0,2 % a pro nádobu o $20\,000 \text{ m}^3$ je hodnota výparu rovna pouze 0,06 % objemu vodíku. [23,26,29]

Na zkapalnění jednoho kilogramu vodíku z pokojové teploty je zapotřebí dodat energii přibližně 15,2 kWh. Právě tato relativně vysoká hodnota omezuje aplikaci zkapalnění vodíku za účelem uchování energie pouze tam, kde není důležitá cena uskladnění, a také tam, kde je (vzhledem k neustálému vypařování) vodík spotřebován v poměrně krátkém čase. Těmto podmínkám vyhovuje například použití ve vesmírných programech. Pro touto diplomovou práci zkoumaný systém akumulace se tedy nejedná o vhodný způsob akumulace, a to především z důvodu vyšší investice a vyšších energetických nároků [23,27,28]

2.4.3 Skladování adsorpcí do jiného materiálu

Tato technologie je ze všech zde probíraných nejnovější, z části je ještě neprobádaná a stále se při jejím výzkumu dochází k novým závěrům. Použití v průmyslu je prozatím předmětem budoucnosti, avšak již nyní je zřejmé, že se jedná o velmi zajímavou technologii. Existuje více možností, jak skladovat vodík uvnitř dalších materiálů či na jejich povrchu. V dnešní

době zatím nejsou žádné z těchto technologií využitelné ve spojení s obnovitelnými zdroji energie, některé z nich však i přesto rozeberu, aby čtenář získal obecnější přehled a mohl porovnat, které z možností akumulace jsou pro aplikaci s FVE nejvhodnější.

První možností skladování v jiném materiálu je fyzisorpce vodíku. V rámci tohoto procesu dochází k reakci molekul vodíku s atomy na povrchu daného substrátu. Vzhledem k poměrně slabé interakci těchto částic je účinná fyzisorpce pozorovatelná až při velmi nízké teplotě, přibližně 273 K. Konkrétní vlastnosti procesu záleží na použitém materiálu pro substrát. Dobře využitelný pro tuto aplikaci je uhlík, v tomto případě vysokoporézní grafit. Jeho maximální využitelná plocha pro uchycení molekul vodíku je $1\,315\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, přičemž při této ploše dokáže substrát teoreticky adsorbovat 3 % hmoty vodíku. [23,33]

Hustota energie je v tomto způsobu skladování tedy relativně nízká, což je spolu s potřebou poměrně nízké teploty při procesu hlavní nevýhoda. Kromě uhlíku lze použít i další materiály, pro příklad zde zmíním například zeolit (NaY, adsorpce až 1,8 % hmoty vodíku při maximální ploše $725\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$). Výhodou této technologie je skutečnost, že při procesu není třeba docílit vysokých tlaků. Mezi výhody patří i poměrně nízké náklady na materiál a jednoduchý design skladovacího systému. [23,33]

Další možností je využití metalhydridů. Skladování do těchto sloučenin na bázi kovů je založeno na adsorpci při nízkých teplotách a vysokých tlacích. Vodík je následně navázán do chemické struktury hydridů a aby byl poté uvolněn pro další použití, je nutné dodat systému teplo. To znamená, že pro zpětné získání vodíku je třeba docílit vysokých teplot při nízkém tlaku. Dnes jsou již známy sloučeniny, které dokáží navázat i více než 10 % hmoty vodíku. Rekordní hodnotu prozatím drží sloučenina s chemickým vzorcem LiBH_4 , která dokáže adsorbovat až 18 % hmoty vodíku. Při desorpci následně uvolní až 75 % vodíku již při $280\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž proces lze urychlit například přidáním oxidu siřičitého nebo zvýšením teploty. Výhoda této technologie spočívá v bezpečnosti, neboť vodík je skladován při nízkých tlacích. To je dáno skutečností, že je navázán přímo ve struktuře substrátu a samovolně nedochází k jeho uvolňování. [33, 34,35]

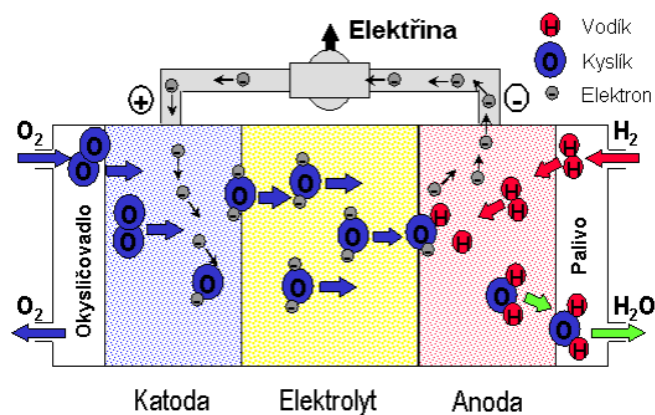
2.5 Přeměna vodíku na elektrickou energii

V minulých kapitolách jsem podal informace ohledně výroby vodíku a jeho uskladnění. Nyní je třeba zaměřit se na proces zpětného získání energie, která byla do vodíku uložena. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o velmi hořlavý plyn, je jednou z možností získání energie přímé spalování plynu ve speciálním spalovacím motoru nebo turbíně. Z tohoto procesu získá uživatel tepelnou energii, kterou následně může přeměnit na elektrickou. Tento způsob využití vodíku je dnes poměrně rozšířený i v průmyslové praxi, avšak velkou nevýhodou je nízká účinnost. [37]

Princip technologie spalování vodíku ji předurčuje především pro použití v automobilech s hybridním pohonem. Nevýhodou spalovacího motoru je nízká účinnost při poměrně malém zatížení, účinnost však roste se zatížením. Základem procesu je hoření vodíku. Plamen je velmi stabilní, což je dáno vysokou výhřevností vodíku. Stabilní je dokonce i při použití relativně chudé směsi. Vzhledem k vlastnostem vodíku je však nevýhodou malá objemová výhřevnost paliva. Pozitivní vlastností je skutečnost, že vodíkový spalovací motor při ideálních spalovacích podmínkách neprodukuje žádné emise skleníkových plynů či jiných znečišťujících látek. Tato technologie však není prakticky využitelná v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie. I v automobilovém průmyslu se očekává, že majoritní postavení zaujmou palivové články na úkor spalovacích motorů. [20,40]

Druhým způsobem je přeměna vodíku na elektrickou energii přímo v palivových článcích. Tato metoda se ke kombinaci vodíku a obnovitelných zdrojů energie hodí nejlépe, proto jí v následujících odstavcích věnuji podstatně větší prostor.

Palivový článek je elektrochemické zařízení umožňující přímou přeměnu chemické energie uložené ve vodíku na energii elektrickou. Princip jeho funkce je prakticky inverzní k principu funkce elektrolyzátoru, který byl popsán v kapitole 2.3. Existuje více druhů dnes běžně používaných palivových článků. Zmíním zde například článek PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), AFC (Alkaline Fuel Cell), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) nebo SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). Tyto varianty se liší materiálem elektrod, elektrolytem a podmínkami během procesu přeměny, zejména teplotou. Základní princip je však pro všechny palivové články stejný. Molekulární kyslík, jenž plní funkci oksylichovadla, je přiváděn na katodu. Zde se redukují elektrony (počet elektronů se liší dle použité metody, při využití metody na obrázku 2.7 jsou uvolněny elektrony dva) na kyslíkový anion. Ten prochází elektrolytem směrem k anodě, na kterou je současně přiváděn vodík. Tyto dva prvky spolu reagují za vzniku vody, přičemž při této reakci jsou uvolněny elektrony, které sem byly transportovány z katody. Tyto elektrony jsou vedeny zpět na katodu a v průběhu cesty mohou být využitelné jako elektrický proud. Tento princip funkce palivového článku je zobrazen na obrázku 2.7. [37,39]

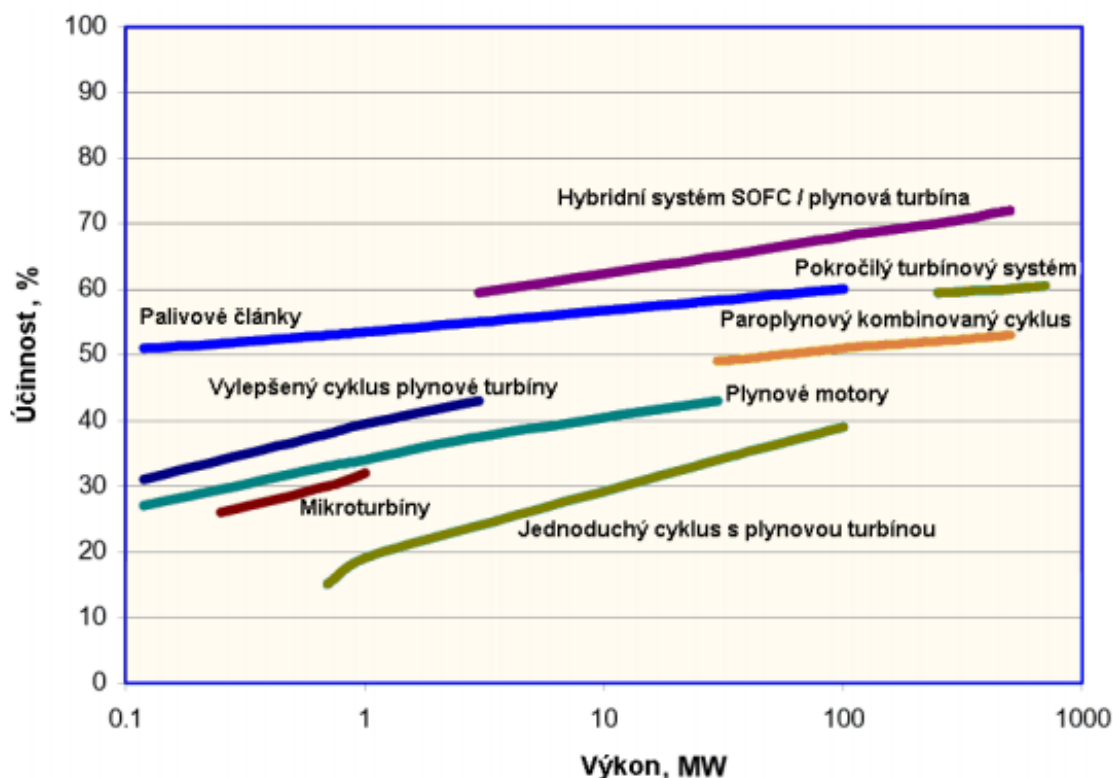


Obr. 2.7: Princip funkce palivového článku [37]

Z popisu procesu výše vyplývá, že při reakci vzniká pouze voda. Výroba elektrické energie z vodíku v palivových článcích tedy nezatěžuje životní prostředí žádnými skleníkovými plyny a jinými škodlivinami. [37,38,39]

Mezi hlavní výhody palivových článků patří vysoká účinnost, která je dána přímou transformací chemické energie na energii elektrickou (není zde mezistupeň v podobě tepelné energie jako v případě spalovacích motorů), možnost konstruovat palivové články v širokém rozmezí výkonů, přičemž účinnosti se mění jen minimálně, velmi nízké emise škodlivých látek (desetkrát až stokrát nižší než u spalování fosilních paliv), malá poruchovost systémů, nízká hlučnost a po úpravě článků i možnost použití jiných plyných paliv. Ovšem i tato technologie má své nevýhody, ty jsou však v porovnání s výhodami podstatně méně významné. Mezi nevýhody lze řadit prozatím nízkou životnost (tento parametr se však s postupným výzkumem stále zlepšuje) a citlivost k příměsím v palivu nebo v oksylichovadle. Náklady na čištění plynů jsou tedy nezanedbatelné. Další nevýhodou je také postupně klesající účinnost s dobou provozu. Hlavní nevýhodou jsou však vysoké investiční náklady, které zatím brání markantnějším rozšíření této technologie v provozu. Na následujícím obrázku je porovnání účinnosti palivových článků. Jsou zde znázorněny účinnosti palivového článku, plynového motoru, jednoduchého

cyklu s plynovou turbínou, paroplynového kombinovaného cyklu, mikroturbíny, hybridního systému SOFC/plynová turbína, pokročilého turbínové systému a vylepšeného cyklu plynové turbíny. [37]



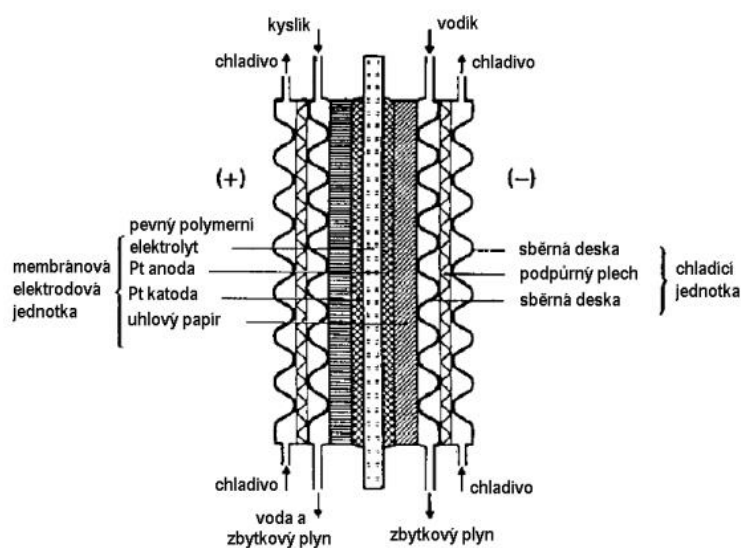
Obr. 2.8: Porovnání účinnosti palivových článků s konvenčními zařízeními [37]

Z porovnání vyplývá, že účinnost je oproti konvenčním zařízením poměrně vysoká. Právě v této skutečnosti spočívá velký potenciál palivových článků. Do budoucna je však nutné účinnost palivových článků ještě zvýšit, což je jeden z hlavních cílů vývoje vodíkových technologií. Nyní se již zaměřím na jednotlivé typy těchto článků.

2.5.1 PEMFC

Tyto palivové články využívají polymerů jako protonově výměnné membrány. Princip PEM technologie byl již popsán v kapitole 2.2.2. Tyto články se vyznačují nízkou teplotou při procesu. Teplota bývá 80 °C, případně i nižší. Takto nízké hodnoty umožňují rychlé nasetí systému a okamžitou odezvu na změnu výkonu. Právě to je důvod, proč jsou tyto články vhodné i pro pohon vozidel na vodík. Materiálem elektrod je platina, která funguje jako katalyzátor, neboť teploty jsou tak nízké, že bez určitého druhu pomoci neumožňují průběh reakce. Právě tento kov je příčinou vyšších nákladů na tuto technologii. Zásoby platiny na Zemi jsou omezené, existuje však způsob, jak ji z elektrod recyklovat po skončení životnosti článku. Voda je v tomto případě produkována ve formě kapaliny. Z této skutečnosti plyne omezující podmínka, která říká, že maximální provozní teplota je 100 °C, neboť při vyšších teplotách by docházelo k odpařování vody. Pokud je nutné využít teploty přesahující tuto horní hranici, je zapotřebí zvýšit i tlak. Zvýšení tlaku vede ke zvýšení bodu varu vody. Za účelem zvýšení elektrického napětí a výkonu je možné zapojit více palivových článků do série. Aby však nedocházelo k nepřiměřenému nárůstu hmotnosti systému, je v tomto zapojení využita takzvaná bipolární deska místo

klasického zapojení katodových a anodových sběračů vedle sebe. Tato deska tedy fakticky odděluje sousedící články. Schéma této technologie je na obrázku 2.9. [37, 39]



Obr. 2.9: Schéma palivového článku PEMFC [37]

Výhody tohoto typu palivového článku spočívají v poměrně dobré snášenlivosti oxidu uhličitého (lze tedy využít vzduch jako okysličovadlo), v rychlém naběhnutí systému vlivem nízké provozní teploty, malých provozních tlacích, malých rozměrech, velké proudové a energetické hustotě a tedy vysokému výstupnímu napětí a také v relativně dlouhé životnosti způsobené použitím pevného elektrolytu. Nevýhody PEMFC článků jsou především nízká snášenlivost vůči oxidu uhelnatému, omezení pro maximální provozní teplotu z důvodu využití vody ke zvlhčování plynů a vyšší náklady způsobené použitím platinových katalyzátorů. [10, 41]

2.5.2 AFC

Tento typ palivového článku je nejstarší. Ve srovnání s ostatními způsoby má tento nejlepší výkonové parametry. Stejně jako v případě PEMFC jsou využívány platinové elektrody, přičemž právě platina umožňuje dosažení vyšších účinností. Ta při použití čistého vodíku dosahuje hodnot až 60 %. Elektrolytem v tomto palivovém článku je kapalný roztok hydroxidu, jehož koncentrace se odvíjí od provozní teploty. AFC článek je velmi citlivý na oxid uhličitý, plyn je tedy třeba čistit. Právě s čištěním jsou spojené určité náklady navíc. Výhody AFC článků jsou stejně jako v případě PEMFC nízká provozní teplota, a tedy rychlý náběh systému, vysoká účinnost, kompaktní rozměry a také skutečnost, že oproti PEMFC lze použít menší množství platiny. Mezi nevýhody spadá problémová reakce elektrolytu s oxidem uhličitým, která je příčinou kratší doby životnosti, složitý systém hospodaření s vodou a také fakt, že je využit kapalný elektrolyt. To má za následek složitější manipulaci s palivovými články. [10,26,37]

Speciálním případem AFC článků jsou palivové články PAFC. Ty jsou dnes průmyslově nejvíce využívaným typem. Technologie oproti klasickému AFC se liší v použitém elektrolytu a elektrodách a v různých provozních parametrech jako například teplota a tlak. Elektrolytem v tomto případě je stoprocentní kyselina fosforečná. Při tomto způsobu zpracování vodíku vzniká velké množství tepla, které je nutné odvádět. Toto teplo lze však využít v kombinaci

s kogeneračními jednotkami, které toto odpadní teplo dokáží využít. Účinnost kombinované výroby energie pak dosahuje i 80 %. [10,37,38]

2.5.3 SOFC

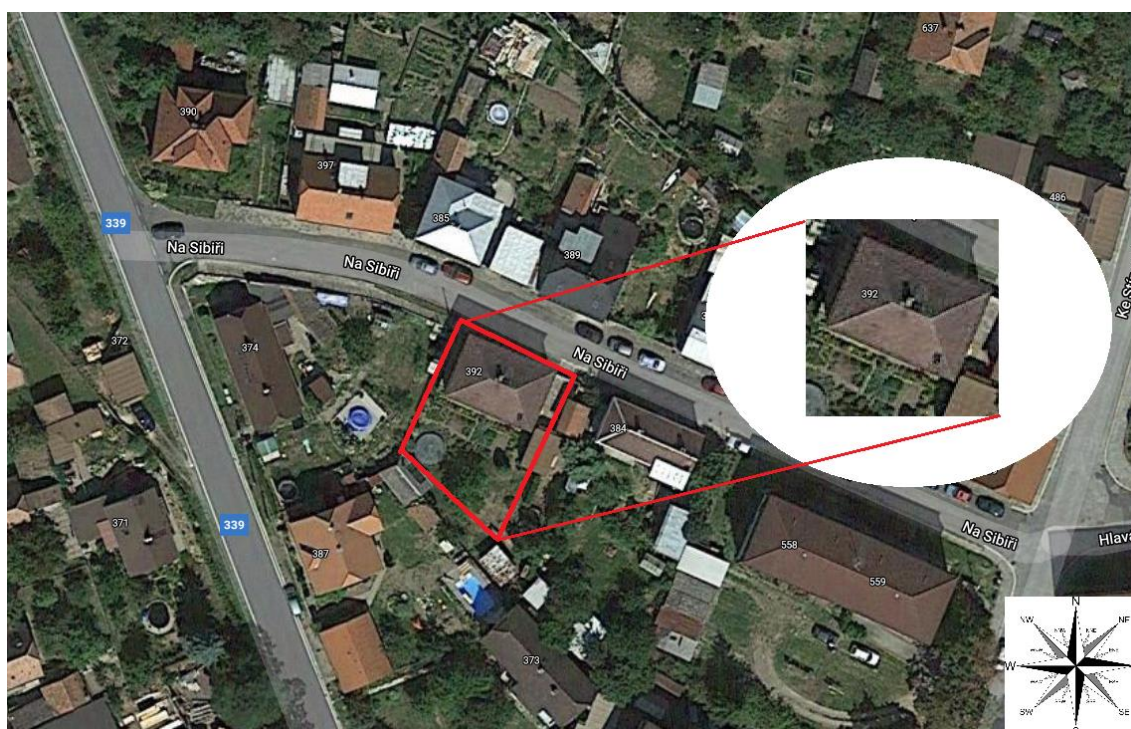
Jak název napovídá, elektrolytem v tomto článku je pevný oxid kovu neobsahující póry, což je důvod, proč nedochází ke korozi. Použité materiály jsou stejné jako v případě vysokoteplotní elektrolýzy SOEC popsané v kapitole 2.2.3. Důležité je, aby měly použité pevné materiály téměř totožný koeficient teplotní roztažnosti, neboť dochází k značné teplotní dilataci. Na rozdíl od nízkoteplotních palivových článků zde není nutné využít dalších zařízení jako například čerpadel a dmychadel. Jelikož tyto zařízení spotřebovávají určitou hodnotu elektrické energie, výsledná celková účinnost se jejich využíváním snižuje. Využití pevného elektrolytu také umožňuje konstruovat SOFC palivové články v různých tvarech, nejčastěji jsou vyráběny deskové články a tubulární články. [10,37,39]

Nyní shrnu výhody použití tohoto palivového článku. Jedná se o vysokou účinnost systému, dobře využitelné odpadní teplo, samovolný vnitřní reforming paliva a nižší náklady vlivem absence drahých kovů v elektrodách. Nevýhoda SOFC článků spočívá v náročných požadavcích na materiál kvůli vysokým provozním nákladům vzhledem k teplotám, které v článku vznikají. Další nevýhodou je dlouhá doba náběhu systému a dosud poměrně krátká doba životnosti palivového článku. [37,39]

Kapitola 3

Návrh systému pro akumulaci

Celý systém bude uložen ve dvougeneračním rodinném domě v obci Ledeč nad Sázavou. Dům je dvoupatrový, přičemž každé patro obývá jedna generace. V podkroví se nachází neobývaná půda a dům je také podsklepený. Daný objekt je postaven na poměrně strmém jižním svahu, fotovoltaické panely budou uloženy na jihojihozápadní části střechy. Dům je dostatečně vysoký, žádná překážka tedy nikdy v průběhu dne nevrhá stín na důležitou část střechy. Ta je lichoběžníkového tvaru, pokryta klasickými taškami, přičemž spodní část střechy má rozměr 13,4 metrů a výška lichoběžníku je 6 metrů. Sklon střechy je 39° a azimut činí $203,3^\circ$. Komín, který je umístěn na severní straně, vrhá na jižní stranu střechy pouze zanedbatelný stín. Tyto podmínky jsou velmi vhodné pro instalaci fotovoltaických panelů. Instalaci umožňují i dostatečně mohutné dřevěné krovy, které unesou váhu samotných panelů i nosné konstrukce. Dodavatelem elektrické energie do zkoumaného objektu je společnost ČEZ Prodej a.s., distribuční sazba je D26d a hodnota jističe činí 3×25 A. V domě bydlí kromě dvou ekonomicky aktivních lidí ve středním věku také dva důchodci a každý druhý víkend tři studenti. Plány rodinného domu s důležitými rozměry jsou v Příloze C – Plány a řezy rodinného domu.



Obr. 3.1: Lokalita rodinného domu spolu se směrovou růžicí [49,50] (upraveno)

3.1 Model spotřeby domácnosti

Základem pro správné a smysluplné dimenzování výkonů a kapacit jednotlivých komponent systému je namodelování takové spotřeby objektu, která odpovídá realitě. Za tímto účelem jsem využil program Load Profile Generator 10.4.0.40. [51] Do výpočetního modelu jsem zahrnul přibližnou geografickou polohu nemovitosti a informace o členech domácnosti. Mezi tyto informace patří nejen jejich počet, věk a zaměstnání, ale také čas, kdy odchází do práce a následně přichází z práce. Součástí modelu jsou i elektrické spotřebiče a jejich technické parametry.

Na základě poskytnutých informací zpracoval program model spotřeby po minutách pro letní, zimní a jarní nebo podzimní den. Z těchto denních údajů jsem vypočítal energii, kterou objekt spotřebuje za jeden rok. Hodnota roční spotřeby energie dle modelu činí 8 373 kWh. Následně jsem ověřil, zda roční suma této namodelované spotřeby odpovídá reálným hodnotám. Vzhledem k faktu, že skutečná roční spotřeba domácnosti, která dle faktury činí 8 588 kWh, se oproti modelu liší pouze o 215 kWh, tedy o 2,5 %, považuji model spotřeby za dostatečně přesný k využití pro další výpočty. Fakturované spotřeby za posledních 5 let jsou velmi podobné. Důležitým předpokladem výpočtů je skutečnost, že po celou dobu provozu FVE neočekávám výrazné snížení či zvýšení spotřeby rodinného domu. Nepředpokládám ani změnu denních diagramů spotřeby domácnosti – taková změna by též měla vliv na hodnocení zkoumané investice. Současně nepředpokládám, že by v budoucnu domácnost využívala elektromobily, které by doma i nabíjela.

Podrobný výpočet je k nalezení v Příloze B – Výpočty k akumulaci do vodíku na listu Spotřeba elektrické energie.

3.2 Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely tvoří základ systému. Představují zdroj elektrické energie, jejíž přebytky jsou akumulovány do vodíku. Existují dva druhy dnes komerčně využívaných fotovoltaických panelů, konkrétně monokrystalické a polykrystalické. Monokrystalický panel je vyrobený z jednoho jednolitého ingotu křemenného krystalu, který je následně řezán na wafery, které se velikostně upraví na požadovanou velikost panelu. Proces výroby je však poměrně náročný. Výhodou monokrystalických panelů je velmi čistá a jednolitá struktura, která umožňuje vytěžit větší výkon z dané plochy, než v případě polykrystalického panelu. S vyšším výkonem souvisí i vyšší účinnost. Další výhodou je pomalejší degradace výkonu v čase a jednolitá barva panelu. Polykrystalické panely jsou vyrobeny z velkého množství menších křemíkových krystalů. Ty jsou slisovány do jednoho panelu. Vzhledem k tomuto procesu je zřejmé, že struktura není tak čistá, jako v případě monokrystalického panelu. Výhodou využití polykrystalických panelů je jejich nižší cena. Nutno však dodat, že v dnešní době jsou již rozdíly v cenách minimální. [46]



Obr. 3.2: Monokrystalický solární panel [65]

Z důvodů popsaných výše jsem se rozhodl využít pro aplikaci v systému monokrystalických panelů. Konkrétně se jedná o panely Amerisolar 320Wp. V následující tabulce jsou důležité informace ohledně panelů, které jsou využity v následujících výpočtech.

Tab. 3.1: Specifikace monokrystalického panelu Amerisolar 320 Wp [47]

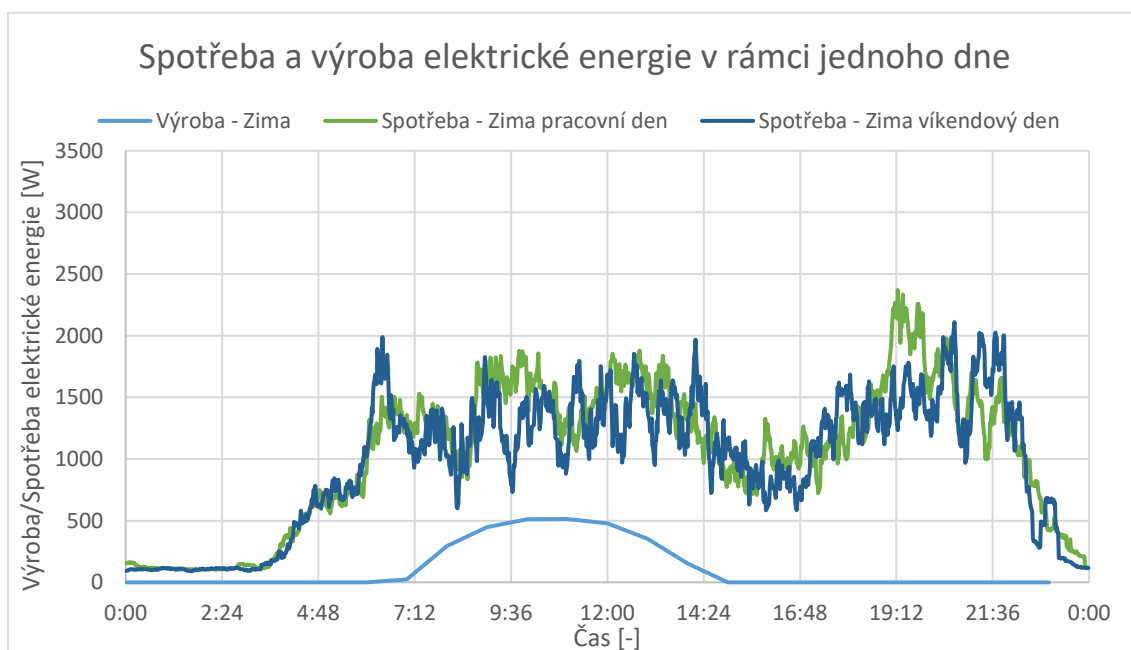
Parametr	Amerisolar 320 Wp
Výkon [W]	320
Účinnost [%]	19,67
Pokles výkonu [%/1 °C]	0,052
Průměrný pokles výkonu [%/1 rok]	0,645
Záruka [roky]	12
Záruka na elektrický výkon [roky]	30
Typ [-]	monokrystalický
Rozměry [mm]	1640 x 992 x 35
Hmotnost [kg]	17,5
Cena s DPH [CZK/kus]	3 320

Vzhledem k rozměrům střechy a rozměrům jednotlivých panelů je možné umístit na střechu až 25 kusů panelů. Význačným parametrem těchto panelů je především jejich vysoká účinnost, která je 19,67 %, a dlouhá doba životnosti. Panely budou umístěny na nosné konstrukci z pozinkovaného hliníku. Po dodavateli požaduji, aby byl zinek žárem nanesený na již svařený kus, neboť pokud by došlo ke svaření již pozinkovaných částí až na místě instalace a následnému zabarvení svárů klasickou barvou, konstrukce by byla v místě svárů mnohem méně odolná vůči přírodním vlivům. To by způsobilo, že životnost celé nosné konstrukce by nedosahovala životnosti fotovoltaických panelů a musela by být během zkoumané doby alespoň jednou vyměněna. Pozinkování kompletní svařené konstrukce zajistí prodloužení doby životnosti na stejnou hodnotu, jako je doba životnosti panelů, za cenu nákladnější výroby, dopravy a instalace. Celkovou cenu této konstrukce včetně dopravy a instalace jsem stanovil na 20 000 CZK s DPH.

3.2.1 Optimální počet fotovoltaických panelů

Optimální počet panelů jsem stanovil na základě porovnání spotřeby elektrické energie domácnosti a výroby energie FVE. Stanovení spotřeby rodinného domu je popsáno v kapitole 3.1. Výrobu jsem určil na základě dat ze systému PVGIS. [55] Tento systém je vytvořený výzkumným centrem Evropské komise a využívá se k modelování osvitů pro danou geografickou polohu. Databáze pro výpočet slunečního záření, kterou jsem použil, získává data na základě měřících satelitů. Pro dostatečnou přesnost jsem zadal přesnou geografickou polohu objektu, sklon střechy a tím pádem také solárních panelů a azimut. Na základě získaných hodnot osvitů pro letní, zimní a podzimní či jarní období v hodinových intervalech jsem vypočítal výrobu pro jednotlivé roční období a porovnal se spotřebou domácnosti. Z výsledných hodnot jsem stanovil optimální počet fotovoltaických panelů na téměř maximální možnou hodnotu, kterou na střechu lze umístit, konkrétně 24 kusů. Ztráty v kabelovém vedení a dalších technologických částech jsem stanovil na 8 %. Podrobnější vysvětlení je dále v textu. Grafy porovnání spotřeby a výroby elektrické energie jsou na následujících obrázcích. Podrobné výpočty jsou k nalezení v Příloze B – Výpočty k akumulaci do vodíku na listu Výroba elektrické energie. V zimním období fotovoltaická elektrárna nemá dostatečný výkon, aby v jakékoli části dne výroba převýšila spotřebu objektu. Z tohoto důvodu tedy nebude probíhat žádná akumulace. Podobná situace nastává i na jaře nebo na podzim. Zde bude výroba převyšovat spotřebu pouze malou část dne

a naakumulovaná energie během dne v tomto období bude poměrně nízká. V létě již však bude značnou část dne výroba vyšší než spotřeba. V tomto období se naakumuluje největší množství energie. Jako první podám informace o zimním období.



Obr. 3.3: Graf spotřeby a výroby elektrické energie v rámci zimního dne

Hodnoty z grafu jsou tabelárně zpracovány v následující tabulce.

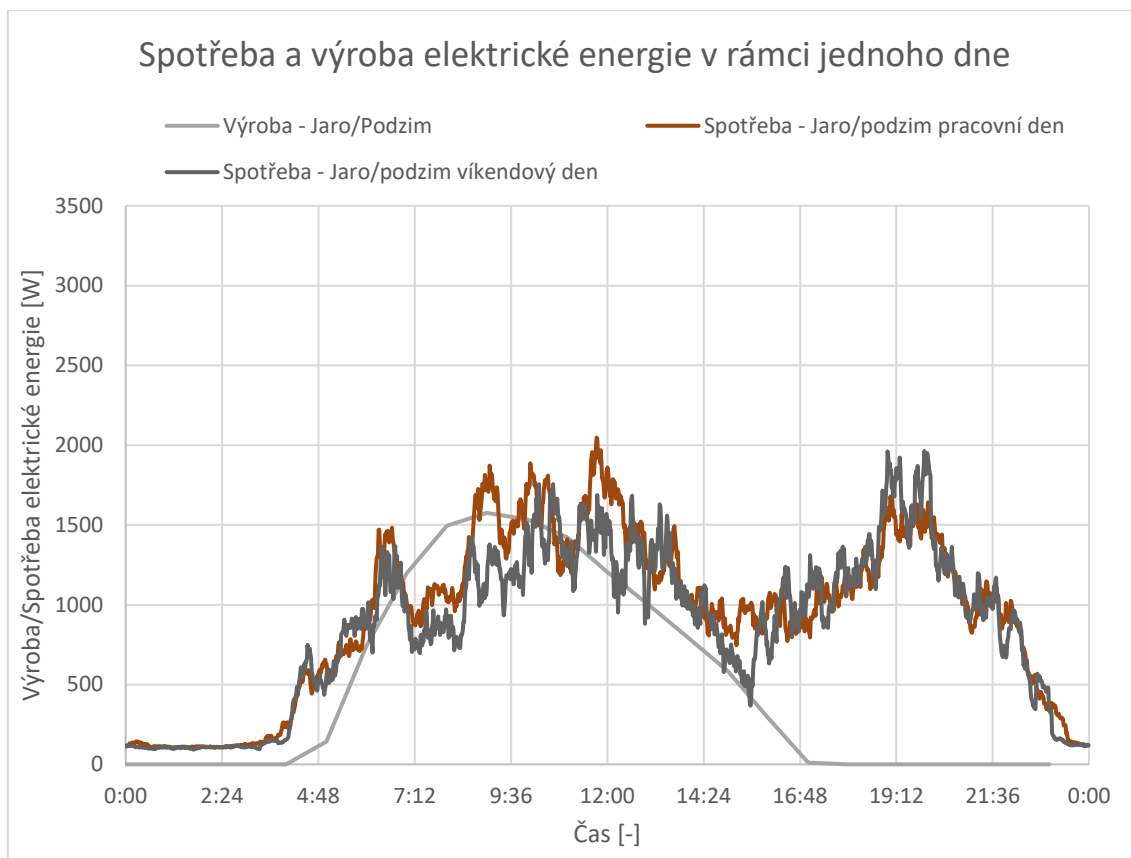
Tab. 3.2: Výroba a spotřeba elektrické energie v zimním období

Spotřeba a výroba v zimním období		
T → N/A	1. rok	20. rok
E_{VT} [kWh]	N/A	N/A
E_{ST} [kWh]	N/A	N/A
E_{AT} [kWh]	0,00	0,00
E_{SC} [kWh]	25,10	25,10
E_{VC} [kWh]	2,77	2,42
E_{NFVE} [kWh]	22,32	22,68
E_{ND} [kWh]	N/A	N/A
E_{VS} [kWh]	2,77	2,42

kde T je čas, kdy výroba převažuje nad spotřebou, E_{VT} je energie vyrobená v čase T , E_{ST} je energie spotřebovaná v čase T , E_{AT} je energie využita v elektrolyzáru k výrobě vodíku, E_{SC} je celková spotřebovaná energie během dne, E_{VC} je celková vyrobená energie během dne, E_{NFVE} je hodnota energie, kterou není možné dodat z FVE (tato energie musí být buď nakoupena ze sítě nebo vyrobena z akumulačního zařízení), E_{ND} je energie akumulovaná do dalšího dne a E_{VS} je vyrobená energie, která je ihned spotřebována v domácnosti. Podrobné výpočty těchto veličin jsou v Příloze B na listu Výroba elektrické energie.

Z grafu a tabulky je zřejmé, že výroba nikdy nepřesahuje spotřebu domácnosti. V zimě tedy nebude docházet k žádné akumulaci elektrické energie. Smysl fotovoltaické elektrárny v zimě spočívá v tom, že veškerá vyrobená energie je ihned spotřebována. Právě o hodnotu vyrobené energie je sníženo množství energie, které je zapotřebí nakoupit od distributora. Určitý ekonomický smysl má FVE tedy i v zimním období. Podobná je situace i na jaře a na podzim, kdy

hodnoty osvitu také nedosahují takových hodnot jako v létě. Následují podrobnější informace o jaře a podzimu.



Obr. 3.4: Graf spotřeby a výroby elektrické energie v rámci jarního/podzimního dne

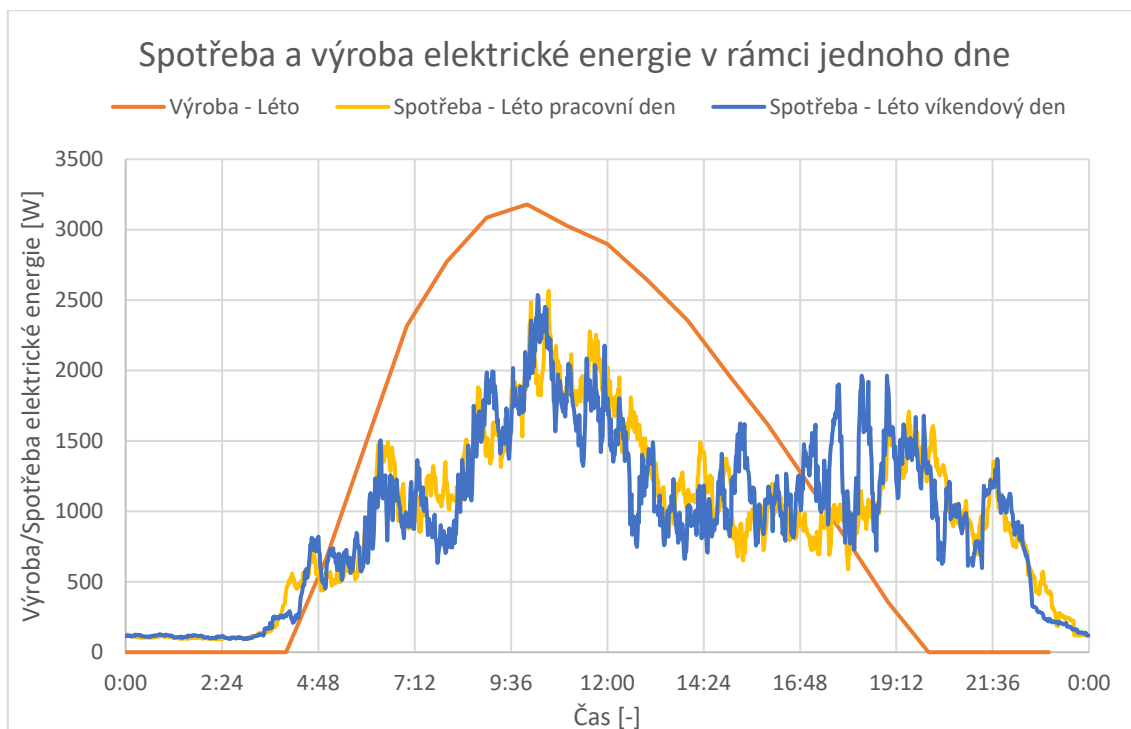
Hodnoty z grafu jsou zpracovány v následující tabulce, přičemž označení veličin je stejné jako v tabulce 3.2.

Tab. 3.3: Výroba a spotřeba elektrické energie v jarním/podzimním období

Spotřeba a výroba v jarním/podzimním období		
T → 7:00 až 8:38	1. rok	20. rok
E_{VT} [kWh]	2,10	1,82
E_{ST} [kWh]	1,75	1,75
E_{AT} [kWh]	0,34	0,07
E_{SC} [kWh]	22,45	22,45
E_{VC} [kWh]	12,01	10,46
E_{NFVE} [kWh]	10,78	12,29
E_{ND} [kWh]	N/A	N/A
E_{VS} [kWh]	11,67	10,16

Z této tabulky vyplývá, že na jaře a na podzim bude docházet k akumulaci přebytků vždy od 7:00 do 8:38. Během této doby se první rok projektu naakumuluje 0,34 kWh energie, zatímco poslední, tedy 20. rok zkoumání projektu, bude akumulováno pouze 0,07 kWh vlivem snižující se účinnosti fotovoltaických panelů v čase. Nejzajímavější a také nejdůležitější je průběh výroby v létě. Je zřejmé, že hodnoty osvitů v letním období dosahují nejvyšších hodnot, a fotovoltaická elektrárna tedy vyrobí největší množství energie. Z hlediska dimenzování zásobníku na vodík je letní období nejdůležitější, neboť je třeba zajistit, aby byl zásobník dostatečně velký

a nedocházelo ke ztrátám kvůli již stoprocentně naplněnému zásobníku. Stav v létě je rozebrán dále, popisu je věnován ze všech období největší prostor.



Obr. 3.5: Graf spotřeby a výroby elektrické energie v rámci letního dne

Hodnoty jsou opět zpracovány tabelárně.

Tab. 3.4: Výroba a spotřeba elektrické energie v letním období

Spotřeba a výroba v jarním/podzimním období		
T → 4:51 až 17:30	1. rok	20. rok
E_{VT} [kWh]	27,88	24,28
E_{ST} [kWh]	16,24	16,24
E_{AT} [kWh]	11,64	8,04
E_{SC} [kWh]	23,09	23,09
E_{VC} [kWh]	30,37	26,45
E_{NFVE} [kWh]	4,36	6,78
E_{ND} [kWh]	7,28	1,27
E_{VS} [kWh]	18,73	16,31

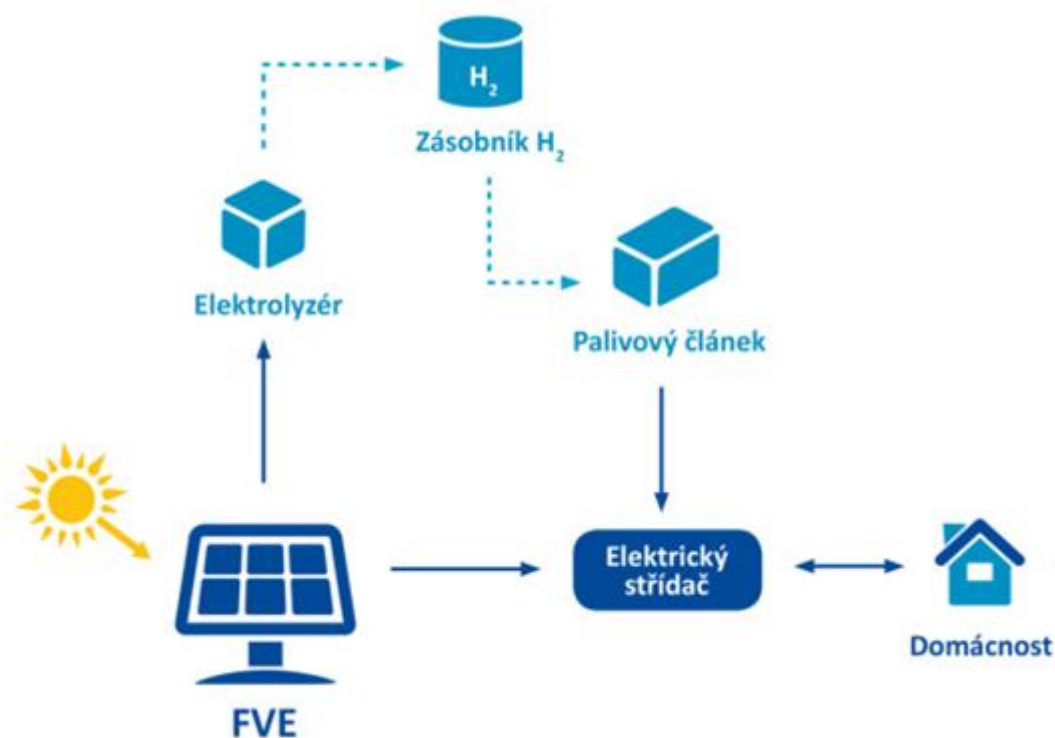
Z tabulky a grafu vyplývá, že v létě již bude docházet k akumulaci značné hodnoty energie. Během prvního roku životnosti bude denně akumulováno 11,64 kWh energie, což je hodnota přibližně o 7,28 kWh vyšší, než energie, která nebude pokryta samotnou okamžitou výrobou FVE. V posledním roce životnosti je však hodnota akumulované energie oproti energii nepokryté okamžitou výrobou FVE vyšší pouze o 1,27 kWh. V průběhu doby životnosti tedy bude docházet ke skutečnosti, že bude akumulováno více energie, než bude možné spotřebovat. Existuje několik možností, jak tento problém vyřešit. První možností je doporučení provozovateli FVE nákup zařízení, které dodatečnou energii spotřebovuje, například elektrický skútr, který bude nabíjen přes noc. Další možností je investice do podstatně většího akumulačního zásobníku. Lze pak předpokládat, že celková kapacita tohoto zásobníku bude využita na zásobování domácnosti elektrickou energií v případě, že bude během celého dne zataženo a FVE nebude vyrábět žádnou

energii. Déle je možný také prodej nadbytečných přebytků do distribuční sítě. V rámci zkoumané varianty 1A jsem zvolil možnost s investicí do většího zásobníku.

Na základě výpočtů jsem tedy stanovil optimální počet fotovoltaických panelů na hodnotu 24. Celkový výkon FVE činí 7,68 kWp. Důležitým závěrem je, že tento výkon elektrárny je dostatečně nízký, aby nebylo nutné dle kapitoly 2.2 mít pro stavbu stavební povolení a územní rozhodnutí. Také nebude třeba žádat ERÚ o licenci.

3.3 Varianta 1A – akumulace do vodíku (dlouhodobá)

Nyní se zaměřím na samotný návrh kompletního systému umožňující akumulaci přebytků z OZE, konkrétně FVE, do vodíku. Základní předpoklad pro ekonomickou i energetickou stabilitu systému je optimální navrzení jednotlivých komponent. K optimální velikosti elektrárny je zapotřebí zvolit adekvátní velikost nádrže na vodík, neboť pokud by byla nádrž příliš malá, ne všechny přebytky energie by bylo možné transformovat na vodík a vznikaly by ztráty. Zároveň věnuji dostatečnou pozornost dobám životnosti jednotlivých součástí systému. Pokud by byl výpočet založený na skutečnosti, že všechny komponenty systému akumulace do vodíku mají stejnou dobu životnosti, byla by do modelu zanesena výrazná chyba. Je třeba předpokládat, že například střídač má oproti fotovoltaickým panelům pouze poloviční dobu životnosti, a proto bude nutné za dobu zkoumání investice alespoň jednou reinvestovat do nákupu nového střídače. V rámci této varianty předpokládám, že bude akumulováno takové množství energie, aby po 7 průměrných po sobě jdoucích letních dnech bylo možné z naakumulované energie pokrýt spotřebu celého rodinného domu na celých 24 hodin. Na následujícím obrázku je schéma systému, který jsem zvolil pro výpočetní model v rámci této diplomové práce.



Obr. 3.6: Schéma systému pro akumulaci přebytků z FVE do vodíku [42] (upraveno)

Takto postavený systém poskytuje uživateli několik výhod. Umožňuje flexibilně a s dostatečnou účinností vyrábět elektrickou energii z vodíku, přičemž nejsou produkovány skleníkové plyny. To má za následek lokální zlepšení stavu ovzduší. Skutečnost, že je systém schopný naakumulovat poměrně velké množství energie, poskytuje určitou nezávislost na dodávce z distribuční sítě v případě jejího výpadku. Dochází také ke snížení nákladů na primární zdroj energie. Vzhledem k velkému množství komponentů je zapotřebí je všechny do hloubky analyzovat a porozumět jejich technickým i ekonomickým parametrům. Na základě takové analýzy je nutné zvolit ideální komponenty z hlediska použité technologie (například alkalická elektrolýza versus PEM elektrolýza, viz kapitola 2.3), ale také z hlediska celkového systému (optimální výkon, velikost a cena zařízení vzhledem k celkové velikosti systému).

Tento systém se skládá z fotovoltaických panelů, které vyrábí elektrickou energii ze slunečního svitu. Pokud v čase výroby domácnost energii také spotřebovává, je přes elektrický střídač elektřina přivedena z fotovoltaických panelů přímo do domácnosti. Pokud ovšem poptávka po elektrické energii není, je tato energie využita v elektrolyzátoru, kde je s její pomocí vyroben vodík. Ten je následně skladován v zásobníku, aby byl v případě poptávky z domácnosti přiveden do palivového článku, kde dochází k jeho přeměně zpět na elektrickou energii. Po transformaci v elektrickém střídači je tato energie využita v domácnosti. Systém je dle reálné spotřeby domácnosti a výroby FVE navržen tak, aby platilo, že většina naakumulované energie přes den bude využita v noci, kdy nesvítí slunce nebo akumulovaná pro další dny. Z tohoto důvodu bylo třeba najít optimální počet fotovoltaických panelů, velikost elektrolyzátoru, zásobníku a palivového článku. Podrobnější informace o tomto problému jsou v následujících kapitolách. K zabránění nechtěným přetokům do sítě a také k řízení spotřeby energie vyrobené FVE v domácnosti slouží nainstalovaný wattrouter. [7,42]

3.3.1 Elektrolyzátor

V kapitole 2.3 jsem podrobně rozebral možnosti výroby vodíku. Zaměřil jsem se na jejich využitelnost, výhody a nevýhody. Důležitá je především cena, neboť při porovnání ceny výroby vodíku pomocí reformingu s využitím fosilních paliv a pomocí elektrolýzy je zřejmé, že použití nejlevnější elektrolýzy (vysokoteplotní) je stále přibližně čtyřikrát dražší, než použití reformingu. To platí i přes mnohem vyšší účinnost vysokoteplotní elektrolýzy. Na obrázku 3.7 lze vidět shrnutí dnes nejčastěji využívaných způsobů spolu s podmínkami, které je pro dané metody nutné splnit, a účinnostmi. [14]

Metoda	Teplota / Tlak	Účinnost procesu [%]
Parní reforming	700–950 °C / 0,3–2,5 MPa	65
Parciální oxidace	~ 1400 °C / 3–8 MPa	60–80
Elektrolýza nízkoteplotní	< 100 °C / 0,1 MPa	80–90
Elektrolýza vysokoteplotní	700–900 °C / 0,1 MPa	90–95
Termochemický siřičito-jodový (S-I) cyklus	800–1000 °C / 0,1 MPa	35–50
Zplyňování uhlí	1000–2000 °C / 0,1–3 MPa	60
Zplyňování biomasy	800–1000 °C / 0,1–0,5 MPa	35–50

Obr. 3.7: Metody výroby vodíku s jednotlivými podmínkami a účinnostmi [15]

Z obrázku výše lze vidět, že rozdíly v účinnostech jsou markantní. Nejvyšších účinností dosahují elektrolýzy vody. Energetické nároky na výrobu jednoho Nm³ vodíku se liší o jednotky kWh. Při využití nízkoteplotních elektrolýz se jedná o hodnotu 4,5 až 7,5 kWh, pro vysokoteplotní elektrolýzu je tato hodnota nižší, přibližně 2,5 až 3,5 kWh. Avšak vzhledem k tomu, že právě PEM elektrolýza má pro využití v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie největší potenciál kvůli schopnosti pracovat při proměnlivém výkonu, rozhodl jsem se po analyzování výhod a nevýhod jednotlivých způsobů elektrolýz využít pro model v této práci PEM elektrolýzu. Na trhu není prozatím nadbytek výrobců PEM elektrolýzérů, neboť se jedná o poměrně novou technologii, která není komerčně využívána, a proto si dodavatelé ceny svých elektrolýzérů poměrně důsledně střeží. Jako dodavatele jsem vybral americkou společnost HOGEN, konkrétně jejich model HOGEN HGS S 20. Jedná se o druhý nejmenší model z řady S, která je vzhledem k proporcím FVE nejvhodnější. Maximální příkon tohoto zařízení činí 6,7 kW, výkon FVE nikdy tuto hodnotu nepřevyší vzhledem k neustálé spotřebě části vyrobené energie ihned ve spotřebičích domácnosti. Jedná se o plně automatické zařízení s detekováním poruch a automatickým uvolněním tlaku při poruše. Je vybaveno detektorem unikajícího vodíku a nouzovým vypínacím tlačítkem. Elektrolýzér musí být umístěn uvnitř a dokáže pracovat při vlhkosti vzduchu od 0 do 90 %. Nevýhodou je poměrně nižší životnost elektrolýzéra. Ta je stanovena na 20 let, což je o 10 let méně, než u alkalických elektrolýzérů. Pro podmínky zkoumaného systému je však tato doba dostačující. Režim práce rychle se opakujících se cyklů ve spojení s FVE nemá vliv na tloušťku protonově výměnné membrány, ta zůstává i při tomto režimu stále přibližně 0,2 mm. Navíc již po 500 hodinách práce dochází ke zvýšení výkonu kvůli snížení ohmického odporu uvnitř elektrolýzéra. Takové zvýšení je ovšem otestováno v laboratorních podmínkách a není jisté, zda by platilo i v reálné aplikaci. Z toho důvodu bude výpočetní výkon elektrolýzéra po celou dobu životnosti konstantní. [44,45]

Tab. 3.5: Specifikace PEM elektrolýzéra HOGEN HGS S 20 [44,57,72]

Parametr	HOGEN HGS S 20
Produkce vodíku [Nm ³ ·h ⁻¹] ¹	0,53
Produkce vodíku [kg·24h ⁻¹]	1,14
Spotřebovaná energie [kWh·Nm ⁻³]	6,7
Čistota vodíku [%]	99,9995
Maximální výstupní přetlak vodíku [bar]	13,8
Spotřeba vody [l·h ⁻¹]	0,47
Tlak vody [bar]	1,5 - 4
Rozměry [cm]	97 x 79 x 106
Příkon [kW]	2,2
Hmotnost [kg]	215
Chlazení [-]	vzduchové
Cena [USD]	43 000,00
Cena [CZK] při kurzu CZK/USD 21,387	919 641,00
Účinnost výroby vodíku [%]	53
Životnost [roky]	20

Cena je stanovena odhadem na základě informací od společnosti, která elektrolýzér nevyrobí, nýbrž přepravuje od výrobce. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o poměrně cenově nákladné zařízení, u kterého se navíc cena velmi liší v závislosti na konkrétní aplikaci, nebyl mi výrobce schopen sdělit přesnou cenu pro tento projekt. Odhad je tedy založen na ceně pro podobné projekty, pro které již výrobce elektrolýzér poskytl. [44,57]

¹ Nm³ neboli normovaný metr krychlový. Jedná se o jednotku popisující plyn při teplotě 0 °C a tlaku 1 bar

3.3.2 Zásobník na vodík

V kapitole 2.4 jsem podal teoretický základ k problematice skladování vodíku. Popsal jsem dnes nejvíce využívaný způsob, tedy uskladnění stlačeného vodíku. Rozebral jsem i další dnes již poměrně využívaný způsob s velkou perspektivou do budoucnosti – skladování tekutého vodíku. Pro využití ve zkoumaném systému jsem na základě zjištěných informací vybral zásobník na stlačený vodík. Současně jsem vybral elektrolyzátor, který dokáže vtlačet plyn do zásobníku až pod tlakem téměř 14 barů. Vzhledem k této skutečnosti bylo zapotřebí vybrat takovou tlakovou lahev, která by této hodnotě tlaku odpovídala. Důležitým aspektem také bylo, aby tlaková lahev dokázala dodávat do palivového článku plyn pod dostatečně vysokým tlakem, aby nebylo nutné využít dalšího zařízení v podobě čerpadla. Nejdůležitější však bylo zvolit vhodný objem zásobníku. Jak jsem zmínil v kapitole 3.2.1, v létě prvního roku projektu bude akumulováno 11,64 kWh energie denně (veličina E_{AT} z tabulky 3.4), což znamená, že 7,28 kWh (veličina E_{ND} z tabulky 3.4) z naakumulované hodnoty nebude již možné využít v tento den, tedy zejména v noci, kdy nebude elektrárna vyrábět energii, neboť spotřeba rodinného domu nepokrytá okamžitou výrobou FVE činí pouze 4,36 kWh (veličina E_{NFVE} z tabulky 3.4). Pokud budu uvažovat více po sobě jdoucích průměrných dnů z obr. 3.5, vývoj celkově naakumulované energie bude následující. Po prvním dnu bude naakumulovaná energie činit 7,28 kWh. Druhý den již bude tato hodnota dosahovat 14,56 kWh (součet 7,28 kWh naakumulovaných během prvního dne a 7,28 kWh, které nebyly využity ze dne prvního). Třetí den je již hodnota 21,84 kWh, čtvrtý den 29,12 kWh, pátý den 36,40 kWh, šestý den 43,68 kWh a sedmý den 50,96 kWh. Během této doby již předpokládám alespoň jeden den, kdy bude oproti průměrnému dni více zataženo a dojde ke spotřebování veškeré naakumulované energie. Pro výpočet hustoty vodíku, který bude z elektrolyzátoru proudit do zásobníku, využiji stavovou rovnici pro vodík.

$$p \cdot V = \frac{m}{M_m} \cdot R \cdot T_t \quad (3.1)$$

kde p je tlak vodíku proudícího z elektrolyzátoru, V je jeho objem, m je hmotnost vodíku, M_m je molární hmotnost vodíku, R je molární plynová konstanta a T_t je termodynamická teplota vodíku. Z tabulky 3.5 je zřejmé, že elektrolyzátor vyrábí vodík pod tlakem až 13,8 barů, tedy 1 380 000 Pa. Teplota plynu je přibližně 20 °C, tudíž 293,15 K. Známá je také molární plynová konstanta, kdy $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, a molární hmotnost molekuly vodíku je rovna $M_m = 2,015 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$. [49] Z rovnice 3.1 vyjádřím poměr m ku V , což je vzorec hustoty plynu:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \cdot M_m}{R \cdot T_t} \quad (3.2)$$

kde ρ je hustota vodíku. Po dosazení známých hodnot získám:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1380000 \cdot 2,015 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 293,15} = 1,14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Energie uložená v 1 kilogramu vodíku je přibližně 33 kWh. Vzhledem k účinnosti elektrolyzátoru, která činí 53 % (viz kapitola 3.3.1, tabulka 3.5), se z 50,96 kWh energie dopravené do elektrolyzátoru vyrobí vodík, který ponese energii pouze 27,01 kWh. Tato hodnota pokryje dokonce s dostatečnou rezervou spotřebu domu během jednoho celého dne, pokud by byla domácnost odpojena od přívodu elektrického proudu z distribuční sítě. Kromě výhody v úspoře

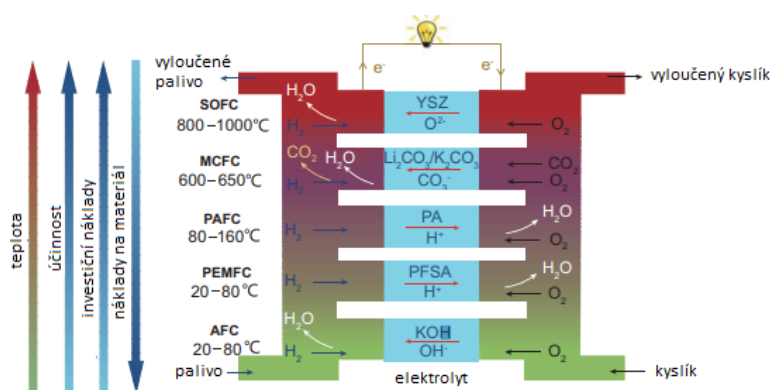
finančních prostředků tedy poskytuje vlastníkovvi systém pro akumulaci elektrické energie další výhodu ve formě krizové zásoby energie v případě výpadku distribuční sítě. Je tedy zapotřebí uložit 0,82 kg vodíku o výše zmíněných vlastnostech. Elektrolyzér má dostatečnou rezervu výkonu k výrobě téměř 150 % této hodnoty denně. Pro akumulaci tohoto množství je nutné při vypočtené hustotě zajistit zásobník, který pojme při tlaku 13,8 barů 717,97 litrů vodíku. Veškerým parametrům nejlépe vyhovovala tlaková lahev MyH2 900, která pojme až 900 litrů vodíku. Poskytuje tudíž ještě dostatečnou rezervu kapacity pro případ, že průměrných dní za sebou bude více než 7. Jedná se o prozatím jediný zásobník na vodík na trhu, který nese označení CE, a je tedy ve shodě s požadavky EU. Současně je výrobek certifikován dle ISO 16111. Technické specifikace zařízení jsou v následující tabulce. [3,48,56]

Tab. 3.6: Specifikace tlakového zásobníku MyH2 900 [48]

Parametr	MyH2 900
Kapacita zásobníku na plyn [l]	900
Objem [l]	1,7
Hmotnost [kg]	6,9
Maximální tlak skladovaného plynu [bar]	30
Výstupní tlak [bar]	5 až 12
Rozměry [cm]	38 x 10
Cena [USD]	4 030,00
Cena [CZK] při kurzu CZK/USD 21,387	86 189,61
Životnost [roky]	20
Ztráty energie [%/den]	0

3.3.3 Palivový článek

V kapitole 2.5 jsem rozebral základní typy používaných palivových článků. Rozdíly v účinnostech a principech funkce jsem již popsal, pro rekapitulaci zde uvedu souhrn popsáných článků.



Obr. 3.8: Souhrn palivových článků [39] (upraveno)

Z rekapitulačního obrázku vyplývá, že se zvyšující se teplotou roste účinnost (není třeba využívat přidružené zařízení spotřebovávající elektrickou energii) a také investiční náklady, neboť je nutné investovat do materiálů, které musí odolat vysokým teplotám. Naopak náklady na další materiály (katalyzátor v podobě drahých kovů) nejsou při vysokých teplotách potřeba, se snižující se teplotou tedy tyto náklady rostou. Na základě veškerých výhod a nevýhod jsem zvolil do projektu palivový článek s technologií PEM, neboť tuto technologii využívá i

elektrolyzér. Jako ideální variantu jsem zvolil palivový článek GreenHub 2 - 1000. Technické parametry daného palivového článku jsou v následující tabulce.

Tab. 3.7: Specifikace palivového článku GreenHub 2 - 1000 [58]

Parametr	GreenHub 2 - 1000
Verze	DC
Výkon [kW]	0,9
Hmotnost [kg]	40
Čistota vodíku [%]	99,995
Maximální spotřeba vodíku [$l \cdot min^{-1}$]	14
Spotřeba vody [$l \cdot h^{-1}$]	0,47
Tlak vodíku [bar]	6 - 25
Rozměry [cm]	40 x 60 x 25
Cena [USD]	12 269,00
Cena [CZK] při kurzu CZK/USD 21,387	262 397,10
Životnost [roky]	20
Účinnost přeměny vodíku [%]	51

Parametry palivového článku jsou kompatibilní s elektrolyzérem i zásobníkem vodíku.

3.4 Varianta 1B – akumulace do vodíku (krátkodobá)

V této variantě bude vodík využit pouze pro akumulaci menšího množství energie, přibližně 10 kWh. Parametry FVE jsou stejné jako v případě varianty 1A, tedy 24 kusů fotovoltaických panelů. Elektrolyzér i palivový článek jsou též stejné, neboť i výkon FVE zůstává stejný. Změní se pouze kapacita zásobníku na vodík. Totožné zůstávají i veškeré další komponenty systému jako wattrouter, měnič a podobně. Z výsledků kritérií ekonomické efektivnosti touto změnou akumulační kapacity zjistím, jak projekt reaguje na velikost akumulačního zařízení, a tedy zda se akumulace do vodíku hodí spíše pro dlouhodobou či krátkodobou akumulaci.

3.4.1 Změny oproti variantě 1A

Jak bylo psáno výše, komponenty systému jsou stejné jako ve variantě 1A. Každý den tedy bude do elektrolyzéro přivedeno 11,64 kWh energie, která bude s uvažovanou účinností přetransformována na vodík. Určitá část energie bude využita ještě v noci téhož dne (4,36 kWh dle tabulky 3.4), uloženo na delší dobu tedy zůstane 7,28 kWh energie vyrobené v tento den.

Dle kapitoly 3.3.2 má vodík nesoucí energie 27,01 kWh při zadaných vnějších podmínkách objem 717,97 litrů. Pro uložení přibližně 10 kWh, které jsem zvolil jako hodnotu optimální pro krátkodobou akumulaci, je tedy zapotřebí uložit 265,82 litrů stlačeného vodíku. Jako tlakovou lahev využiji pro tuto variantu výrobek od stejné firmy jako v případě varianty 1A, ovšem s menší kapacitou. Jedná se o zásobník MyH2 300, který také nese označení CE, a je tedy ve shodě s požadavky EU. Současně je výrobek certifikován dle ISO 16111. Finanční úspora zakoupením menšího zásobníku oproti většímu činí 31 267,79 CZK. Na první pohled je zřejmé, že úspora je vzhledem k výši počáteční investice poměrně malá. Lze tedy očekávat, že vliv na výslednou rentabilitu projektu také nebude příliš velký. Vypočtená kritéria ekonomické efektivnosti jsou vysvětlena a rozebrána v kapitole 5. V následující tabulce jsou zaneseny

podobně jako v případě většího zásobníku technické údaje. Důležitý je zejména objem a cena zásobníku. [75]

Tab. 3.8: Specifikace tlakového zásobníku MyH2 300 [75]

Parametr	MyH2 300
Kapacita zásobníku na plyn [l]	300
Objem [l]	0,55
Hmotnost [kg]	2,4
Maximální tlak skladovaného plynu [bar]	30
Výstupní tlak [bar]	5 až 12
Rozměry [cm]	31,5 x 7
Cena [USD]	2 568,00
Cena [CZK] při kurzu CZK/USD 21,387	54 921,82
Životnost [roky]	20
Ztráty energie [%/den]	0

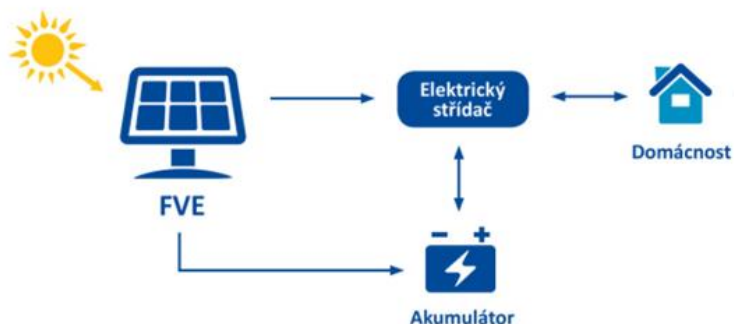
Celkově za týden provozu bude nadvýroba činit dle kapitoly 3.3.2 81,48 kWh (7 krát 11,64 kWh). To znamená, že vzhledem ke kapacitě zásobníku, která je 300 litrů, je možné do vodíku uložit pouze 11,29 kWh týdně. Zbytek hodnoty nadvýroby je nutné využít jiným způsobem. V tomto případě se jeví jako ideální možnost prodej těchto přebytků do sítě. Jelikož je rodinný dům odběratelem elektrické energie od společnosti ČEZ Prodej a.s., je možné využít výkupních cen od této společnosti. Výkup elektřiny z výrobních zdrojů s instalovaným výkonem pod 100 kW je podmíněn právě dodávkou elektřiny od společnosti ČEZ. Cena výkupu elektřiny z FVE v takovém případě pak činí 500 CZK/MWh, po přepočtu tedy 0,5 CZK/kWh. [76]

Aby šel tento proces snáze zahrnout do výpočetního modelu, přijal jsem zjednodušující předpoklad a týdenní hodnoty akumulované a prodané energie jsem přepočítal na denní hodnoty. Denně tedy bude teoreticky přivedeno 5,97 kWh (4,36 kWh, které budou využity ještě v noci téhož dne a 1,61 kWh, tedy sedmina z 11,29 kWh, které budou akumulovány dlouhodoběji) do elektrolyzéry a 5,67 kWh prodáno do sítě. Suma těchto dvou hodnot činí 11,64 kWh, což je hodnota, o kterou denně převyšuje výroba FVE nad spotřebou rodinného domu. Tento předpoklad zanesení do modelu chybu, neboť v praxi dojde nejprve k naplnění zásobníku a následující dny k prodeji většiny energie do sítě. Takto zanesená chyba je však minimální a tudíž zanedbatelná.

3.5 Varianta 2A – akumulace do baterií (dlouhodobá)

V tomto případě budou přebytky z FVE akumulovány do klasických lithiových baterií. Olověné baterie nejsou pro tuto aplikaci vhodné vzhledem k mnohonásobně nižší životnosti a také skutečnosti, že lze efektivně využívat pouze polovinu kapacity baterie. Systém akumulace do lithiových baterií je v dnešní době běžně využíván, a proto jsem ho zvolil pro porovnání s akumulací do vodíku. Na rozdíl od ukládání energie z přebytků do teplé vody, což je také velmi rozšířený způsob, neprobíhá akumulace do tepelné energie, ale do energie chemické. Nevýhodou použití baterií je existence permanentního malého samovybíjení, dle výrobce přibližně 8 % měsíčně. To znamená, že během skladování dojde ke ztrátě malého množství akumulované energie. Jelikož je však zkoumaný systém navržen tak, že většina energie je využita během několika málo dní, je tento úbytek mnohem menší. Schéma systému s baterií je na následujícím obrázku. Jak je patrné ze schématu, kompletní systém pro akumulaci do vodíku,

jenž je sestaven z elektrolyzéry, zásobníku a palivového článku, je nahrazen baterií (v případě varianty 2A konkrétně 3 kusy baterií). Více informací dále v textu. [62,64]



Obr. 3.9: Schéma systému pro akumulaci přebytků z FVE baterií [42] (upraveno)

Výběr vhodné baterie je v následující kapitole.

3.5.1 Baterie

Jak bylo podrobněji rozebráno v kapitole 3.3.2, systém akumulace je nastaven tak, aby poskytoval vlastníkově krizovou zásobu energie v případě výpadku dodávky z distribuční sítě. Pro správné porovnání obou zkoumaných variant je zapotřebí zajistit, aby i v bateriích bylo možné akumulovat dostatek energie pro zajištění spotřeby domácnosti na jeden den, tedy přibližně 27,01 kWh. Jako nejvhodnější jsem zvolil baterii LG Chem Resu 10H s jmenovitou kapacitou 9,8 kWh. Využitelná kapacita činí 9,3 kWh. Při zvažování celkové účinnosti baterie 85 % (kdy účinnosti nabíjení je 92 % a účinnost vybíjení také 92 %), má jedna baterie skutečně využitelnou kapacitu 8,56 kWh. Ideálním řešením je tedy využití 3 lithiových akumulátorů LG Chem Resu 10H, neboť takový systém poskytne uživateli kapacitu až 25,67 kWh, což je hodnota srovnatelná s hodnotou energie uložené v rámci varianty 1A ve vodíku. Kapacita baterie po 2 000 plných cyklech klesne na 80 % původní kapacity. Zde jsem zavedl zjednodušující předpoklad, že každým rokem klesne kapacita o 1 % z původní hodnoty. Celková životnost baterie je potom 10 000 cyklů, což znamená v provozu s FVE až 20 let. V následující tabulce jsou technické parametry daného akumulátoru. [63]

Tab. 3.9: Specifikace baterie LG Chem Resu 10H [63]

Parametr	LG Chem Resu 10H
Výkon [kW]	5
Jmenovitá kapacita [kWh]	9,8
Využitelná kapacita [kWh]	9,3
Hmotnost [kg]	97
Rozsah napětí [V]	350 - 450
Životnost [cykly]	10 000
Životnost [roky]	2
Rozměry [cm]	90,7 x 74,4 x 20,6
Celková účinnost [%]	85
Ztráty akumulované energie [%/měsíc]	8
Ztráty akumulované energie [%/den]	1
Cena [EUR]	5 828,87
Cena [CZK] při kurzu CZK/EUR 26,245	152 978,69

3.6 Varianta 2B – akumulace do baterií (krátkodobá)

Podobně jako v případě varianty 1 jsem do porovnávání zavedl i krátkodobou akumulaci do baterií. Všechny komponenty systému jsou stejné jako ve variantě 2B, ovšem místo do tří kusů akumulátorů LG Chem Resu 10H akumulace probíhá pouze do jednoho kusu. Spolu s počáteční investicí se však sníží také množství energie, které bude možné uchovávat po delší dobu v bateriích. Účelem této varianty je opět prozkoumat vliv velikosti akumulačního systému na rentabilitu projektu. V tomto případě lze očekávat, že vliv bude podstatně větší, než u varianty 1A, respektive 1B.

3.6.1 Změny oproti variantě 2A

Kapacita baterie, kterou je zapotřebí během jednoho týdne naplnit, činí 9,3 kWh. Opět v rámci zjednodušujícího předpokladu bude tedy denně akumulována jedna sedmina z této hodnoty, tedy 1,33 kWh a další 4,36 kWh, které budou využity ještě během noci téhož dne (celkem tedy 5,69 kWh). Z 11,64 kWh, které FVE vyrobí a rodinný dům nespotřebuje během jednoho dne, tedy bude zbývat 5,95 kWh, jež bude nutné prodat do sítě. Tento přijatý předpoklad způsobí minimální chybu v modelu, která je však stejně jako v případě varianty 1B zanedbatelná. Investicí do jednoho akumulátoru místo tří dojde k snížení celkové počáteční investice o cenu dvou akumulátorů, tedy o 305 957,38 CZK.

3.7 Varianta 3 – prodej přebytků do sítě

V rámci této varianty nebude provedena investice do žádného akumulačního zařízení. K prodeji energie do distribuční sítě dochází i ve variantě 1B a 2B, kde jsou prodávány ty přebytky, pro které již není volná kapacita v akumulačním zařízení. Varianta 3 však počítá s prodejem veškerých přebytků do distribuční sítě za podmínek popsanych v kapitole 3.4.1. Prodej bude řídit wattrouter. Tento komponent je součástí všech variant, neboť pomocí wattrouteru dochází k řízení spotřeby elektrické energie.

3.8 Prvky systému společné pro obě varianty

Některé prvky jsou využitelné pro obě porovnávané varianty. Stejně jsou fotovoltaické panely, které již byly popsány, a také další komponenty, kterým věnuji prostor v následujících kapitolách.

3.8.1 Wattrouter

Pomocí této součástky bude řízena spotřeba elektrické energie. Současně WATTrouter dokáže zabránit nechtěným přetokům do sítě, které dle nařízení ERÚ mohou být penalizovány. Zvolil jsem WATTrouter ECO s proudovým rozsahem měření 3x20 A a trvalým zatížením až 3x40 A. Cena jednoho kusu je 5 433 Kč s DPH. Životnost tohoto wattrouteru je 20 let. Tuto položku není třeba v průběhu projektu zakoupit novou, její doba životnosti je dostatečná. [60]

3.8.2 Měníč

Jelikož palivový článek i samotná fotovoltaická elektrárna dodává stejnosměrný proud, je nutné ho v měniči transformovat na střídavý. Pro přiznání dotace bylo nezbytné zvolit měnič s minimální účinností 94 % a schopností sledovat bod maximálního výkonu MPPT s minimální účinností 98 %. Výběr měniče závisí na množství panelů a tedy výkonu, který je na střeše instalován. Po posouzení parametrů jsem zvolil do systému beztransformátorový měnič Fronius PRIMO 4.6-1. Oproti ostatním typům měničů je tento poněkud dražší. To je dáno skutečností, že se jedná o hybridní měnič, který dokáže spravovat akumulaci do baterií. Životnost měniče jsem stanovil na 10 let, měnič tedy bude v průběhu investice kupován znovu nový. V následující tabulce jsou technické parametry měniče, který je pro projekt zkoumaný v této diplomové práci vhodný. [59]

Tab. 3.10: Specifikace měniče Fronius PRIMO 4.6-1 [59]

Parametr	Fronius PRIMO 4.6-1
Záruka výrobce [roky]	7
Maximální vstupní výkon [kW]	6,9
Maximální výstupní výkon [kW]	6,9
Jmenovitý vstupní výkon [kW]	4,6
Hmotnost [kg]	22
Účinnost [%]	98
Maximální vstupní proud [A]	12
Maximální výstupní proud [A]	20
Maximální vstupní napětí [V]	1 000
Životnost [roky]	10
Cena [EUR]	1 234,08
Cena [CZK] při kurzu CZK/EUR 26,245	32 388,43

3.5.3 Čtyřkvadrantní elektroměr

Zvolili jsme třífázový statický čtyřkvadrantní elektroměr ZMG410CR4.2607.03, na který je vydáno prohlášení o shodě dle MID. Cena toho elektroměru je 9 425 Kč s DPH a elektroměr disponuje životností 20 let. [61]

Kapitola 4

Stanovení ekonomických parametrů

Pro smysluplné výsledky modelu je nutné nastavit takové vnější ekonomické parametry, které odpovídají reálným podmínkám. Některé parametry jsou dány zákonem, jiné jsou předmětem odborných dlouhodobých odhadů a další je nutné odhadnout na základě vlastních posudků a úvah. Všechny ekonomické parametry odráží skutečný stav ekonomiky daného státu. Samozřejmě nelze s jistotou konstatovat přesné hodnoty předpovědí ekonomických parametrů, přičemž důležitou roli hraje pravděpodobnost, s jakou tyto parametry mohou nastat. Vyhodnocení investice provedu pro nejvíce reálný a pravděpodobný vývoj ekonomické situace v ČR. Zejména vzhledem k pandemii způsobené onemocněním COVID-19, která se České republiky významně dotýká již od března roku 2020, jsou predikce ohledně budoucího vývoje ekonomiky státu velmi obtížné a je možné, že skutečnost se bude od prognóz lišit. Z toho důvodu jsem podrobil všechny důležité parametry citlivostním analýzám, které investorovi podají informaci o tom, který parametr je pro investici důležitý a který nikoliv. Současně lze z citlivostních analýz zjistit, zda určitá změna daného parametru mění rozhodnutí do projektu investovat. Následuje diskuze, jež řeší, s jakou pravděpodobností taková změna může nastat.

V následujících odstavcích podám informace o stanovení doby životnosti projektu, inflace, diskontu, ceny elektrické energie a její eskalace, způsobu financování projektu a také ostatních nákladů.

4.1 Doba životnosti

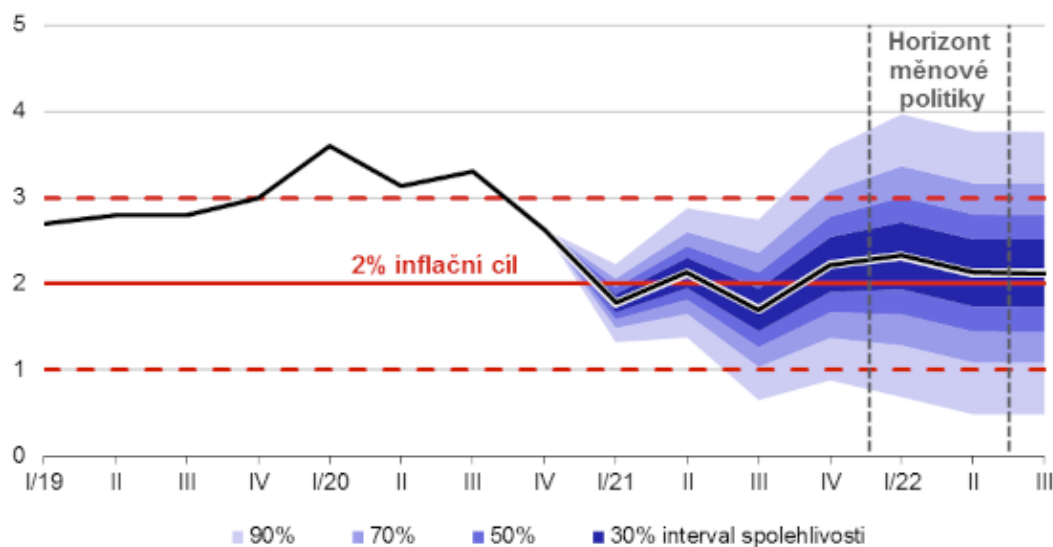
Stanovení doby životnosti projektu je prvním krokem pro úspěšné dokončení modelu. Z hlediska legislativy i povahy projektu je optimální volbou stanovit dobu životnosti projektu na 20 let. Většina součástí systému má dobu životnosti dostatečně dlouhou, aby v průběhu projektu nebylo nutné reinvestovat do jejich výměny. Výjimkou je například měnič, jenž je nezbytný pro obě porovnávané varianty a který má životnost pouhých 10 let. Na konci 10 roku projektu je tedy nutné koupit měnič nový. I po konci doby životnosti projektu je možné počítat se stále fungující FVE, neboť záruka výrobce na elektrický výkon panelu je 30 let. To znamená, že i po uplynutí doby 20 let je možné ještě minimálně 10 let využívat elektřinu vyrobenou elektrárnou na provoz elektrických spotřebičů bez akumulace. Tato skutečnost však není v rámci modelu vyčíslena, a tedy ani zahrnuta do výpočtu.

4.2 Inflace

Inflace je opakovaný růst cen většiny zboží v ekonomice dané země. Jedná se tudíž o oslabení reálné hodnoty měny vůči službám a produktům, tedy o oslabení kupní síly obyvatelstva. Inflace je nejčastěji vyjadřována v procentních bodech za rok. Tento parametr je z části pod kontrolou České národní banky (dále ČNB). Ta může růst inflace zvýšit vydáním více

peněz do oběhu, a tudíž znehodnocením stávajících peněz obyvatel, či snížit odebráním části peněz z oběhu. Pokles růstu inflace je označován jako dezinflace, opakem inflace je deflace. V rámci našeho modelu jsou inflací ovlivněny ceny součástí systému pro akumulaci. Ve výpočtu tedy nezohledňuji pravděpodobný pokles cen komponentů systému pro akumulaci elektrické energie. Ceny součástek systému, do jejichž obnovy je nutné v průběhu projektu reinvestovat, jsou tudíž zatíženy inflací. [66]

Vzhledem ke skutečnosti, že ČNB provádí měnovou politiku v režimu cílování inflace, je možné dohledat oficiální prognózy. Dlouhodobý inflační cíl činí 2 %. Na následujícím obrázku je vidět průběh inflace v ČR od počátku roku 2019 spolu s predikcí až do třetího kvartálu roku 2022.



Obr. 4.1: Inflace v ČR od 1Q/2019 do 4Q/2022 [67]

Pro první čtvrtletí roku 2022 činí odborný odhad 2,3 %. Pro druhé čtvrtletí je odhadovaná inflace 2,1 %. Vzhledem k době životnosti projektu, která je 20 let, je vhodné zvolit pro neutrální scénář inflaci v hodnotě 2 %, což je hodnota totožná s dlouhodobým inflačním cílem ČNB. Je důležité dodat, že ne všechny produkty a služby v zemi jsou ovlivněny pouze inflací. Ceny komodit jako například ropy, zemního plynu, půdy či v tomto projektu důležité elektrické energie jsou v rámci svých trhů ovlivněny mnohými dalšími faktory. Proto je eskalace ceny elektrické energie rozebrána v rámci samostatné podkapitoly 4.5.

4.3 Diskont

Správně nastavená diskontní sazba odráží náklady příležitosti kapitálu pro investora. Za tyto náklady je považován ušlý výnos z nejlepšího alternativního projektu. Vzhledem ke skutečnosti, že investorem je v tomto projektu rodina, je seznam alternativních projektů poměrně omezený. Možnosti, do kterých rodina může investovat, záleží na postoji rodiny k riziku. Nejméně výnosnou možností s nejmenším rizikem jsou spořicí účty, jejichž roční zhodnocení je u bankovních společností k roku 2021 téměř výlučně pod hodnotou 1 %. Vzhledem k časovému horizontu investice, tedy 20 let, je možné investovat také do dluhopisových či akciových fondů, které nabízí vyšší výnos za vyššího rizika. Přesná analýza investičního profilu rodiny však není pro tuto práci zásadní a ideální je tedy zvolení diskontu dle

zvolené inflace, přičemž diskont je o 1 % bod nad inflací. V případě tohoto projektu bude tedy referenční diskontní sazba pro kapitál rodiny 3 %. [68]

4.4 Cena elektrické energie

Rodinný dům je připojen k distribuční síti. Dodavatelem elektrické energie je společnost ČEZ Prodej, a.s. Cena elektrické energie vychází ze skutečné faktury objektu za rok 2019. Tato faktura je vložena do Přílohy B na list Spotřeba elektrické energie. Z faktury vyplývá, že v roce 2019 činila spotřeba rodinného objektu 8 588 kWh, přičemž celková fakturovaná částka byla 23 706,05 CZK bez DPH (tedy 28 684,32 CZK s DPH). Z těchto dat jsem vypočítal cenu za 1 kWh elektrické energie na hodnotu 3,34 CZK/kWh. Rodinný dům využívá nízkého i vysokého tarifu, avšak pro výpočty v rámci modelu není třeba tyto tarify rozlišovat.

Celkové náklady na elektrickou energii se však skládají z nákladů variabilních a fixních. Celkovou sumu, kterou investor ušetří investicí do FVE a akumulárního systému, tedy není možné počítat jako součin ušetřené energie a její celkové ceny, avšak pouze jako součin celkové ušetřené elektrické energie a ceny bez fixních nákladů. Fixní náklady musí investor platit bez ohledu na to, zda investici do FVE podnikl či nikoliv. V následující tabulce jsou rozepsány veškeré částky z faktury, ze kterých je vypočtena fixní a variabilní cena elektrické energie za období od 21.11.2018 do 19.11.2019.

Tab. 4.1: Výpočet fixních a variabilních nákladů na elektrickou energii

Analýza ceny elektřiny – všechny ceny bez DPH				Distribuční sazba D26D			
Regulované platby související s dodávkou elektřiny							
Fixní náklady				Variabilní náklady			
Položka	Počet měsíců	Kč/měsíc	Celkem Kč	Položka	Počet MWh	Kč/MWh	Celkem Kč
Stálý měsíční plat za příkon	12	221,92	2663,05	Spotřeba VT	3,043	665,11	2023,94
Cena za činnosti operátora na trhu	12	6,74	80,89	Spotřeba NT	5,545	94,55	524,26
				Cena za systémové služby	8,588	78,54	674,54
				Cena za podporu OZE	8,588	495,00	4251,07
Platby za silovou elektřinu							
Fixní náklady				Variabilní náklady			
Položka	Počet měsíců	Kč/měsíc	Celkem Kč	Položka	Počet MWh	Kč/MWh	Celkem Kč
Pevná cena za měsíc	12	72,38	868,56	Spotřeba VT	3,043	1611,46	4903,66
				Spotřeba NT	5,545	1347,71	7473,04
Daň z elektřiny							
Fixní náklady				Variabilní náklady			
				Položka	Počet MWh	Kč/MWh	Celkem Kč
				Daň z elektřiny	8,588	28,30	243,04
Fixní náklady celkem	3612,50	Variabilní náklady celkem	20093,55	Celkové náklady	23706,05		
Celková spotřeba za rok			8588 kWh				
Cena za kWh (bez DPH) bez fixních nákladů			2,34 Kč				
Cena za kWh (bez DPH) s fixními náklady			2,76 Kč				
Cena za kWh (s DPH) bez fixních nákladů			2,83 Kč				
Cena za kWh (s DPH) s fixními náklady			3,34 Kč				

4.5 Eskalace ceny elektrické energie

Dlouhodobá predikce tržních cen je velmi obtížná úloha. V žádném případě nelze vycházet z cen historických a aplikovat tempo růstu z minulosti do budoucnosti. Postupné zvyšování či snižování cen elektrické energie je podmíněno několika faktory. V následujících řádcích se jim podrobněji věnuji.

- Určitá závislost českého trhu s elektrickou energií na trhu německém může vyústit po odstavení německých jaderných a později také uhelných elektráren ve snížení nabídky. To pravděpodobně povede ke zvýšení ceny elektrické energie. [69]
- EU vyhlásila před pandemií onemocnění COVID-19 investice ve výši 1 bilion EUR do zelené energie. Posléze oznámila další 1 bilion EUR investic do obnovy ekonomik členských zemí. Tyto obnovy budou také vedeny v rámci zelené energie. Budoucí nabídka těmito kroky vzroste. To pravděpodobně vyústí ve snížení ceny elektrické energie. [69]
- Ceny fosilních paliv porostou vlivem ekologických tlaků a aktivit. To pravděpodobně vyústí ve zvýšení ceny elektrické energie, neboť fosilní paliva jsou stále značně využívána k výrobě elektřiny. [70]
- Ceny emisních povolenek také soustavně rostou. V červnu 2020 byla cena emisní povolenky přibližně 22 EUR/t CO₂. Závěrná cena futures kontraktu na emisní povolenku s dodávkou v prosinci 2021 však dosáhla již na hodnotu téměř 35 EUR/t CO₂. Analytici ze společnosti Refinitiv očekávají růst cen emisních povolenek až na hodnotu 89 EUR/t CO₂ v roce 2030. To pravděpodobně vyústí ve zvýšení cen elektrické energie. [70,71]

Na základě výše uvedených skutečností a odborných odhadů jsem usoudil, že tempo růstu ceny elektrické energie bude vyšší než inflace. Konkrétně jsem tedy eskalaci ceny elektrické energie stanovil na 3 % ročně.

4.6 Financování projektu

Jelikož jsem ekonomický model počítal z pohledu investora, bylo nutné vzít v úvahu i financování projektu. Z rozboru systému pro akumulaci energie do vodíku v předchozích kapitolách vyplývá, že se jedná o investici v řádu stovek tisíc až jednotek milionů korun. Po diskuzi s majitelem nemovitosti, který je zároveň investorem, jsme došli k závěru, že by k financování projektu chtěl investor využít naspořené prostředky. Tyto prostředky postačí na pokrytí 85 % nejdražší investice (tedy varianty 1A). Pro dodržení stejného principu jsem se rozhodl financovat z 15 % cizím kapitálem i ostatní varianty. Považuji za důležité do modelu zahrnout i možnost využití cizího kapitálu, neboť zaplatit takovou sumu z vlastních prostředků je pro mnoho rodin v ČR nemožné. Financování cizím kapitálem jsem také podrobněji analyzoval v citlivostních analýzách.

V rámci výpočtu podmínek hypotéky jsem využil kalkulaci od finančního poradce, který pro nejdražší variantu 1A porovnal všechny dostupné banky poskytující hypoteční úvěry (Česká spořitelna, Hypoteční banka, Komerční banka, mBank, MONETA Money Bank, Raiffeisenbank, Sberbank a UniCredit Bank). Doba splácení je nastavena na 20 let, což je také doba porovnávání projektů. Zvolil jsem fixaci úroku hypotečního úvěru na 10 let. S touto dobou fixace je spojený zjednodušující předpoklad, tedy že očekávám stejnou hodnotu úroku i na dalších 10 let splácení

po uplynutí první fixační doby. Dále předpokládám, že investor má dostatečnou bonitu, aby splnil podmínky pro přiznání úvěru. V následující tabulce jsou parametry výsledné kalkulace pro nejvýhodnější úvěr. V příloze D je přehledné porovnání 3 nejlepších bank pro variantu 1A. Pro ostatní varianty jsem zvolil stejné podmínky jako v případě varianty 1A (u méně nákladných variant by financování nebylo řešeno hypotečním úvěrem, nýbrž klasickou půjčkou, parametry jako například úrok a doba splácení však zůstaly totožné).

Tab. 4.2: Parametry hypotečního úvěru

Výše úvěru	Banka	Úrok	Fixace	Poplatek za vyřízení	Poplatek za vedení	Zpoplatněná čerpání	Čerpání na návrh na vklad
191 531 CZK	UniCredit Bank	2,29 %	10 let	2 900 CZK	0 CZK	2. a další (900 CZK)	1 900 CZK

Z kalkulace vyplývají i další náklady na hypoteční úvěr (poplatky za vyřízení, za vedení a podobně). Těmto ostatním nákladům věnuji prostor v kapitole 4.8 Ostatní náklady.

4.7 Vážená cena kapitálu

Vzhledem ke skutečnosti, že financování projektu je vyřešeno z části vlastními úsporami investora a z části cizími zdroji, je nutné vypočítat finální verzi diskontu pro celý projekt. K tomuto účelu slouží veličina WACC (Weighted Average Cost of Capital), neboli vážená cena kapitálu. Obecný vzorec pro výpočet je následující:

$$WACC = r_e \cdot \frac{E}{C} + r_d \cdot \frac{D}{C} \cdot (1 - d) \quad (4.1)$$

kde WACC je vážená cena kapitálu, E je objem vlastní kapitálu, D je objem cizího kapitálu, r_e jsou náklady na vlastní kapitál (tedy diskont stanovený v kapitole 4.3), r_d vyjadřuje náklady na cizí kapitál (úrok hypotéky získaný v kapitole 4.6) a d je daň z příjmu. Jelikož však investor v tomto projektu je fyzická osoba, která si zaplacenými úroky nesníží základ pro výpočet daně z příjmu, je hodnota d v tomto případě rovna nule. Po dosazení hodnot pro variantu 1A do vzorce 4.1 získáme:

$$WACC = 0,03 \cdot \frac{1\,085\,343}{1\,276\,874} + 0,0229 \cdot \frac{191\,531}{1\,276\,874} \cdot (1 - 0) = 2,89 \%$$

Protože poměr vlastního ku celkovému kapitálu a poměr cizího ku celkovému kapitálu je pro všechny varianty stejný a nemění se ani diskont a úroková sazba, je vážená cena kapitálu pro všechny varianty konstantní, tedy 2,89 %.

4.8 Ostatní náklady

S realizací projektu je spojeno mnoho administrativní práce. Z programu Nová zelená úsporám je možné čerpat dotaci ve výši 5 000 CZK na vypracování odborného posudku. Tato dotace pokryje veškeré administrativní náklady spojené s přiznáním dotace. Další náklady jsou spojené s přiznáním hypotečního úvěru. Z Obr. 4.2 je zřejmé, že poplatek za vyřízení je roven

2 900 CZK a poplatek za vedení úvěru je 0 CZK. Zpoplatněné částkou 900 CZK je druhé a každé další čerpání, ovšem tato položka se zkoumaného projektu netýká, neboť reinvestice v průběhu porovnávání projektu na nákup nařízení s kratší dobou životností než 20 let je financována z vlastních zdrojů. Zpoplatněno je také čerpání na návrh na vklad, konkrétně částkou 1 900 CZK. Všechny poplatky, které je nutné započítat do ekonomického modelu, jsou ve výpočtu obsaženy v položce Ostatní (viz Příloha B, list Technické údaje)

Do dalších nákladů je třeba počítat i náklady na pojištění FVE a akumulčního systému. Takové pojištění je velmi důležité z hlediska prevence rozsáhlých nákladů při poruše, která by vyústila ve škody na samotném akumulčním systému i na ostatním majetku a samotném rodinném domě. Cenu takového neživotního pojištění jsem na základě konzultace s finančním poradcem odhadl na 500 CZK ročně.

S provozem FVE a akumulčního systému jsou spojené také náklady na pravidelnou revizi dle normy ČSN EN 62446:2010. Revizi fotovoltaické elektrárny certifikovaných revizním technikem je nutné absolvovat minimálně jednou za dva roky. Cena revize elektrárny do 10 kWp je dle společnosti ALL4EL s.r.o. 2 500 CZK bez DPH. Při započítání sazby daně z přidané hodnoty, která činí u této služby 15 %, činí finální cena za revize 2 785 CZK. [73,74]

4.9 Přiznaná dotace z programu Nová zelená úsporám

V tabulce 2.1 jsou zanesené základní energetické podmínky pro udělení dotací v různých výších. Jelikož projekt ve variantě akumulace do vodíku i do baterií, který je popsán v kapitolách výše, disponuje celkovým využitím přesahujícím 4 000 kWh za rok, je možné získat nejvyšší možnou dotaci, která činí 150 000 CZK. Jedná se o jednorázovou finanční podporu, která o zmíněnou sumu sníží počáteční investiční náklady. Dotaci na variantu 3 není možné využít.

Kapitola 5

Ekonomické hodnocení variant

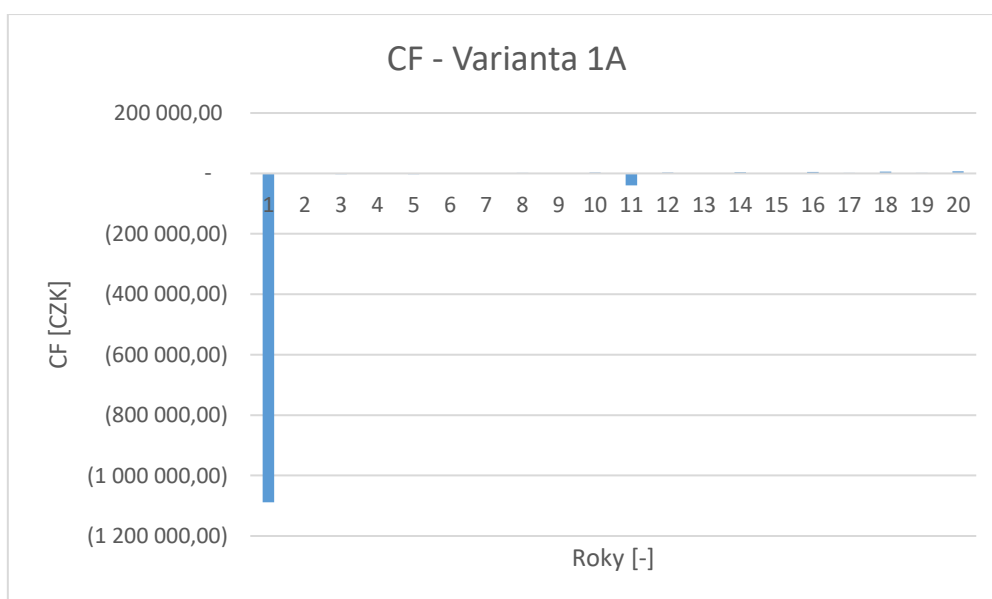
Pro všechny zkoumané varianty (1A, 1B, 2A, 2B, 3) jsem vypočítal ekonomická kritéria, která jsem zmínil již v kapitole Motivace a cíl práce. Jedná se o čistou současnou hodnotu (NPV), vnitřní výnosové procento (IRR), prostou dobu návratnosti (T_n) a diskontovanou dobu návratnosti (T_{nd}). Důležitým parametrem, na základě kterého následoval výpočet výše zmíněných ekonomických kritérií, bylo cash flow (neboli hotovostní tok) projektu. Podrobněji jsem informace k výpočtům rozebral v následujících kapitolách.

5.1 Cash flow

Cash flow, neboli hotovostní tok, vyjadřuje rozdíl příjmů a výdajů v daném roce. Vzorec pro výpočet hotovostního toku je tedy následující:

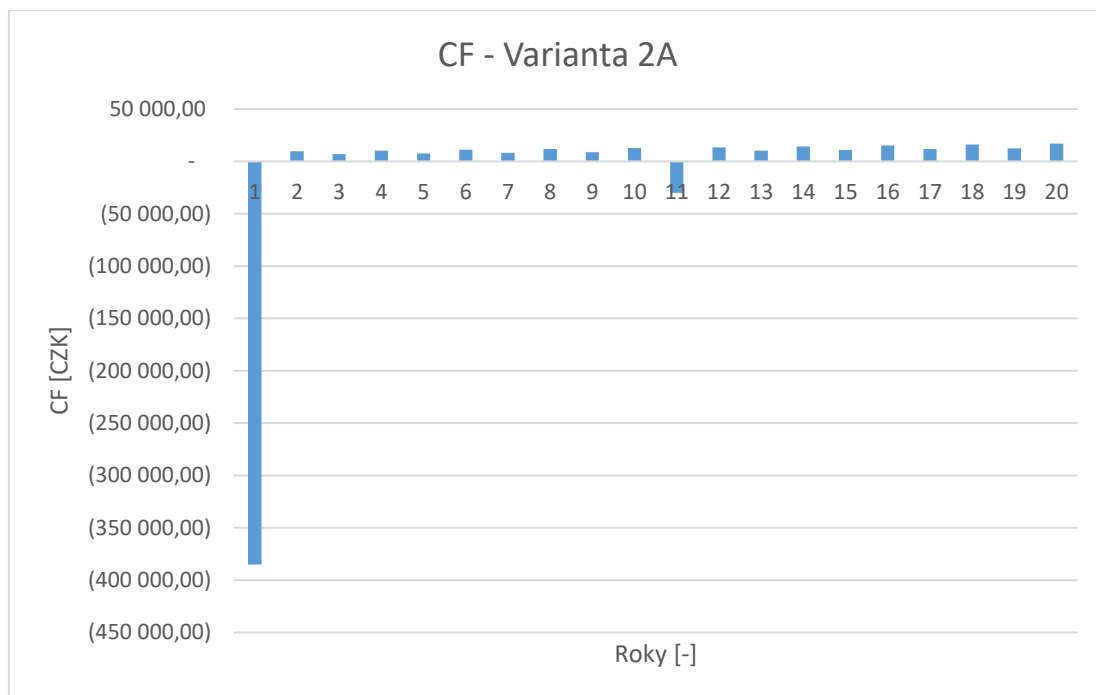
$$CF_t = P_t - V_t \quad (5.1)$$

kde CF_t je hotovostní tok v roce t , P_t jsou příjmy v roce t a V_t jsou výdaje v roce t . V případě tohoto projektu jsou příjmy následující: příjmy z uspořené energie (tedy úspora výdajů na elektrickou energii), příjmy z prodané elektrické energie do distribuční sítě, příjmy z dotací a příjmy z půjček. Jako výdaje vystupují: investiční výdaje, výdaje na úrok a úmor půjčky a výdaje na revizi a pojištění. Na následujících obrázcích jsou graficky znázorněné hotovostní toky pro všechny varianty za dobu porovnávání projektů, tedy za 20 let. Při hodnocení investice samozřejmě požadujeme maximální CF.



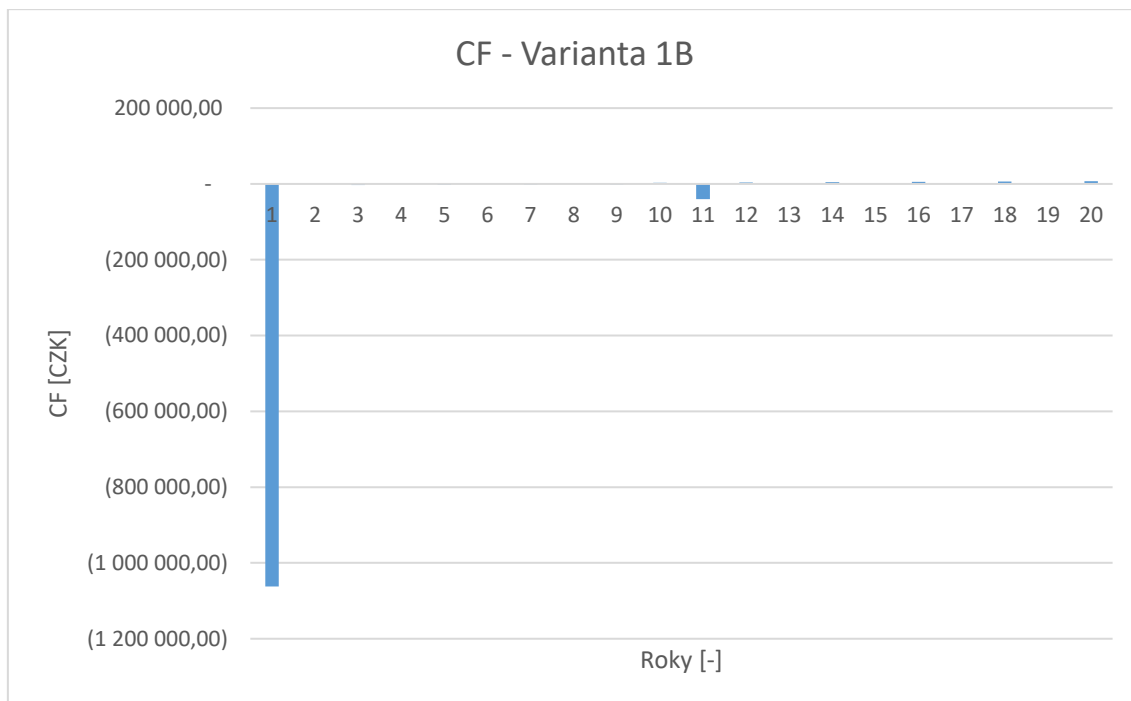
Obr. 5.1: Přehled hotovostních toků pro variantu 1A

Z Obr. 5.1 vyplývá, že výše kladných hotovostních toků je téměř zanedbatelná vzhledem k výši počáteční investice. Na obrázku 5.2 je přehled hotovostních toků variantu 2A.



Obr. 5.2: Přehled hotovostních toků pro variantu 2A

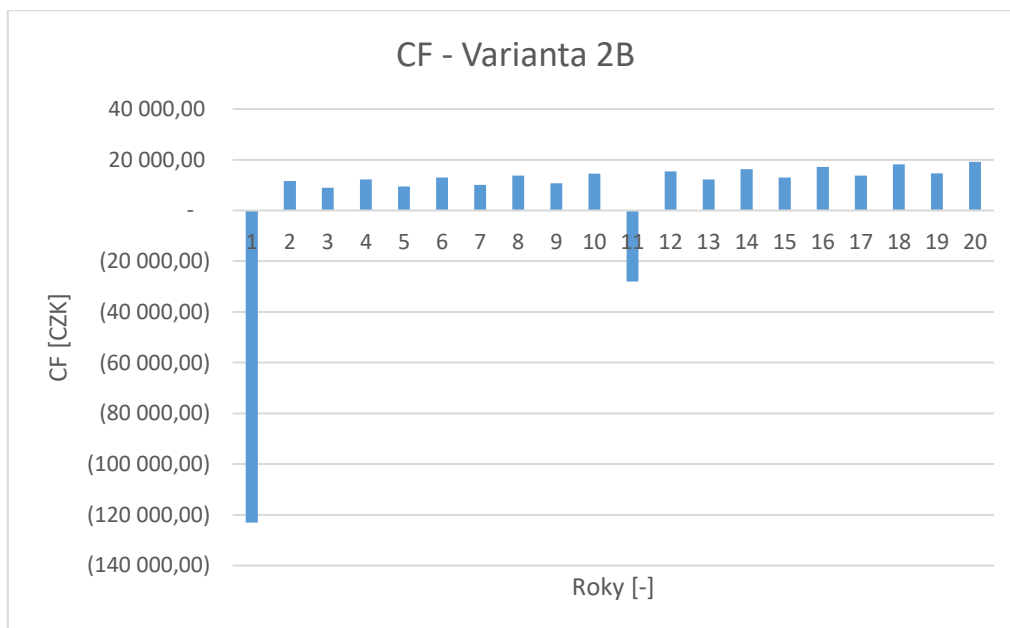
Z grafu vyplývá, že poměr kladných cash flow ku počáteční investici je podstatně větší, než v případě varianty 1A. Na následujícím obrázku jsou znázorněny hotovostní toky varianty 1B.



Obr. 5.3: Přehled hotovostních toků pro variantu 1B

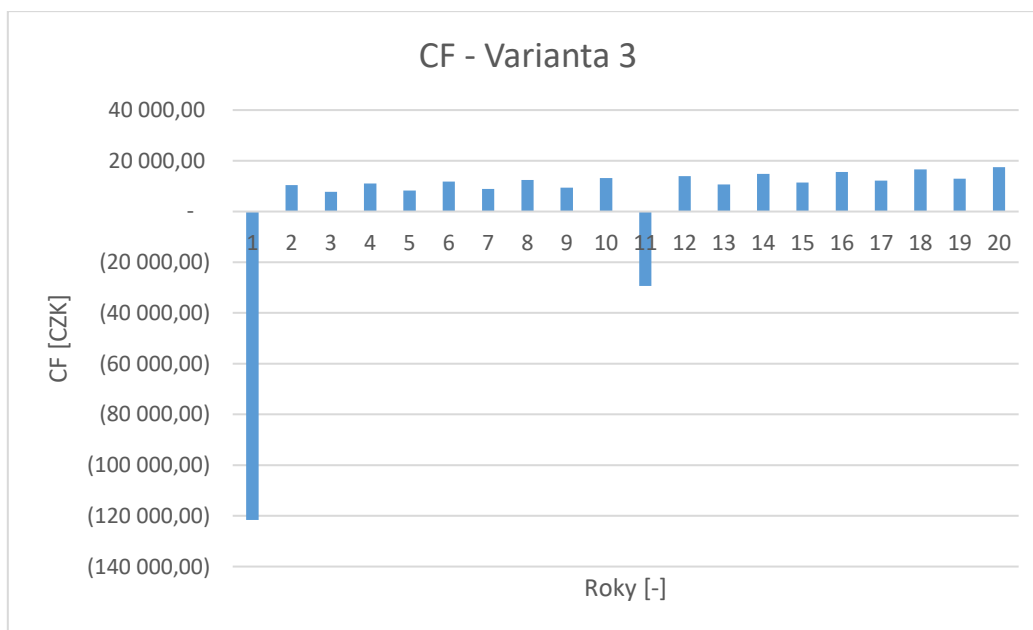
Zde je situace velmi podobná jako v případě varianty 1A. Podrobnosti jsou rozebrány v následujících kapitolách. Ze třech grafů umístěných výše je patrné, že ani jedna z variant pravděpodobně nedosáhne uspokojivých výsledků. U následujících dvou variant je však situace

podstatně lepší. Jak je psáno v dalších kapitolách, varianta 2B a 3 dosáhne kladného NPV a IRR. Také průběh CF této skutečnosti odpovídá.



Obr. 5.4: Přehled hotovostních toků pro variantu 2B

Hotovostní toky varianty 2B jsou již poměrně významné v porovnání s počáteční investicí. Podobná je situace i na následujícím obrázku.



Obr. 5.5: Přehled hotovostních toků pro variantu 3

Závěrem je nutné zopakovat, že z grafů výše je patrné, že při využití akumulace do vodíku jsou investiční náklady obrovské. Výsledné výnosy z úspory nákladů na energii jsou proti tak významné investici nepatrné. Mnohem vyšší výnosy v porovnání s počáteční investicí však lze spatřit u variant 2B a 3, u kterých jsou počáteční investice podstatně nižší. I přes informační hodnotu, kterou investorovi cash flow projektu poskytuje, je pro přehlednější porovnání vhodné využít i další kritéria.

5.2 Diskontované a kumulované hotovostní toky

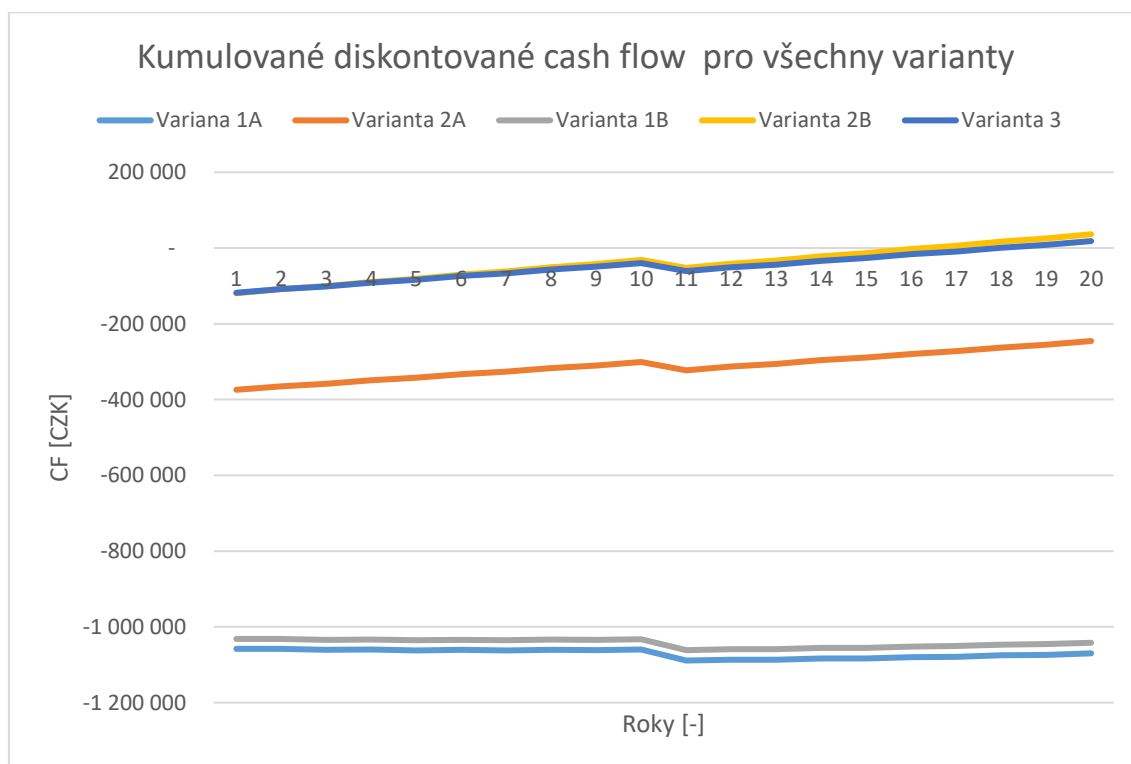
Samotný hotovostní tok je bezesporu velmi užitečná informace pro investora. Jak je však patrné ze vzorce 5.1, cash flow žádným způsobem nezohledňuje časovou hodnotu peněz. Právě časová hodnota peněz je významnou součástí projektu a nelze ji v ekonomickém modelu opomenout. Je tedy vhodné využít veličinu zvanou diskontované cash flow, neboli diskontovaný hotovostní tok. Diskontovaný hotovostní tok lze vypočítat podle vzorce 5.2:

$$DCF_t = \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (5.2)$$

kde DCF_t je diskontovaný hotovostní tok v roce t , CF_t je hotovostní tok v roce t a r je diskontní sazba, v tomto případě vážená cena kapitálu, kterou jsem stanovil v kapitole 4.7. Velkou vypovídající hodnotu má kritérium, které z diskontovaného cash flow vychází. Nazývá se kumulované diskontované cash flow. Jedná se o sumu diskontovaných hotovostních toků, vzorec pro výpočet je následující:

$$CDCF_i = \sum_{t=1}^i DCF_t \quad (5.3)$$

kde $CDCF_i$ je kumulovaný diskontovaný hotovostní tok v roce i a DCF_t je diskontovaný hotovostní tok v roce t a i je libovolný rok z doby porovnávání projektu. Průběh kumulovaného diskontovaného cash flow lze znázornit graficky. Na takovém grafu je na první pohled patrné, zda investice v čase vydělává či nevydělává. Při porovnávání více projektů je také zřejmé, která vydělává nejrychleji. Na následujícím obrázku je znázorněn průběh kumulovaných hotovostních toků pro všechny varianty. Při hodnocení investic platí, že čím vyšší je kumulované cash flow, tím výhodnější je investice pro investora.



Obr. 5.6: Průběh kumulovaného cash flow pro všechny varianty

Z grafického znázornění průběhu kumulovaných hotovostních toků vyplývá, že varianty uvažující akumulaci do vodíku jsou absolutně nekonkurenceschopné ostatním variantám, které využívají buď akumulaci do baterií nebo prodej přebytků do sítě. Důležitá je rovněž skutečnost, že mezi dlouhodobou a krátkodobou akumulací do vodíku je mnohem menší výsledný rozdíl, než mezi dlouhodobou a krátkodobou akumulací do baterií. Této skutečnosti se podrobněji věnuji v následující kapitole 5.3. Důležité je zmínit, že u variant uvažujících akumulaci do vodíku není patrný rostoucí trend. To je dáno skutečností, že roční splátky úroků a úmorů půjčky se téměř vyrovnají úspoře nákladů na elektrickou energii (například cash flow varianty 1A se pohybuje v průběhu let od 57 CZK za rok po 6 866 CZK za rok). I přes to, že cizím kapitálem je financováno pouze 15 % výše investičních nákladů, cizí kapitál činí nižší stovky tisíc korun. Naopak jasně stoupající trend je zřejmý u variant 2A, 2B a 3. U těchto variant dosahuje výše cizího kapitálu mnohem menších částek, a tudíž i splátky jsou mnohem nižší. Podrobněji se problematice cizího kapitálu věnuji v citlivostní analýze v kapitole 6.

Důležité je zmínit, že nejlepších výsledků dosahují varianty 2B, tedy krátkodobá akumulace do baterií, a 3, tedy prodej přebytků do distribuční sítě. Jak je patrné z grafu na Obr. 5.6, přibližně první 4 roky projektu dosahuje lepších výsledků varianta 3. Avšak vzhledem ke stále zvyšující se ceně elektrické energie je postupem času pro investora výhodnější varianta 2B, neboť větší výnosy generuje akumulace energie do baterií a následná úspora nákladů za nákup energie z distribuční sítě než prodej přebytků do sítě. Tato skutečnost splňuje teoretická očekávání.

5.3 NPV

Přímo z kumulovaného cash flow vychází jedno z nejdůležitějších ekonomických kritérií, konkrétně čistá současná hodnota neboli NPV. Čistá současná hodnota se vypočítá jako suma všech diskontovaných hotovostních toků za dobu porovnávání projektů. Vzorec pro výpočet je následující:

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_p} DCF_t \quad (5.4)$$

kde NPV je čistá současná hodnota, DCF_t je diskontovaný hotovostní tok v roce t a T_p je celková doba porovnávání projektů. Pokud je tento ukazatel záporný, znamená to, že zamýšlený projekt je ztrátový. Pokud je NPV rovno nule, znamená to, že investor z projektu získá roční výnos v hodnotě diskontu. Z této skutečnosti vyplývá, že pro stanovení krajních hodnot (například minimální cena elektrické energie, maximální cena elektrolyzéru a podobně), kdy má projekt pro investora smysl, je zapotřebí položit NPV rovno nule a dopočítat tento neznámý parametr. Dále platí, že pokud je NPV kladné, výnos z projektu je vyšší než požadovaný diskont a investor by měl do projektu investovat. V následující tabulce je souhrn výsledných čistých současných hodnot projektu pro varianty 1A, 1B, 2A, 2B a 3.

Tab. 5.1: NPV všech zkoumaných variant

Varianta [-]	1A	1B	2A	2B	3
NPV [CZK]	-1 070 122	-1 041 652	-245 505	36 230	18 249

Pro připomenutí, varianta 1A využívá dlouhodobou akumulaci do vodíku, varianta 1B krátkodobou akumulaci do vodíku, varianta 2A dlouhodobou akumulaci do baterií, varianta 2B

krátkodobou akumulaci do baterií a ve variantě 3 jsou všechny přebytky prodávány do distribuční sítě. Z tabulky je patrné, že obě varianty pro akumulaci do vodíku mají NPV jednoznačně nejnižší. Tento výsledek jsme vzhledem k výši investičních nákladů očekávali. Záporné NPV vyšlo také pro variantu s dlouhodobou akumulací do baterií, neboť i v tomto případě byly investiční náklady vysoké vzhledem k nutnosti pořídit tři baterie pro dosažení dostatečné akumulační kapacity. Naopak kladné NPV lze pozorovat v případě varianty s krátkodobou akumulací do baterií a také v případě varianty prodeje přebytků do distribuční sítě. Tyto výsledky poměrně přesně splňují teoretická očekávání.

Důležité je zaměřit se na rozdíl v čisté současné hodnotě v závislosti na skutečnosti, zda se pro danou technologii (baterie či vodík) jedná o dlouhodobou nebo krátkodobou akumulaci. V případě využití akumulace do vodíku, tedy u variant 1A a 1B, dojde po snížení akumulační kapacity o 63 % (z 27,01 kWh na 10,00 kWh) následkem snížení investičních nákladů na zásobník ke zvýšení NPV pouze o 3 %. Jestliže je podobné snížení akumulační kapacity provedeno u akumulace do baterií, dojde po snížení kapacity o 67 % z 25,67 kWh na 8,56 kWh následkem snížení investičních nákladů o zvýšení NPV o 115 %. Podrobnosti k akumulačním kapacitám v jednotlivých variantách jsou uvedeny v kapitolách 3.3, 3.4, 3.5 a 3.6. Z těchto výsledků vyplývá, že u akumulace do vodíku vzhledem k velmi vysokým investičním nákladům příliš nezáleží na kapacitě zásobníku, a hodí se tedy pro spíše dlouhodobou akumulaci elektrické energie (například akumulace dostatku energie na zásobování objektu na několik měsíců). Ve prospěch této skutečnosti hovoří také fakt, že během i velmi dlouhého skladování stlačeného vodíku v zásobnících nedochází k žádným ztrátám energie, neboť úniky plynu ze zásobníku jsou nulové. Naopak vliv snížení kapacity na NPV v případě akumulace do baterií je zásadní. Z toho vyplývá, že na rozdíl od akumulace do vodíku je akumulace do baterií vhodná spíše pro krátkodobou akumulaci, neboť NPV je významně vyšší při snížení celkové kapacity baterií.

Po zhodnocení výsledků a závěrů sepsaných výše se jeví jako ideální propojení obou možností akumulací. Nárazově vznikající přebytky elektrické energie z FVE by byly akumulovány do malého akumulátoru o takové kapacitě, aby bylo možné využít všechnu uloženou energii ještě v rámci daného dne. Přebytky vznikající dlouhodobě (například v létě od dopoledne do odpoledne) by byly využity v elektrolyzáru a přeměněny na vodík. Ten by byl v zásobnících skladován ve velkém množství a využit v období, kdy produkce FVE nepokryje okamžitou spotřebu objektu (tedy pozdní podzim či zima).

Problematická je u variant s akumulací do vodíku cena komponentů systému. Jak jsem již zmiňoval vícekrát v textu diplomové práce, vodíkové technologie jsou v dnešní době velmi nákladné, a tedy nekonkurenceschopné. V následující tabulce uvádím investiční náklady pro jednotlivé varianty přepočítané na jednu kilowatthodinu akumulační kapacity dané varianty.

Tab. 5.2: Investiční náklady na jednu kilowatthodinu akumulační kapacity

Varianta [-]	1A	1B	2A	2B	3
Investiční náklady [CZK/kWh]	52 828	139 561	23 786	35 587	-

Z tabulky výše vidíme, že investiční náklady na jednu kilowatthodinu akumulační kapacity jsou extrémně vysoké pro varianty s akumulací do vodíku. Nejnižší přepočtené investiční náklady jsou u varianty 2A. Při těchto investičních nákladech však projekt dosahuje záporného NPV. Kladného NPV i přes vyšší investiční náklady na jednu kilowatthodinu dosahuje varianta 2B. V tomto případě činí přepočtené investiční náklady 35 587 CZK/kWh. Investiční náklady na varianty s vodíkem dosahují 52 828 CZK/kWh až 139 561 CZK/kWh. Investičním nákladům se podrobněji věnuji v kapitole 6.8 v rámci citlivostních analýz.

5.4 IRR

IRR neboli vnitřní výnosové procento je ekonomický ukazatel pro relativní výnos, který projekt během svého životního cyklu poskytuje. Stejně jako v případě NPV se jedná o velmi často využívaný koncept, neboť jeho vypovídající hodnota je poměrně vysoká. Vnitřní výnosové procento lze vypočítat podle vzorce 5.5.

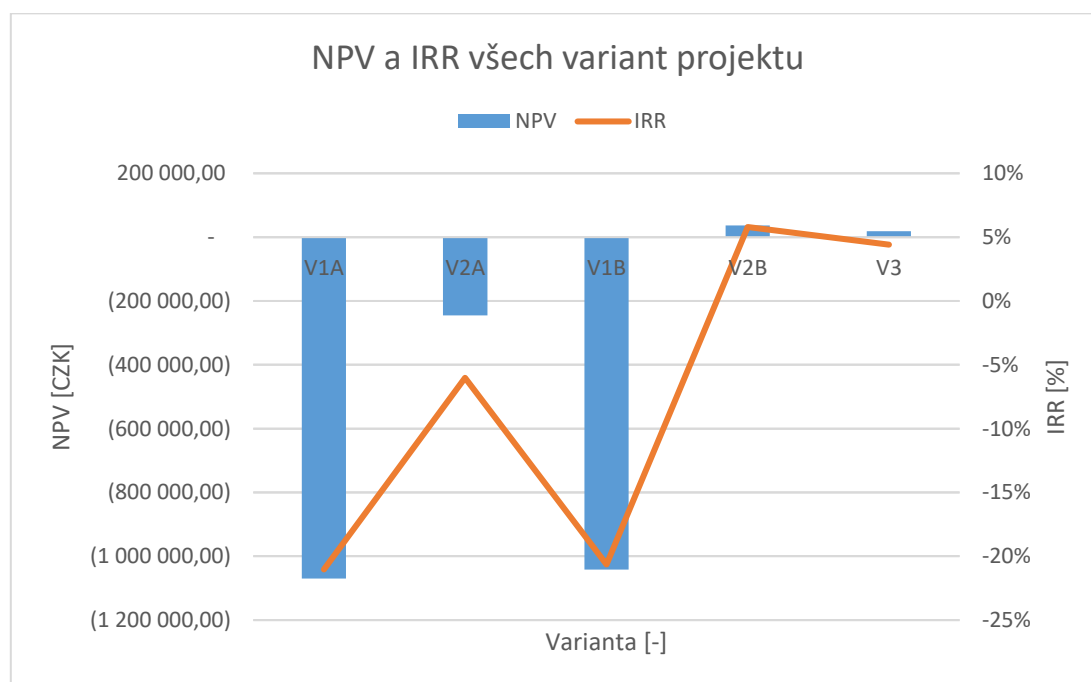
$$0 = \sum_{t=1}^{T_p} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} \quad (5.5)$$

kde IRR je vnitřní výnosové procento, CF_t je hotovostní tok v roce t a T_p je celková doba porovnávání projektů. Ze vzorce 5.5 vyplývá, že IRR ve skutečnosti značí hodnotu diskontní sazby pro NPV rovné nule. V následující tabulce je porovnání vnitřních výnosových procent pro všechny zkoumané varianty.

Tab. 5.3: IRR všech zkoumaných variant

Varianta [-]	1A	1B	2A	2B	3
IRR [%]	-21	-21	-6	6	4

Z tabulky je patrné, že výsledky jsou dle očekávání opět nejhorší pro varianty s akumulací do vodíku. V případě varianty 1A i varianty 1B dosahuje vnitřní výnosové procento -21 %. Záporné IRR náleží i variantě 2A, tedy dlouhodobé akumulaci do baterií. Do kladných hodnot se projekt dostává při využití varianty 3, kdy je vnitřní výnosové procento rovno 4 %. Nejlepšího IRR dosahuje stejně jako v případě NPV varianta 2B. Dle očekávání je pořadí variant stejné při porovnávání hodnot NPV i IRR. Na následujícím obrázku je grafický přehled vnitřních výnosových procent i čistých současných hodnot pro porovnávané varianty. Graf potvrzuje závěry stanovené dříve, tedy že vodík je prozatím bohužel nekonkurenceschopný.



Obr. 5.7: NPV a IRR pro porovnávané varianty

5.5 T_n a T_{nD}

T_n , neboli prostá doba návratnosti, je doba, za kterou se investorovi navrátí suma, kterou vložil do projektu. Prostou dobou návratnosti je tedy rok, ve kterém suma hotovostních toků projektu dosáhne výše investičních nákladů. Z tohoto popisu je patrné, že do výpočtu není v žádném ohledu zanesena časová hodnota peněz. Výhodou této skutečnosti je mnohem jednodušší výpočet daného kritéria, ovšem na úkor její vypovídající hodnoty, a tudíž i užitečnosti. Přesnější informaci o skutečné rentabilitě projektu podává diskontovaná doba návratnosti, neboli T_{nD} . Diskontovanou dobou návratnosti se rozumí rok, ve kterém suma diskontovaných hotovostních toků projektu dosáhne výše investičních nákladů. Je zřejmé, že v tomto kritériu je již cena peněz zahrnuta. V následující tabulce je shrnutí hodnot těchto kritérií pro všechny varianty.

Tab. 5.4: T_n a T_{nD} všech variant projektu

Varianta [-]	1A	1B	2A	2B	3
T_n [roky]	N/A	N/A	N/A	15	16
T_{nD} [roky]	N/A	N/A	N/A	17	18

Z dat v tabulce 5.4 vyplývá, že pro obě varianty uvažující akumulaci do vodíku i pro variantu s dlouhodobou akumulací do baterií nedojde k navrácení investičních nákladů v průběhu životnosti projektu. Tato skutečnost potvrzuje teoretické předpoklady a je v souladu s výše popsány hodnoty NPV a IRR. V případě varianty 3 činí prostá doba návratnosti 16 let, diskontovaná 18 let. Nejlepších výsledků i v rámci těchto kritérií ekonomické efektivity dosahuje varianta 2B. Prostá doba návratnosti činí 15 let, diskontovaná stejně jako v případě varianty 3 o dva roky více, tedy 17 let.

5.6 Vyhodnocení výsledků

Ze všech tabulek a grafů uvedených v kapitole 5 vyplývá, že nejhorší variantou pro investora je varianta 1A, tedy dlouhodobá akumulace do vodíku. Pouze o málo lepší je na základě vypočtených kritérií ekonomické efektivity varianta 1B, která uvažuje krátkodobou akumulaci do vodíku. O poznání lepší, avšak stále pro investora nevýhodná, je investice do varianty 2A (dlouhodobá akumulace do baterií). První variantou, která dle výpočtů přinese investorovi zisk nad požadovaný diskont, je varianta 3. Varianta s prodejem přebytků do sítě dosahuje kladných hodnot NPV i IRR a investice do této varianty bude během doby životnosti projektu splacena. Nejlepších výsledků dosahuje varianta uvažující krátkodobou akumulaci do baterií. Důležitá je informace, kterou jsem uvedl v kapitole 5.3. Zde konstatuji, že jako ideální se jeví propojení akumulace do vodíku s akumulací do baterií, přičemž baterie slouží jako buffer akumulující nárazové přebytky výroby fotovoltaické elektrárny a vodík slouží pro dlouhodobou akumulaci velkého množství energie do období, ve kterém výroba FVE nepokrývá okamžitou spotřebu zkoumaného objektu. Tento model využívá v rámci pilotního projektu Ústav jaderného výzkumu v Řeži. Zde od roku 2009 zkoumají technologie akumulace elektrické energie do vodíku.

I přes z výpočtů vyplývající velmi špatné výsledky variant s akumulací do vodíku je nutné této technologii věnovat zvýšenou pozornost do budoucna. Vzhledem ke skutečnosti, že podíl variabilních obnovitelných zdrojů elektrické energie (v ČR zejména fotovoltaických a větrných elektráren) rok od roku roste, je nutné akumulovat stále větší množství energie, neboť tyto

zdroje často vyrábí energii v čase, kdy poptávka po této energii zdaleka neuspokojí výrobu. Tak značná nadvýroba energie může v síti způsobit značné problémy, a je tedy nutné ji spotřebovat – nejlépe uchovat do doby, než bude na trhu dostatečná poptávka. V tomto směru se již velmi osvědčily přečerpávající elektrárny, které jsou schopné akumulovat velké množství energie. Do budoucna však ani tak masivní akumulární kapacita, jakou poskytují například Dlouhé stráně, nebude stačit. Je zapotřebí instalovat velkokapacitní akumulární systémy, které výše zmíněnou nadvýrobu OZE uspokojí. Vodíkové zásobníky poskytují mnohem vyšší hustotu akumulované energie než baterie. Navíc zásoby lithia pro výrobu těchto akumulátorů jsou omezené a jeho těžba nezanedbatelně zatěžuje životní prostředí. Naopak vodík je ekologicky zcela čistý, vzniká v elektrolyzáru z čisté vody a následně je v palivovém článku přeměněn zpět na elektrickou energii, přičemž jedinou odpadní surovinou je čistá voda.

Největším nedostatkem vodíkových technologií v dnešní době je stále jejich pořizovací cena. Dobrou zprávou je, že náklady na vodíkové technologie v posledních letech značně poklesly a stejný trend se očekává i v letech budoucích. S každým poklesem investičních nákladů roste konkurenceschopnost této technologie.

Během procesu elektrolýzy a přeměny vodíku na elektrickou energii v palivovém článku vzniká i určité množství tepla, které by mohlo být využito například pro ohřev teplé vody. Takové teplo by znamenalo další úsporu nákladů. Teplo vznikající při těchto procesech je však velmi obtížně měřitelné, a tudíž je prakticky nemožné ho ocenit. Z tohoto důvodu jsem úspory z odpadního tepla v rámci diplomové práce a modelů pro všechny varianty zanedbal.

Kapitola 6

Citlivostní analýzy

Zpracování citlivostních analýz je pro správné vyhodnocení projektu neméně důležité než samotné vyhodnocení výsledků ekonomických kritérií. Jedná se o metodu výpočtů, která zkoumá vliv změny zvoleného parametru na ekonomická kritéria. Pomocí této analýzy tedy lze určit citlivost výstupů na jednotlivé (případně kombinované) vstupy a zjistit, jak tyto vstupy ovlivňují výsledek modelu. Citlivostní analýza je velmi důležitým krokem ve zkoumání každého modelu. V praxi může často nastat situace, že čistá současná hodnota projektu při zvoleném referenčním parametru, například inflaci rovné 2 %, je kladná. Investor však nemá informace o citlivosti projektu na změnu inflace a může nastat situace, kdy NPV pro 2% inflaci je sice kladné, avšak pokud by byla inflace rovna 3 %, NPV by již vyšlo záporné. Tuto skutečnost odhalí právě citlivostní analýzy. Investor má pak možnost hlubší analýzy rizik spojených s projektem. Jestliže se vrátím k výše zmíněnému příkladu s inflací, nárůst inflace ze 2 % na 3 % je poměrně reálný a může tedy ohrozit projekt. Investor má pak relevantní důvod i přes kladné NPV do projektu neinvestovat vzhledem k riziku, které je způsobené citlivostí výstupů modelu na vstupní parametr či parametry.

V rámci citlivostních analýz modelů diplomové práce jsem prozkoumal diskont, inflaci, cenu elektrické energie, eskalaci ceny elektrické energie, meziroční změnu spotřeby elektrické energie objektu, úrok cizího kapitálu, podíl cizího kapitálu ku celkové investici a výši počáteční investice. Zároveň jsem zpracoval také citlivostní analýzu pro dvě proměnné (cena elektrické energie a její eskalace). Tuto analýzu lze dohledat v Příloze B. V rámci diplomové práce interpretována není, neboť sděluje téměř stejnou informaci jako citlivostní analýzy pro tyto dva parametry zvlášť.

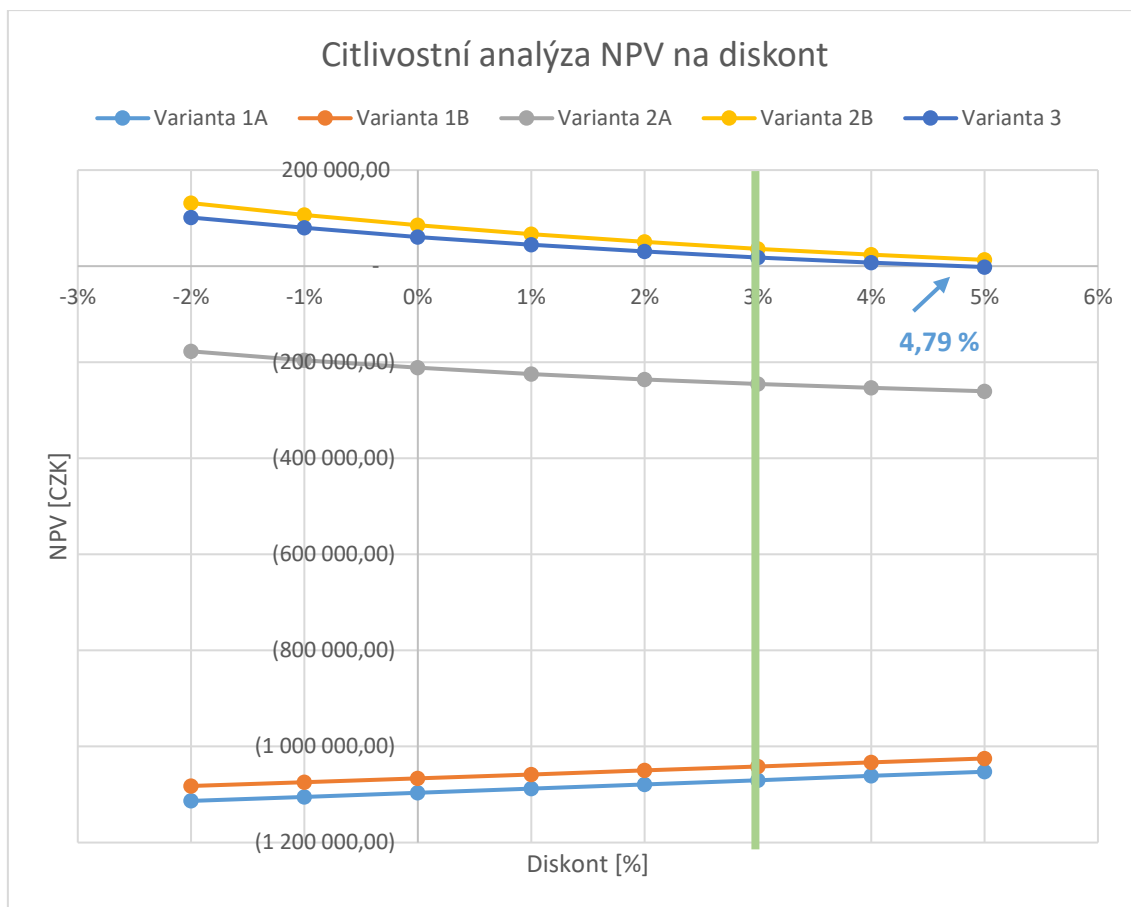
Zdrojová data a podrobné tabulky jsou k dispozici Příloze B na listech podbarvených žlutou barvou. V rámci interpretace výsledků citlivostních analýz je dále uvedeno pouze grafické zpracování, které má však nejvyšší stupeň přehlednosti a vypovídající hodnoty.

6.1 Citlivostní analýza na diskont

Referenční hodnota diskontu, na které jsou postaveny jednotlivé modely, byla stanovena v kapitole 4.3 a je rovna 3 % (v grafu znázorněno svislou zelenou linkou). V rámci citlivostní analýzy jsem zkoumal vliv diskontu na NPV, přičemž vstupní parametr se pohyboval v intervalu od -2 % do 5 %. Záporný diskont je na první pohled těžko uvěřitelný, avšak dle guvernéra ČNB je využití záporných sazeb (úrokové sazby jsou základním nástrojem pro provádění měnové politiky ČNB) jedním z nástrojů pro mimořádné podmínky. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl zařadit do citlivostní analýzy reakci projektu i na takový mimořádný stav. [79]

Na následujícím obrázku je zpracována citlivostní analýza na tento parametr pro všech pět zvažovaných variant projektu. Varianta 1A se zaměřuje na dlouhodobou akumulaci do vodíku, varianta 1B na krátkodobou akumulaci do vodíku, varianta 2A pracuje s dlouhodobou

akumulací do baterií, varianta 2B s krátkodobou akumulací do baterií a poslední varianta 3 pak uvažuje s prodejem veškerých přebytků energie do distribuční sítě.

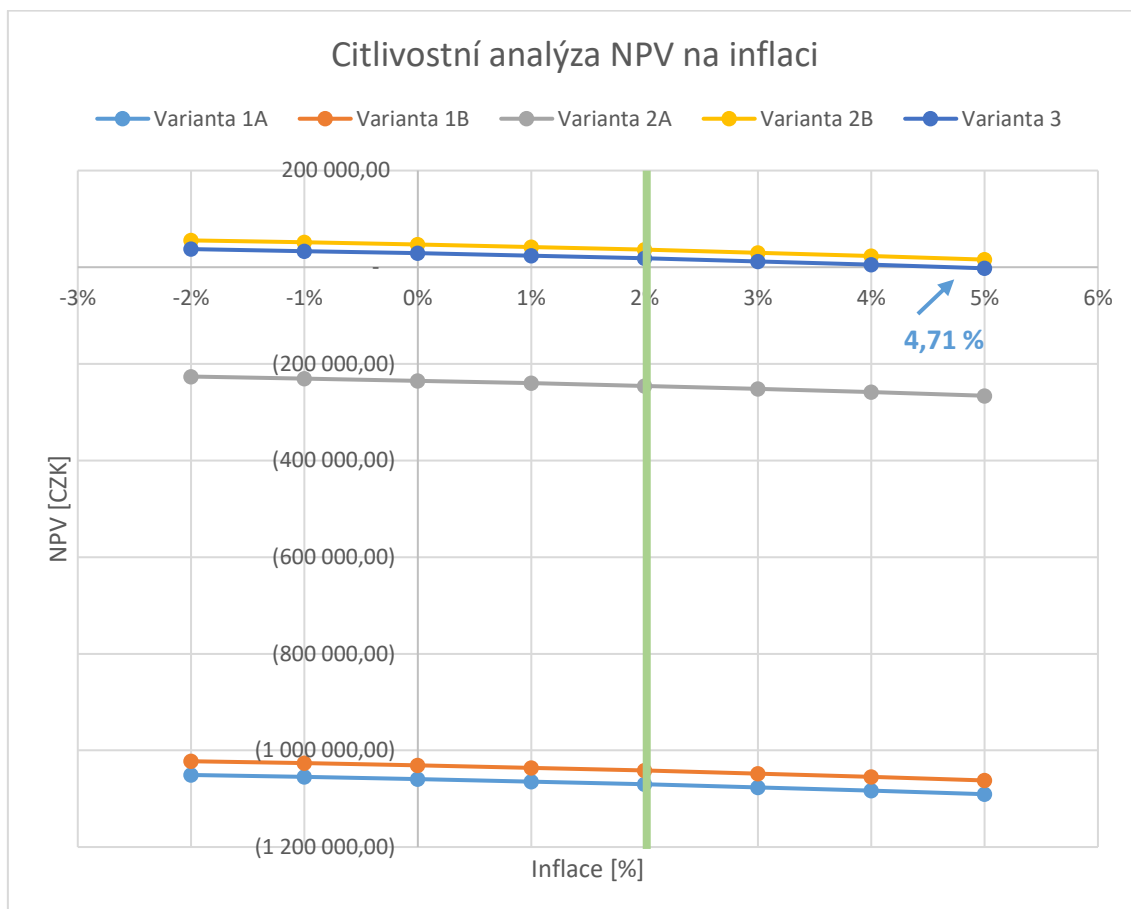


Obr. 6.1: Citlivostní analýza NPV na změnu diskontu.

Jedinou variantou, u které se ve zkoumaném intervalu diskontu mění rozhodnutí zda investovat či neinvestovat, je varianta 3. Hraniční hodnota, ve které je NPV rovno nule, je 4,79 % (v grafu označeno šipkou a příslušnou hodnotou). Varianta 2B by dosáhla nulové hodnoty NPV až při diskontu rovnému 6,41 %. Dle teoretických předpokladů lze očekávat, že se zvyšujícím se diskontem NPV klesá. Tento předpoklad je potvrzen u variant 2A, 2B a 3. Avšak u variant uvažujících akumulaci do vodíku lze pozorovat trend přesně opačný, kdy NPV roste se zvyšujícím se diskontem. To je způsobeno skutečností, že na NPV variant 1A a 1B má největší vliv první rok projektu, kdy dosahuje cash flow velmi záporných hodnot. Platí tedy, že vyšší hodnota diskontu zapříčiní dle vzorce 5.2 přiblížení hodnoty diskontovaného cash flow k nule, a tudíž mírnému zvýšení NPV, neboť kladné cash flow v následujících letech je nízké a jeho vliv na NPV tedy mnohem menší. U variant 2A, 2B a 3 je patrný průběh křivek dle teoretického očekávání, neboť rozdíl mezi cash flow v prvním roce a v letech následujících není tak markantní, jako v případě akumulace do vodíku. Zároveň platí, že pořadí jednotlivých variant dle jejich NPV je pro všechny hodnoty diskontu konstantní. Tento fakt je také v souladu s teoretickými předpoklady. Se zvyšujícím se diskontem dochází ke snížení rozdílu v NPV mezi variantami s akumulací do vodíku a variantami ostatními, avšak rozdíl je stále markantní. Nezávisle na uvažované změně diskontu zůstává akumulace do vodíku nekonkurenceschopná.

6.2 Citlivostní analýza na inflaci

Inflaci jsem stanovil v kapitole 4.2 dle dlouhodobého inflačního cíle ČNB na 2 %. Interval, ve kterém jsem pozoroval změnu NPV v závislosti na změně inflace, je v tomto případě totožný jako v citlivostní analýze na diskont, tedy od -2 % do 5 %. Záporná inflace, neboli deflace, je v praxi mnohem pravděpodobnější než záporný diskont a její místo v citlivostní analýze je důležité. Grafické znázornění analýzy je na následujícím obrázku, referenční hodnota inflace je opět znázorněna zelenou linkou a hodnoty inflace, při kterých je NPV dané varianty rovno nule, jsou znázorněny šipkami s příslušnými hodnotami inflace.



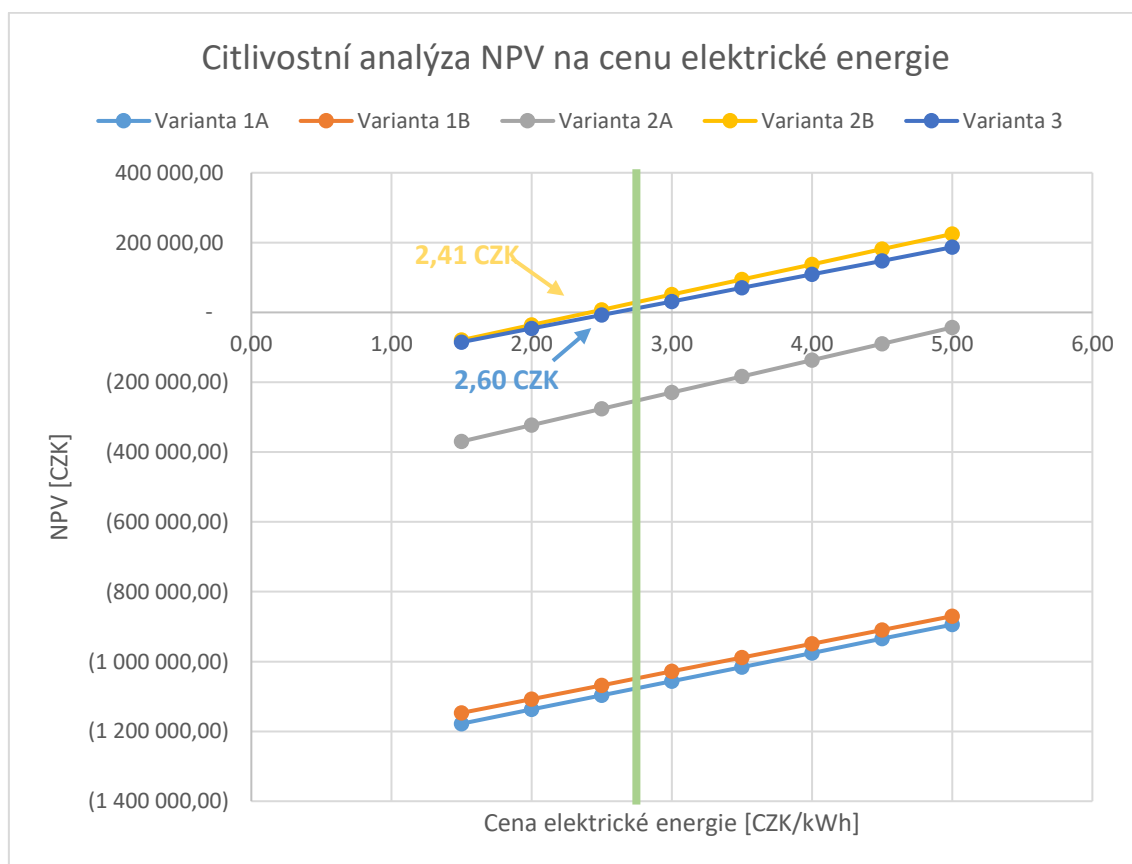
Obr. 6.2: Citlivostní analýza NPV na změnu inflace.

Podobně jako v případě předchozí citlivostní analýzy je patrný pouze jeden průnik křivky s horizontální osou označující NPV rovno nule. Investorovo rozhodnutí se v této analýze mění pouze v případě varianty 3, konkrétně při inflaci rovné 4,71 %. Varianta 2B dosáhne nulové hodnoty NPV až při hodnotě inflace 6,81 %. Pořadí jednotlivých variant seřazených dle hodnoty NPV je pro všechny hodnoty inflace z výše zmíněného intervalu konstantní. Všechny křivky také splňují teoretické předpoklady, dle kterých NPV klesá se zvyšující se inflací. To je dáno skutečností, že vyšší inflace zapříčiní větší zdražení komponent, které je nutné zakoupit v průběhu životnosti projektu (například měnič). Tento trend je patrný u všech pěti variant.

6.3 Citlivostní analýza na cenu elektrické energie

Tato citlivostní analýza je podstatně důležitější než předchozí analýzy. Na ceně elektrické energie je postaven základ celého projektu výstavby FVE s akumulací, neboť z vyšší ceny elektrické energie vyplývá větší úspora vlastní výrobou. Zkoumána je cena elektrické energie v intervalu od 1,50 CZK/kWh do 5,00 CZK/kWh. Aktuálně platná cena, na které jsou postaveny všechny modely, činí 2,83 CZK/kWh. Důležité je zdůraznit, že tato hodnota je pouze variabilní složkou z celkové ceny, která dosahuje výše 3,34 CZK/kWh. Je tedy zřejmé, že variabilní složka ceny elektrické energie činí přibližně 85 % celkové ceny energie. Fixní část ceny, kterou zákazník platí bez ohledu na spotřebované množství energie, tvoří tedy pouze 15 % celkové ceny. Reálně je však alokace nákladů na přenos a distribuci elektrické energie přesně opačná, neboť přibližně 80 % nákladů tvoří fixní náklady a pouze 20 % náklady závislé na spotřebě, respektive výrobě. Tato minoritní složka variabilních nákladů je v praxi prezentována ztrátami při přenosu a distribuci. Tento paradox je již od roku 2016 diskutován na politické scéně. Patrně jsou určité tlaky na realokaci složek ceny elektrické energie v opačném poměru. V praxi by tento scénář znamenal, že fixní část elektrické energie by nově tvořila 80 % celkové ceny a odpovídala by tak skutečnému poměru nákladů na distribuci a přenos. To by mělo zásadní dopad na projekty vlastní výroby a akumulace elektrické energie, neboť investor by nově ušetřil pouze 20 % z celkové ceny energie místo nynějších 80 %. V případě projektu v této diplomové práci by tedy úspora vytvořená jednou vyrobenou či akumulovanou kilowatthodinou nečinila 2,83 CZK, nýbrž pouze 0,51 CZK. Na první pohled je patrné, že s takovou cenou by byly projekty na výrobu a akumulaci vlastní elektrické energie absolutně nekonkurenceschopné.

Citlivostní analýza na tento parametr je na Obr. 6.3.



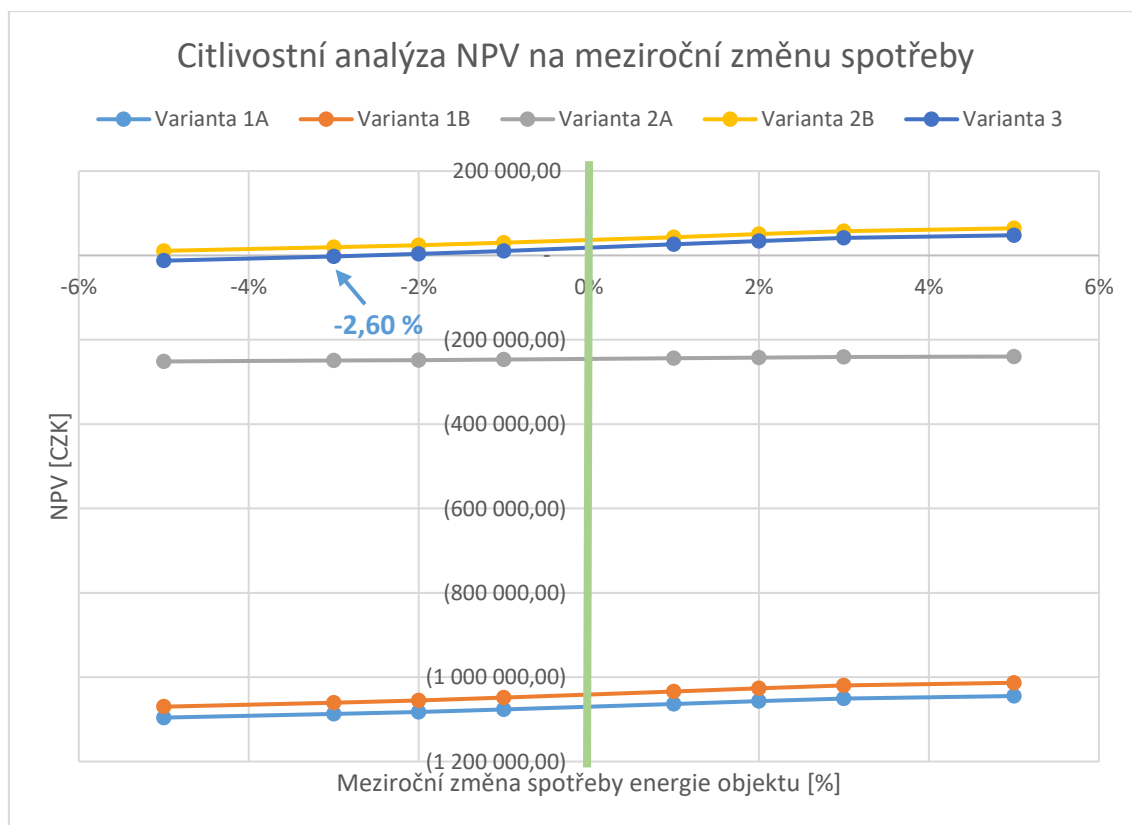
Obr. 6.3: Citlivostní analýza NPV na změnu ceny elektrické energie.

Nulové hodnoty NPV dosahuje varianta 2B při ceně elektrické energie 2,41 CZK/kWh, varianta 3 pak při hodnotě 2,60 CZK/kWh. Tato cena je poměrně blízko k referenční ceně, která činí 2,83 CZK/kWh a investor by měl vnímat vyšší riziko spojené s investicí do varianty 2B a 3. Ostatní zkoumané varianty nulové hodnoty NPV ve zkoumaném intervalu ceny energie nikdy nedosáhnou (NPV varianty 2A je rovno nule při ceně 5,46 CZK/kWh, v případě varianty 1B činí tato hodnota 15,99 CZK/kWh a v případě varianty 1A dokonce 16,04 CZK/kWh). Zejména hraniční hodnoty ceny elektrické energie pro varianty uvažující akumulaci do vodíku jsou v podstatě nereálně vysoké. Jedná se o více jako pětinasobek aktuální ceny.

Obecně lze konstatovat, že výstupy této citlivostní analýzy splňují teoretické předpoklady, dle kterých dochází k růstu NPV při zvyšující se ceně elektrické energie. Tento předpoklad je způsoben skutečností, že čím vyšší je cena energie, tím vyšší je úspora, která vyústí k vyššímu cash flow, a tedy i NPV. Pořadí variant dle NPV zůstává pro všechny hodnoty cen ze zkoumaného intervalu konstantní.

6.4 Citlivostní analýza na změnu spotřeby elektrické energie

V rámci modelů tohoto projektu je zvažována konstantní spotřeba zkoumaného objektu během celé doby životnosti projektu. S nenulovou pravděpodobností však může nastat, že spotřeba objektu se v čase změní (například jiné zaměstnání obyvatel, narození nového dítěte, nákup či výměna spotřebičů a podobně). Je tedy na místě prozkoumat vliv takové změny ve spotřebě na čistou současnou hodnotu. Je zřejmé, že spotřeba může v čase klesnout i stoupnout, proto je střed zkoumaného intervalu v nule, nejnižší zkoumaná hodnota změny spotřeby je -5 % a nejvyšší hodnota 5 %. Citlivostní analýza je zpracována na následujícím obrázku.

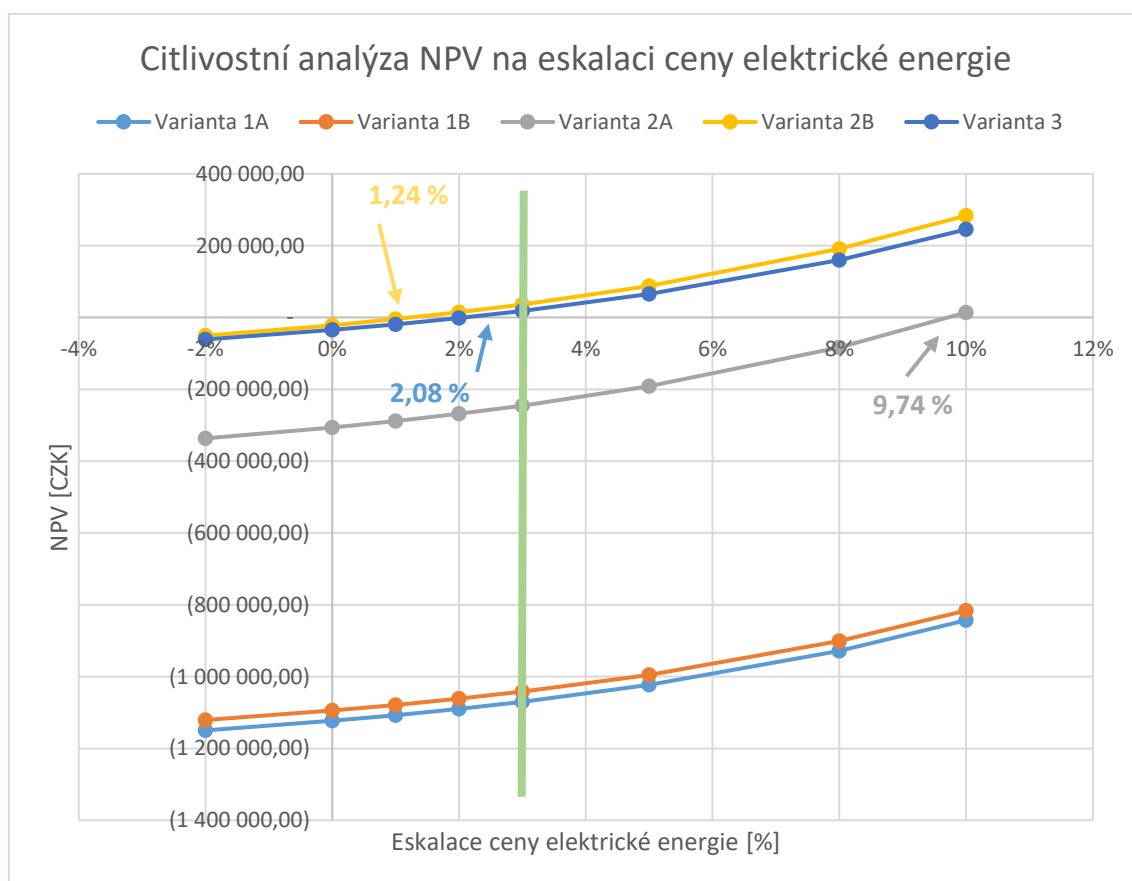


Obr. 6.4: Citlivostní analýza NPV na změnu spotřeby elektrické energie.

Z grafického zpracování citlivostní analýzy vyplývá, že se zvyšující se spotřebou energie roste také NPV. Stoupající trend však není tak strmý jako v předchozích analýzách, z čehož vyplývá, že vliv spotřeby rodinného domu nemá na NPV zásadní vliv. Pouze u varianty 3 dochází ve výše zmíněném intervalu změny spotřeby energie k průniku křivky s horizontální osou nulového NPV (při poklesu spotřeby o 2,61 % ročně). Investorovo rozhodnutí na základě NPV pro variantu 2B by se změnilo až při poklesu spotřeby o 8,54 % ročně. Takovou změnu spotřeby již investor neočekává. Nezávisle na změně spotřeby však zůstávají varianty s akumulací do vodíku jednoznačně nekonkurenceschopné.

6.5 Citlivostní analýza na eskalaci ceny elektrické energie

Podobně jako v případě samotné ceny elektrické energie je i její eskalace významným parametrem. Referenční hodnota eskalace pro všechny modely je stanovena v kapitole 4.5 na hodnotu 3 % ročně. Zejména u tohoto parametru však platí, že je velmi obtížné odhadnout tento parametr, neboť cena elektrické energie je závislá na mnoha faktorech (politická situace, ekologické nátlaky a podobně). Je tedy velmi důležité prozkoumat citlivost NPV na eskalaci ceny energií. Eskalace ceny elektrické energie je zkoumána v intervalu od -2 % do 10 %. Grafické zpracování je zpracováno na Obr. 6.5.



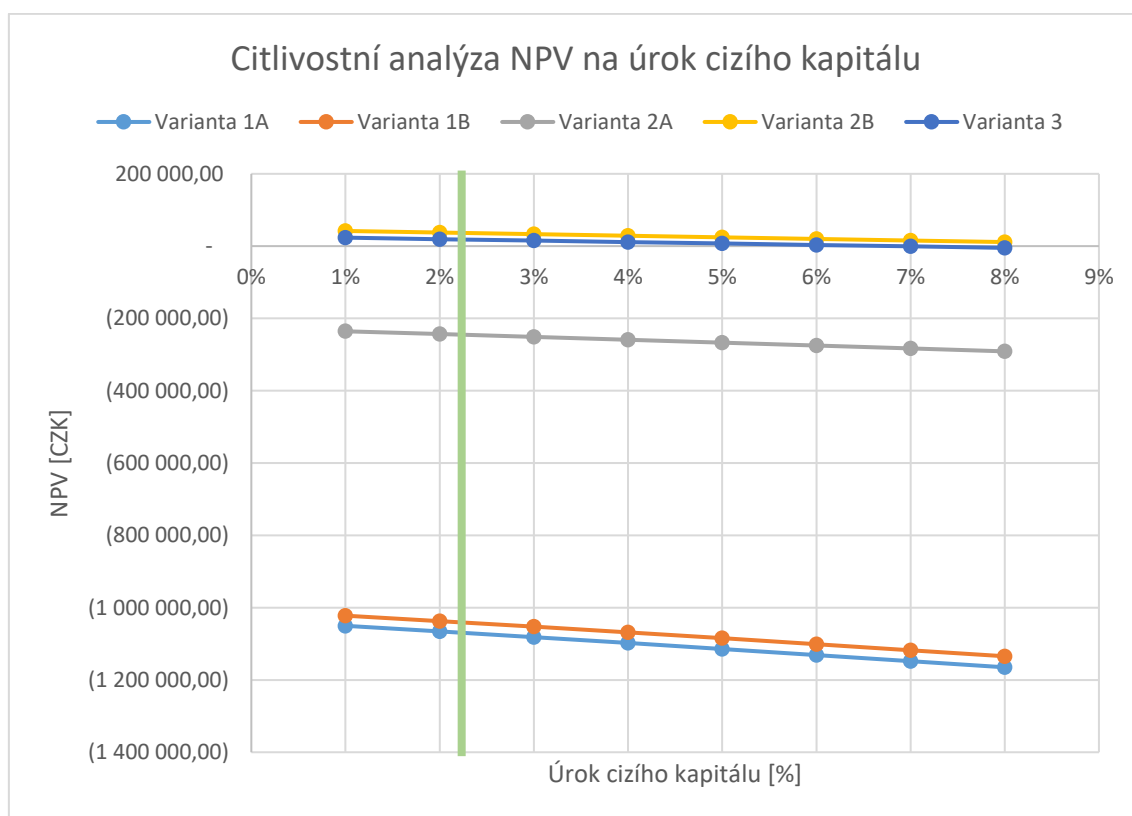
Obr. 6.5: Citlivostní analýza NPV na změnu eskalace ceny elektrické energie.

Na první pohled je patrné, že projekty jsou na eskalaci ceny energie poměrně citlivé. Ve zmíněném intervalu dochází ke změně investorova rozhodnutí u tří variant. V případě, že eskalace místo očekávaných 3 % ročně dosáhne hodnoty pouze 2,08 %, již se nevyplatí investovat do varianty 3. Pokud dosáhne na ještě nižší hodnotu, konkrétně 1,24 % ročně,

nevyplatí se investorovi vložit kapitál ani do varianty 2B. Pokud naopak bude roční eskalace elektrické energie atakovat hodnotu 9,74 %, již se vyplatí investovat i do varianty 2A. Pro varianty zabývající se akumulací do vodíku, tedy variantu 1A, respektive 1B, by musela pro dosažení nulové čisté současné hodnoty projektu činit roční eskalace ceny energie 19,45 %, respektive 19,31 %. Tyto hodnoty jsou již nereálně vysoké, a proto nelze očekávat, že by změna eskalace měla na rentabilitu akumulace do vodíku zásadní vliv. Lze konstatovat, že všechny křivky splňují teoretické předpoklady, neboť při zvyšující se eskalaci se zvyšuje i NPV daného projektu. Podobně jako v případě ceny elektrické energie i v případě její eskalace dochází ke zvyšování úspor (a tedy cash flow a NPV) při zvyšující se eskalaci. Současně platí, že pořadí jednotlivých variant zůstává pro všechny hodnoty eskalace konstantní.

6.6 Citlivostní analýzy na úrok cizího kapitálu

Cizímu kapitálu se věnují dvě citlivostní analýzy. První je zaměřená na úrok cizího kapitálu, který byl dle kalkulace od finančního poradce stanoven na 2,29 % p.a. V reakci na měnovou politiku státu, ekonomické a jiné krize (například celosvětová pandemie) však může snadno dojít k poklesu či nárůstu úrokových sazeb. Tato analýza je zpracována na následujícím obrázku.



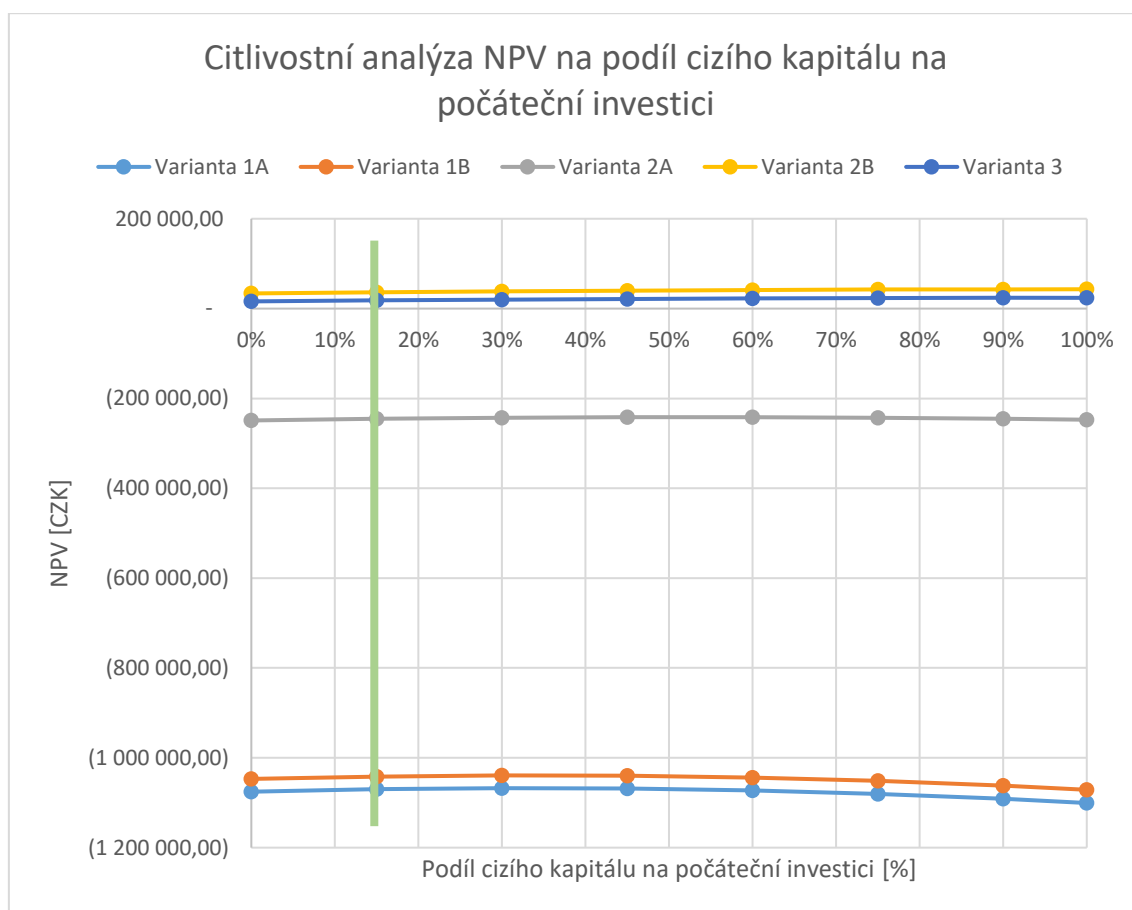
Obr. 6.6: Citlivostní analýza NPV na změnu úroku cizího kapitálu.

Vliv úroků cizího kapitálu na NPV projektu není zásadní. Je však patrné, že sklon křivky je strmější pro varianty uvažující akumulaci do vodíku. To je způsobeno faktem, že ač je podíl cizího kapitálu na investici ve všech variantách stejný (15 % celkové počáteční investice), vzhledem k mnohem vyšší investici do vodíkové technologie je absolutní hodnota půjčených peněz pro tyto varianty mnohem vyšší. Změna úroků tedy více ovlivní výsledek modelu. Obecně

Ize však konstatovat, že průběhy křivek splňují teoretické předpoklady, neboť s rostoucím úrokem klesá NPV. Takový průběh lze očekávat, protože se zvyšujícím se úrokem stoupají také náklady na cizí kapitál, a tudíž klesá cash flow. Podobně jako v předchozích variantách zůstává konstantní pořadí variant seřazených dle NPV nezávisle na úroku cizího kapitálu. Závěrem je vhodné dodat, že varianta 2B dosáhne nulového NPV při úroku 10,64 %, varianta 3 pak při 6,79 %.

6.7 Citlivostní analýza na podíl cizího kapitálu

Referenční hodnota podílu cizího kapitálu na počáteční investici je pro všechny varianty stanovena na 15 %. Vzhledem k výši investice, která především u variant s akumulací do vodíku výrazně přesahuje milion korun, je nutné vzít v úvahu bonitu potenciálních investorů. Existují investoři, kteří by na celou počáteční investici využili pouze svůj vlastní kapitál, ovšem jiní by byli nuceni financovat cizím kapitálem i většinu investice (u hypoték lze financovat i 90 % hodnoty investice pomocí cizího kapitálu). V rámci této citlivostní analýzy prozkoumám vliv podílu cizího kapitálu na čistou současnou hodnotu. Interval podílu jsem stanovil od 0 % do 100 %. Analýza je zpracována na Obr. 6.7.



Obr. 6.7: Citlivostní analýza NPV na změnu podílu cizího kapitálu na investici.

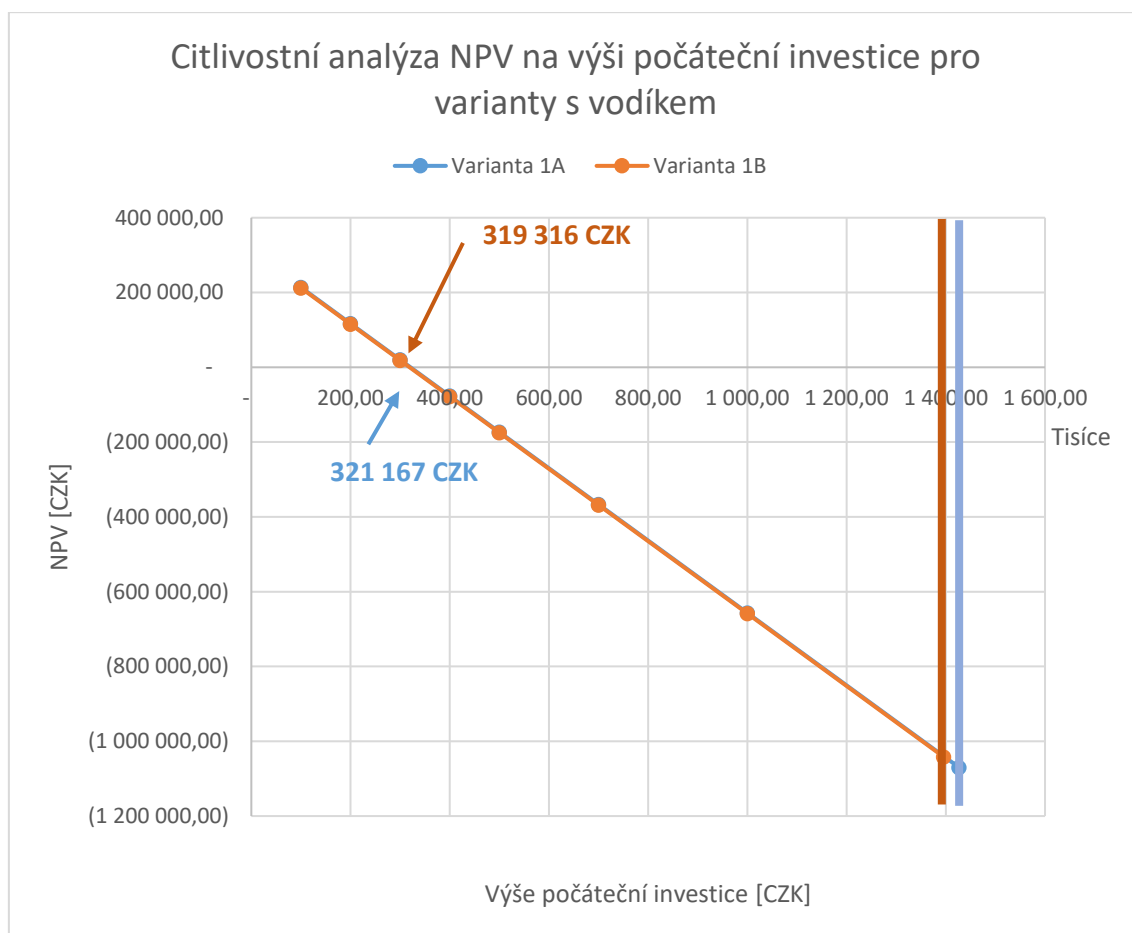
Z grafu lze pozorovat dva různé průběhy křivek. Pro nejlevnější varianty (2B a 3) je patrný mírně stoupající trend křivky v průběhu celého intervalu, maximálního NPV tedy tyto varianty dosahují při podílu cizího kapitálu 100 %. To je dáno skutečností, že úrok cizího kapitálu (2,29 %) je nižší než diskont, který vyjadřuje cenu vlastního kapitálu (3 %), a zároveň půjčená částka

nedosahuje takové výše, aby splácení úroků a úmorů bylo v porovnání s výnosy dostatečně důležité, aby výrazně ovlivnilo cash flow. Naopak u zbylých variant, tedy 1A, 1B a 2A, pozorujeme konkávní tvar křivek. Maximální hodnoty NPV dosahuje varianta 1A při podílu 30 %, varianta 1B při také při podílu 30 % a varianta 2A při podílu 60 %. Tyto fakta potvrzují konstatování výše, tedy že splácení cizího kapitálu u nejdražších variant s akumulací do vodíku již natolik ovlivní cash flow, že i přes nižší úrok cizího kapitálu oproti ceně vlastního kapitálu NPV klesá. U výrazně levnější varianty 2A k tomuto stavu dojde až při dvojnásobném podílu cizího kapitálu.

Z výše uvedeného lze konstatovat, že pro investora je nejvýhodnější velké investice financovat vlastním kapitálem a malé investice kapitálem cizím. Tento stav je však ve většině případů opačný oproti potřebám investora. Pořadí variant se dle NPV se v průběhu celého zkoumaného intervalu nemění. Žádný podíl cizího kapitálu nezapříčiní změnu investora rozhodnutí u žádné varianty.

6.8 Citlivostní analýza na výši počáteční investice

Vzhledem k velmi rozdílným investicím mezi variantami s akumulací do vodíku a ostatními variantami je tato citlivostní analýza zpracována ve dvou grafech. Analýza každé varianty byla provedena v takovém intervalu, aby křivka NPV zasahovala do kladných i záporných hodnot a bylo tak možné identifikovat, kdy se mění investora rozhodnutí. Graf na Obr. 6.8 je zaměřen na akumulaci do vodíku.



Obr. 6.8: Citlivostní analýza NPV na výši počáteční investice pro varianty s vodíkem.

Z grafu vyplývá, že aby čistá současná hodnota projektu s akumulací do vodíku byla nulová, počáteční investice by musela významně, momentálně až nepředstavitelně, klesnout. V případě varianty 1A by pokles z 1 426 874 CZK na 321 167 CZK musel činit 1 105 707 CZK, tedy celých 77 % počáteční investice. V případě varianty 1B by pokles z 1 395 606 CZK na 319 317 CZK činil rovněž 77 %, v absolutní hodnotě tedy 1 076 290 CZK.

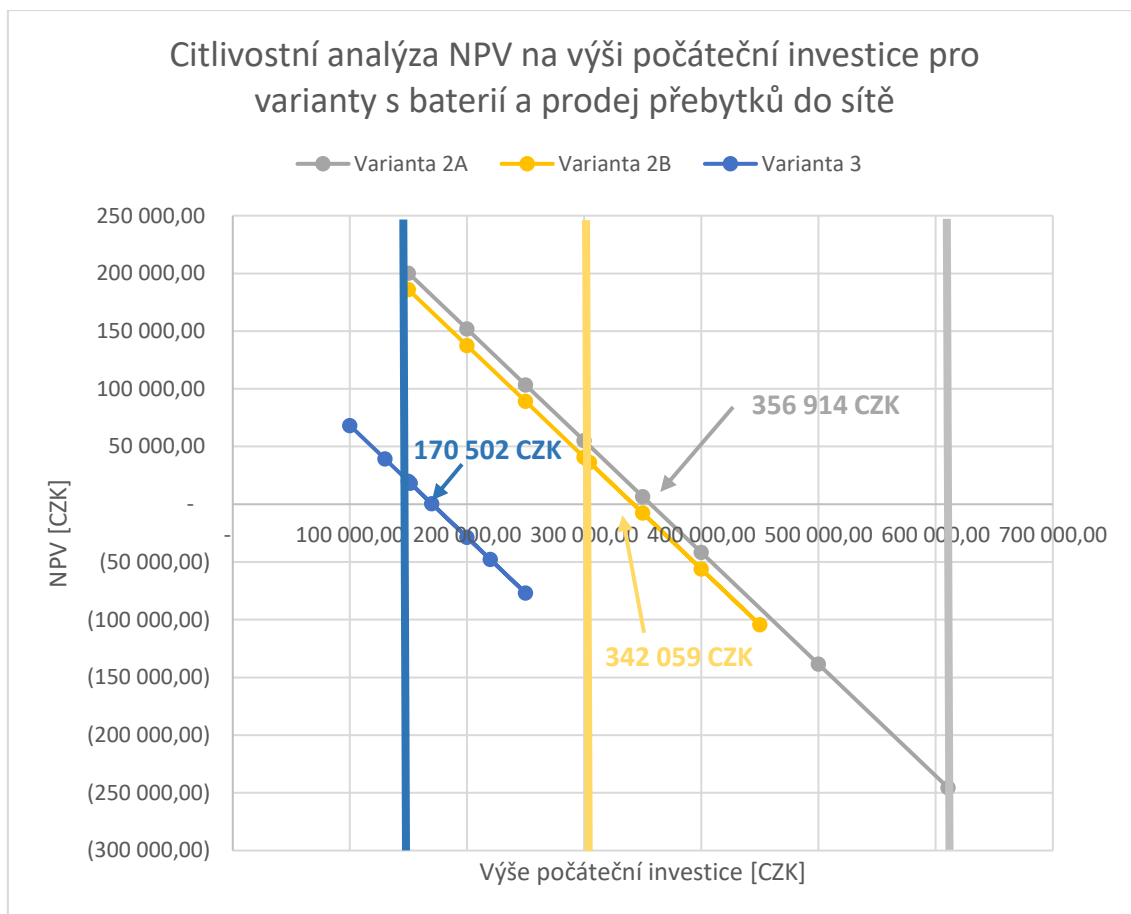
V dlouhodobém horizontu dle studie z března 2021 by investiční náklady na vodíkové technologie mohly klesnout až o 80 %. Při takovém scénáři by se již akumulace do vodíku stala ekonomicky atraktivní i pro investory z řad běžných občanů. Cestou k výraznějšímu využívání vodíku, a tedy poklesu investičních nákladů, je zvýšení účinnosti elektrolyzérů a palivových článků, zvýšení životnosti jednotlivých komponent a zjednodušení designu a výroby, aby byly drahé materiály při výrobě používány co nejméně. Právě velké množství drahých materiálů a komplikované postupy výroby elektrolyzérů a palivových článků stojí za velmi vysokými cenami těchto komponent. V dnešní době je však na první pohled zřejmá absolutní nekonkurenceschopnost vodíkových technologií ve spojení s FVE na rodinném domě nejen dle výsledků ekonomických kritérií pro tyto varianty, ale zejména v porovnání s dalšími běžně využívanými variantami, které při stejných ekonomických parametrech (cena elektrické energie, její eskalace, diskont, financování, inflace a podobně) dosahují mnohem lepších výsledků.

V úvahu připadá podpora vodíkových technologií ze strany státu formou speciální dotace, která by zohlednila ekologickou stránku a nulové emise skleníkových plynů a jiných škodlivin v průběhu celého procesu akumulace do vodíku a zpětné přeměny vodíku na elektrickou energii. Pravděpodobně však není reálné, aby i při zvážení těchto zřejmých ekologických výhod dosahovala dotace vyšších stovek tisíc korun. Vzhledem k tak velké výši by dotace mohla být považována za diskriminační vůči ostatním druhům akumulace, které jsou dnes běžně využívány.

Další, v praxi mnohem lépe využitelnou možností zvýšení konkurenceschopnosti vodíkových technologií je komunitní financování projektu. Jak vyplývá z citlivostní analýzy a výsledků ekonomických kritérií, velmi vysoká počáteční investice je naprosto zásadní pro rentabilitu projektu. Zároveň je však z porovnání výsledků variant 1A a 1B, které porovnávají dlouhodobou a krátkodobou akumulaci do vodíku, zřejmé, že změna objemu zásobníku má na výsledná ekonomická kritéria pouze malý vliv. Z tohoto důvodu se nabízí možnost financovat projekt z pozice družstva či seskupení několika majitelů nemovitostí v blízkosti a investici provést pro velký zásobník, který postačí pro celou komunitu. V praxi by se tedy několik lidí podílelo na vysokých investičních nákladech. Při pořízení velmi velkého zásobníku by tito lidé mohli využívat ekologicky čistou elektrickou energii i týdny až měsíce. Novými problémy, které by se v tomto procesu objevily, je vyřešení otázky jednotlivých podílů na investici, územní plán (komu patří pozemek, na kterém bude akumulační systém umístěn), přednostní právo na odběr elektrické energie z vodíku či právní záležitosti. Ze všech zmíněných možností snížení počáteční investice je však tato nejelegantnější.

Následuje citlivostní analýza pro zbylé tři varianty, tedy pro variantu 2A, 2B a 3. Z grafu na Obr. 6.9 je patrné, že aby dosáhlo NPV varianty 2A nulové hodnoty, počáteční investice by musela klesnout o 253 669 CZK z 610 583 CZK na 356 914 CZK, tedy o téměř 42 %. Naopak varianty 2B a 3 jsou za stávajících podmínek rentabilní, jejich čistá současná hodnota i vnitřní výnosové procento jsou kladné. Vložení kapitálu do varianty B by se investorovi vyplatilo i při maximálním zvýšení počátečních nákladů o 12 %, tedy o 37 434 CZK z původních 304 625 CZK na 342 059 CZK. Podobná situace je viditelná i u varianty 3. Pro tuto variantu platí, že NPV by dosáhlo hodnoty nula při nárůstu výše počáteční investice o 18 856 CZK ze 151 646 CZK na 170 502 CZK. Tato hodnota je stejně jako v případě varianty 2B rovna 12 % původní výše investice. Z grafu je taktéž patrné, že průběhy všech křivek mají podobný sklon. Tento trend splňuje teoretické

předpoklady, které říkají, že při poklesu počáteční investice dochází ke zvýšení čisté současné hodnoty.



Obr. 6.9: Citlivostní analýza NPV na výši počáteční investice pro varianty 2A, 2B a 3.

6.9 Shrnutí citlivostních analýz

V kapitole 6 jsem zpracoval a popsal citlivostní analýzy NPV na různé parametry výpočetního modelu. Většina citlivostních analýz splňuje teoretické předpoklady. Důkladně jsem popsal vliv změny vstupních parametrů na výsledné NPV všech variant a vysvětlil, proč k takovému vlivu dochází. V rámci Přílohy B je možné dohledat i citlivostní analýzu NPV pro dvě proměnné současně, konkrétně se jedná o cenu elektrické energie a eskalaci ceny elektrické energie.

Závěr

V této diplomové práci jsem se věnoval problematice vodíkových technologií a zejména jejich využitelnosti v akumulaci přebytků z obnovitelných zdrojů energie. Konkrétně jsem se zaměřil na spojení vodíkového hospodářství a fotovoltaické elektrárny na střeše rodinného domu. Cílem práce bylo vypracovat kompletní projekt zkoumaný z pohledu investora pro reálnou nemovitost a stanovit ekonomické a technické parametry projektu tak, aby odpovídaly skutečnosti. Na základě přesně stanovených podmínek a předpokladů jsem byl schopen vytvořit plně automatizovaný model a provést výpočty kritérií ekonomické efektivity.

Nejprve jsem v kapitole 1 podal informace o počátcích vodíkové technologie a zmínil důležité milníky ve vývoji. Přehled z minulosti umožní čtenáři lépe pochopit aktuální stav této technologie, hlouběji se zorientovat v technologiích, které již byly vyvinuty, a v technologiích, které jsou prozatím součástí budoucích plánů. Právě budoucnost vodíkové technologie je poměrně zajímavá a pro dnešní svět i velmi důležitá, proto je také součástí kapitoly 1. Akumulace energie do vodíku je součástí cílů nejen jednotlivých států, ale také společenství jako například Evropská unie. Prostředky vynaložené na vývoj a zkvalitnění vodíkových technologií jsou zcela zásadní pro budoucnost vodíku, neboť počáteční náklady na tuto technologii jsou dnes prozatím velmi vysoké. Z předních cílů budoucích let týkajících se vodíkové technologie jsem se v rešerši zaměřil především na zvýšení účinnosti, zvýšení živostnosti jednotlivých komponent a také na optimalizaci výrobního procesu pro minimalizaci používání drahých materiálů.

Po úvodu do problematiky jsem v rámci kapitoly 2 rozebral aktuální stav vodíkových technologií. Analyzoval jsem možnosti využití vodíku ve spojení s OZE, konkrétně tedy FVE. Podrobné informace jsem podal o elektrolýze vody, popsal jsem vlastnosti jednotlivých druhů elektrolýz a definoval, které jsou pro spojení s FVE (případně OZE obecně) vhodné a které naopak vhodné nejsou. Podobně jsem analyzoval také zásobníky na vodík, zmínil jsem výhody a nevýhody skladování tekutého a stlačeného plynu a opět vybral vhodnou technologii pro zkoumaný projekt. Zaměřil jsem se také na technologie využívané v palivových článcích. Podobně jako u elektrolýzy existují vlastnosti palivových článků, které je předurčují pro využití pod proměnlivým výkonem. Taková vlastnost je zásadní pro spojení s FVE. Prostor jsem věnoval také legislativní stránce projektu, zaměřil jsem se na podmínky udělení stavebního povolení a přiznání dotace Nová zelená úsporám.

Po teoretickém úvodu, který byl nezbytný nejen pro uvedení čtenáře do problematiky, ale i pro definování výhod a nevýhod jednotlivých technologií, následoval samotný návrh konkrétního systému. Návrhu tohoto systému se věnuje kapitola 3. Nejprve jsem zpracoval energetickou bilanci objektu, aby projekt odpovídal skutečně reálným hodnotám. Vzhledem k originalitě projektu jsem nevyužil možnosti zakoupení fotovoltaické elektrárny na klíč, ale zvolil jsem cestu vlastního výběru komponent. Provedl jsem výběr vhodných fotovoltaických panelů, ideálního elektrolyzátoru, zásobníku na vodík a palivového článku. Definoval jsem také varianty projektu, které se mezi sebou liší technologií akumulace a které jsou v následujících kapitolách porovnávány. Nejdůležitější variantou akumulace je akumulace do vodíku. Abych byl schopen ověřit správné nastavení parametrů modelu, vytvořil jsem také variantu akumulace do baterií, neboť tato technologie je dnes již běžně využívána a lze tedy ověřit reálné výsledky. Zaměřil jsem se také na prozkoumání závislosti rentability projektu na kapacitě akumulačního zařízení, proto je každá varianta rozdělena na dlouhodobou akumulaci (poskytuje dostatečné množství akumulované energie na zásobování nemovitosti při výpadku dodávky z distribuční sítě více než jeden den) a krátkodobou akumulaci (množství akumulované energie je zde přibližně třetinové

oproti dlouhodobé variantě). Jako poslední variantu jsem do porovnávání zahrnul systém bez akumulčního zařízení, přičemž veškeré přebytky z FVE jsou prodávány do distribuční sítě. Detailně jsem popsal všechny komponenty jednotlivých variant a definoval jsem důležité rozdíly mezi nimi.

Ještě před vytvořením modelu bylo nutné stanovit ekonomické parametry. Aby model skutečně odpovídal realitě, bylo třeba zajistit, aby se odhady příliš neodklonily od skutečnosti. Prostor v kapitole 4 jsem tedy věnoval odhadu inflace, diskontu, ceny elektrické energie (důležité bylo vypočítat variabilní a fixní složku ceny, neboť zahrnout do výpočtů i složku fixní by způsobilo nezanedbatelnou chybu) a eskalaci ceny elektrické energie. Stanovil jsem také podmínky financování projektu cizím kapitálem a definoval všechny další skryté náklady. Vzhledem k využití vlastního i cizího kapitálu jsem také vypočítal váženou cenu kapitálu, kterou jsem následně zanesl do modelu.

Poté, co jsem již definoval všechny vstupní parametry, jsem byl schopen vytvořit technicko-ekonomický model pro každou variantu. Z modelů jsem vypočítal důležitá kritéria ekonomické efektivity, konkrétně čistou současnou hodnotu, vnitřní výnosové procento, prostou dobu návratnosti a diskontovanou dobu návratnosti. Modely jsou plně automatizované, a tudíž disponují velkou přidanou hodnotou. Pokud by chtěl čtenář provést výpočet ekonomických kritérií projektu přizpůsobeného na vlastní nemovitost, po zadání vstupních proměnných (spotřeba elektrické energie, velikost FVE, cena elektrické energie a podobně) model automaticky vypočítá výsledky pro danou novou nemovitost. Vzhledem k podrobnému zpracování nejen varianty akumulace do vodíku, ale také varianty akumulace do baterií a varianty prodeje přebytků do sítě, je model možné využít i k dnes běžným projektům. Obě varianty uvažující akumulaci do vodíkových technologií nejsou pro investora rentabilní. Čistá současná hodnota dlouhodobé akumulace do vodíku činí -1 070 122 CZK, vnitřní výnosové procento je rovno -21 %, pro krátkodobou akumulaci do vodíku jsem výpočtem získal NPV rovno -1 041 522 CZK a IRR rovněž -21 %. Ani jedna z těchto investic se v průběhu životnosti projektu, která činí 20 let, investorovi nenavrátí. K navrácení investovaných prostředků během doby životnosti nedojde ani v případě varianty s dlouhodobou akumulací do baterií. V tomto případě činí čistá současná hodnota -245 505 CZK a vnitřní výnosové procento -6 %. Kladné hodnoty NPV a IRR jsou však patrné u varianty krátkodobé akumulace do baterií (NPV je rovno 36 230 CZK, IRR je rovno 6 %) a prodeje přebytku do distribuční sítě (zde NPV činí 18 249 CZK a IRR 4 %). Detailní formulace výsledků kritérií ekonomické efektivity a závěrů vyvozených z těchto analýz jsou rozebrány v kapitole 5.6.

V kapitole 6 jsem věnoval dostatečný prostor citlivostním analýzám jednotlivých variant. Prozkoumal jsem citlivost čisté současné hodnoty projektů na inflaci, diskont, cenu elektrické energie, eskalaci ceny elektrické energie, meziroční změnu spotřeby energie rodinného domu, úrok cizího kapitálu, podíl cizího kapitálu a výši počáteční investice. V rámci každé citlivostní analýzy jsem provedl podrobnou formulaci závěrů na základě informací, které daná citlivostní analýza poskytla. Stanovil jsem hraniční hodnoty vstupních parametrů, kdy se mění znaménko NPV a diskutoval jsem pravděpodobnost, s jakou tento stav může nastat, a tedy jaké potenciální riziko projektu hrozí. Rozebral jsem také problematiku opačné alokace fixních a variabilních nákladů, než jak jsou tyto náklady ve skutečnosti vyvolány při přenosu a distribuci. Většina nákladů je ve skutečnosti fixních, avšak fixní cena zaujímá v celkové ceně elektrické energie pro spotřebitele pouze minoritní podíl. Rozebral jsem tedy potenciální důsledky alokace nákladů dle skutečnosti na projekty, kdy investor vyrábí vlastní elektrickou energii.

Závěrem je zapotřebí dodat, že prozatím jsou vodíkové technologie ve spojení s FVE na střeše rodinného domu absolutně nekonkurenceschopné technologiím dnes běžně využívaným. Významným pozitivním faktorem akumulace do vodíku je však ekologická čistota. Hlavním

důvodem nerentability této technologie je zejména výše počáteční investice. Možnosti jejího snížení (vyšší dotace či komunitní financování) jsou diskutovány v kapitole 6.8. Z výsledků výpočtů také vyplynulo, že vysoký potenciál má propojení akumulace do baterií a akumulace do vodíku. V tomto systému by baterie sloužily jako buffer a krátkodobé skokové přebytky z FVE by byly akumulovány právě do baterií. Naopak dlouhodobé přebytky by byly využity v elektrolyzéru k výrobě vodíku a následné akumulaci v zásobníku stlačeného plynu na dlouhou dobu. Na rozdíl od baterií jsou ztráty během skladování vodíku nulové.

Pro podrobné a detailní informace ohledně problematiky prosím nahlédněte do závěrů jednotlivých kapitol.

Literatura

- [1] European Commission. 2020 climate & energy package. [online]. EC. [cit. 26.10.2020]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en#tab-0-0
- [2] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/29/ES ze dne 23. dubna 2009, kterou se mění směrnice 2003/87/ES s cílem zlepšit a rozšířit systém pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů ve Společenství. In: *Úřední věstník*, L 140 05.06.2009, s. 1-5. [cit. 26.10.2020] Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0063:0087:CS:PDF>
- [3] AVERSA, Raffaella, PETRESCU, Rely Victoria, APICELLA, Antonio, PETRESCU, Florian Ion. The Basic Elements of Life's. 17.12.2016. In: *American Journal of Engineering and Applied Sciences, Volume 9, Issue 4, Pages 1189-1197*. [cit. 22.12.2020] Dostupné z: <https://ssrn.com/abstract=3074489>
- [4] KLIKORKA, Jiří, HÁJEK, Bohumil, VOTINSKÝ, Jiří. *Obecná a anorganická chemie*. Praha, 1989. SNTL – Nakladatelství technické literatury Alfa, vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava. 2., nezměněné vydání. [cit. 22.12.2020] ISBN 04-607-89.
- [5] SOMOLOVÁ, Markéta, DLOUHÝ, Petr. *Výroba vodíku*. [online]. 9.5.2007 www.hytep.cz. [cit. 30.12.2020]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [6] MURADOV, Nazim. Low to near-zero CO₂ production of hydrogen from fossil fuels: Status and perspectives. 2017. In: *International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 20, Pages 14058-14088. ISSN 0360-3199*. [cit. 30.12.2020] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917314908>
- [7] REZAEI, Mostafa, MOSTAFAEIPOUR, Ali, QOLIPOUR, Mojtaba, MOMENI, Mozghan. Energy supply for water electrolysis systems using wind and solar energy to produce hydrogen: a case study of Iran. 2019. *Front. Energy* 13, 539–550. [cit. 30.12.2020]
- [8] Siemens. *Sylizer – další významný krok vpřed v rozvoji vodíkové energetiky*. [online]. 11.02.2020 www.visionmag.cz. [cit. 30.12.2020]. Dostupné z: <https://www.visionmag.cz/sylizer-dalsi-vyznamny-krok-vpred-v-rozvoji-vodikove-energetiky>
- [9] *Understanding Isotopes*. [online]. www.terpconnect.umd.edu [cit. 30.12.2020]. Dostupné z: <https://terpconnect.umd.edu/~wbreslyn/chemistry/isotopes/isotopes-of-hydrogen.html>
- [10] MASTNÝ, Petr a kolektiv autorů. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2011. [cit. 30.12.2020]. ISBN 978-80-01-04937-2.

- [11] Petroleum. *Výroba vodíku parním reformováním*. [online]. www.petroleum.cz. [cit. 30.12.2020]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [12] BALAJKA, Jiří. *Vodík a jiné nové nosiče energie*. Bratislava, 1982. SNL – Nakladatelství technické literatury Alfa, vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava. [cit. 30.12.2020] ISBN 04-607-89.
- [13] M. HASSEN SELLAMI, K. LOUDIYI. Electrolytes behavior during hydrogen production by solar energy. 2017. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 70, Pages 1331-1335*. [cit. 31.12.2020]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310917>
- [14] ZOULIAS, Emmanuel, et al. A review on water electrolysis. *Tcst*, 2004. 4.2: 41-71. [cit. 31.12.2020]. Dostupné z: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32222925/A_REVIEW_ON_WATER_ELECTROLYSIS.pdf?1383475390=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DA_REVIEW_ON_WATER_ELECTROLYSIS.pdf&Expires=1609410558&Signature=M4JP~X0ixDPfrT5tbUUgvUXxHdeKT4UNMPbBPZd3ScN6x1QTo6bOjaTvQWJg-uA0OaxrKtZGnDfzoQDBzej-fXf3ycE0fmd1djAKGA9Ux1-0X1Joo8TTFDw6bm8NDNqFk1zIly9djOQXZLAO-j4FV0G9mlTtNAJ9xK-wQyDKzROC3jyi93fUZd9d3Gj6MuO3KrJDNGy9GaLkjr~MeHEwMhcUtUPCVZA2jBA-XJN2p-WWAEb1I~sfrbSdmljCviVwE7qp5j-DraM4~etiBeu4meC~CFgEfONCnkNHZtx0Fz0jyTRfDdgQ5I2OKwnFuDmzZfCMGJ4Uy7W3SphsRT9MQA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [15] TKÁČ, Martin, STEHLÍK, Karin. *Centrální výroba vodíku*. [online]. Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2017 [cit. 31.12.2020]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2017_02_121-128.pdf
- [16] VA5 Vodíkové technologie. [online]. SUSEN, Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2020 [cit. 31.12.2020]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkum/program-teo/va9-vodikove-technologie/>
- [17] SHIN, Youngjoon, et al. Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen. 2007. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, 32.10, Pages 1486-1491. [cit. 31.12.2020]
- [18] R. LEROY, C. BOWEN, D. LEROY. The thermodynamics of aqueous water electrolysis. 2007. In: *Journal of the Electrochemical Society*, Volume 127, Pages 1954-1962 [cit. 31.12.2020]
- [19] N. NAGAI, M. TAKEUCHI, M. NAKAO. Effects of generated bubbles between electrodes on efficiency of alkaline water electrolysis. 2003. In: *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, 46(4), Pages 549-556 [cit. 31.12.2020]

- [20] ŠILHAN, Martin, TOCHÁČKOVÁ, Anna. *Využití vodíkových technologií v energetice*. [online]. www.allforpower.cz. 8.9.2020 [cit. 31.12.2020]. ISSN: 1802-8535. Dostupné z: <https://allforpower.cz/technologie-a-materialy/vyuziti-vodikovych-technologie-v-energetice-228>
- [21] TUKAČ, Vratislav, HANIKA, Jiří, VESELÝ, Václav, LEDERER, Jaromír. *Možnosti produkce vodíku parciální oxidací odpadní biomasy*. [online]. www.biom.cz. 13.07.2011 [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-produkce-vodiku-parcialni-oxidaci-odpadni-biomasy>
- [22] DOUCEK, Aleš. *Výroba vodíku z biomasy*. [online]. www.hytep.cz. 4.2.2008 [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/666-vyroba-vodiku-z-biomasy>
- [23] Züttel, A. Hydrogen storage methods. [online]. *Naturwissenschaften* 91. 157-172 (2004). [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>
- [24] R. STRÖBEL, J. GARCHE, P.T. MOSELEY, L. JÖRISSSEN, G. WOLF. Hydrogen storage by carbon materials. 2006. In: *Journal of Power Sources, Volume 259, Issue 2, Pages 781-801* [cit. 01.01.2021]
- [25] Skladování, přeprava a distribuce vodíku. [online]. www.tuvsud.cz. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/odvetvi/energetika/konvencni-energie/vodikova-energie/skladovani-preprava-a-distribuce-vodiku>
- [26] SOKANSKÝ, Karel. *Palivové články v energetice*. [online]. Ostrava: VŠB Ostrava, 2007. [cit. 01.01.2021].
- [27] DLOUHÝ, Petr, JANÍK, Luděk. Skladování vodíku I. [online]. Česká vodíková technologická platforma, 2007. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [28] NAVRÁTIL, Vladislav. J-T jev. [online]. Brno: Masarykova univerzita, 03.11.2015. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2015/FY2MP_TF3/J-T_jev.doc.pdf
- [29] CHOUDHURY, Balaji Kumar. Process Design of Turboexpander based nitrogen Liquefier. [online]. Parala Maharaja Engineering College. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/37394556_Process_Design_of_Turboexpander_based_nitrogen_Liquefier
- [30] European Commission. *Questions and answers: A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe*. [online]. EC. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_1257

- [31] HIROSE, Katsuhiko. Handbook of hydrogen storage: new materials for future energy storage. John Wiley & Sons, 2010.
- [32] KLEBANOFF, Lennie (ed.). *Hydrogen storage technology: materials and applications*. CRC Press, 2012.
- [33] Züttel, A. Materials for hydrogen storage. [online]. *Materials Today*, Volume 6, Issue 9, 2003, Pages 24-33. ISSN 1369-7021. [cit. 02.01.2021]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702103009222>
- [34] DLOUHÝ, Petr, JANÍK, Luděk. Skladování vodíku II. [online]. Česká vodíková technologická platforma, 2007. [cit. 02.01.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>
- [35] O. ULLEBERG. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a systém simulation approach. 2003. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, Pages 21-33 [cit. 03.01.2021]
- [36] Liquid Hydrogen Storage. [online]. 2014. Florida's Premier Energy Research Center at the University of Central Florida. [cit. 03.01.2021]
- [37] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články*. 2002. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky. [cit. 04.01.2021]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [38] DLOUHÝ, Petr, JANÍK, Luděk. *Palivové články*. [online]. Česká vodíková technologická platforma, 17.04.2007. [cit. 04.01.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/588-palivove-clanky>
- [39] WANG, Shuangyin, JIANG, San Ping. Prospects of fuel cell technologies. [online]. In: *National Science Review*, Volume 4, Issue 2, March 2017, Pages 163-166. [cit. 02.01.2021]. Dostupné z: <https://academic.oup.com/nsr/article/4/2/163/2866463>
- [40] MACEK, Jan. Vodíkové spalovací motory. [online]. Česká vodíková technologická platforma, 03.12.2007. [cit. 04.01.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/657-vodikove-spalovaci-motory>
- [41] ŠVÁB, Michal. Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice. [online]. Česká energetická agentura, 2006. [cit. 05.01.2021].
- [42] Projekt ukládání přebytků energie z fotovoltaických panelů do vodíku [online]. ÚJV Řež. [cit. 25.01.2021]. Dostupné z: https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/nejaderna_energetika/vodikove-technologie

- [43] Rodinné domy – zdroje energie [online]. www.novazelenausporam.cz [cit. 25.01.2021]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/nabidka-dotaci/rodinne-domy-zdroje-energie/>
- [44] Profit generators. HOGEN on-site hydrogen generation systems [online]. Linde. [cit. 25.01.2021]. Dostupné z: http://hiq.linde-gas.com/en/images/HOGEN%20on-site%20hydrogen%20generation_tcm899-95672.pdf
- [45] FRENCH, Steffen Henrik, FOU DA-ONANA, Frédéric, SERRE Guillaume, et al. Influence of the operation mode on PEM water electrolysis degradation. 2019. Aalborg University, Department of Energy Technology. [cit. 31.12.2020]
- [46] Monocrystalline and polycrystalline solar panels: what you need to know. [online]. www.energysage.com. [cit. 26.01.2021]. Dostupné z: <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>
- [47] FV panel Amerisolar 320 Wp. [online]. www.solar-eshop.cz. [cit. 26.01.2021]. Dostupné z: <https://www.solar-eshop.cz/p/fv-panel-amerisolar-320wp/>
- [48] MyH2 900. [online]. www.fuelcellstore.cz. [cit. 29.01.2021]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/my-h2-900-hydrogen-storage>
- [49] Mapy Google. Google [online]. [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: <http://maps.google.com>
- [50] Větrná růžice. [online]. www.pixers.cz. [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: <https://pixers.cz/fototapety/vetrna-ruzice-58250890>
- [51] Load Profile Generator. [online]. Noah Pflugradt [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: <https://www.loadprofilegenerator.de/>
- [52] ČESKO. Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 2. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183>
- [53] ČESKO. Zákon č. 131/2015 Sb., zákon, kterým se mění zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 2. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-131>
- [54] ČESKO. Vyhláška č. 16/2016 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 2. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-16>
- [55] Photovoltaic Geographical Information System. [online]. European Commission. [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR

- [56] Využití vodíku v automobilech. [online]. DEVINN [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/vyuziti-vodiku/>
- [57] HOGEN S SERIES 2, HYDROGEN GENERATOR. [online]. PROTON [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: https://archive-resources.coleparmer.com/Manual_pdfs/86443_02_Part_1.pdf
- [58] GreenHub 2- 1000. [online]. www.fuelcellstore.cz. [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/greenhub-2-1000>
- [59] Solární měnič Fronius PRIMO 4.6-1. [online]. www.shop.iftech.cz. [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: https://shop.iftech.cz/jednofazove/186-solarni-menic-fronius-primo-46-1.html?fbclid=IwAR32n3-HftP_itIjuzn55P3IVDq6gs80F7RYqI6fAORoso8Tj4DBoknvOOY
- [60] Regulátory WATTrouter a příslušenství. [online]. www.solarcontrols.cz. [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: https://solarcontrols.cz/cz/shop_watrouter.html
- [61] Třífázový statický čtyřkvadrantní elektroměr ZMG410CR4.2607.03. [online]. www.dk-elvis.eu. [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: <http://www.dk-elvis.eu/elektromery-3-fazove-neprime/zmg410cr4-2607-03-mid/?fbclid=IwAR3ZPKojkmpctLD4X9YVvKQA8RmNgvubk15IGsa85qUV1q6eN0-F1-yx27dQ>
- [62] Baterie pro fotovoltaiku – typy, výhody, nedostatky. [online]. Bohemia civil engineering. [cit. 03.02.2021]. Dostupné z: <https://www.bce.cz/baterie-pro-fotovoltaiku-typy-vyhody-nedostatky/>
- [63] Baterie LG Chem Resu 10H. [online]. www.shop.iftech.cz [cit. 03.02.2021]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/baterie/659-baterie-lg-chem-resu-10h.html>
- [64] TRAMBA, David. Do vody nebo do baterie. [online]. Zpravodajský servis ČVUT. 15.08.2018 [cit. 03.02.2021]. Dostupné z: <https://aktualne.cvut.cz/zpravy-z-medii/20181015-do-vody-nebo-do-baterie>
- [65] Monocrystalline Solar Module. [online]. www.monocrystalsolarpanel.com. [cit. 04.02.2021]. Dostupné z: <http://www.monocrystalsolarpanel.com/sale-10397749-250-watt-mono-solar-panel-monocrystalline-solar-module-1650-992-45mm.html>
- [66] Inflace. [online]. Česká národní banka [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/statistika/inflace/>
- [67] Prognóza ČNB – zima 2021. [online]. Česká národní banka, 04.02.2021. [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza/>
- [68] Metodické pokyny pro provedení analýzy nákladů a přínosů. [online]. Evropská komise. [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/cocof/2006/cocof_06_0008_00

_cz.pdf?fbclid=IwAR1Fa6_9mlzmvbl2DmWSOa3P3ITG6_hmasZi_ONIlgGNKLuSLIdMwDfWyAAw

- [69] Analytici: Dlouhodobý výhled cen elektřiny je vždycky nejistý. [online]. [www.oenergetice.cz](https://oenergetice.cz), 28.05.2020. [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/analytici-dlouhodoby-vyhled-cen-elekriny-je-vzdycky-nejisty>
- [70] GRECMAN, Daniel. Ceny emisních povolenek se začátkem roku 2021 dostaly na rekordní úroveň. [online]. [www.oenergetice.cz](https://oenergetice.cz), 09.01.2021. [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/emise-co2/ceny-emisnich-povolenek-se-zacatkem-roku-2021-dostaly-rekordni-uroven>
- [71] ABNETT, Kate, TWIDALE, Susanna. EU price on pollution hits record high in early 2021. [online]. Reuters, 05.01.2021. [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-eu-carbontrading-idUSKBN29A1WQ>
- [72] V Řeži pomáhají urychlit nástup „vodíkové“ ekonomiky. www.proelektrotechniky.cz. [online]. 30.03.2015. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/60.php>
- [73] Dokumentace, zkoušky a kontroly fotovoltaiky – ČSN EN 62446. iiSEL – Informační servis pro elektrotechniky. [online]. 31.10.2013. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.in-el.cz/referat/103219/dokumentace-zkousky-a-kontroly-fotovoltaiky-csn-en-62446>
- [74] REVIZE fotovoltaických elektráren. ALL4EL service s.r.o. [online]. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.all4el.cz/homepage/detail/11?title=REVIZE+fotovoltaick%C3%BDch+elektr%C3%A1ren>
- [75] MyH2 300. [online]. www.fuelcellstore.cz. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/my-h2-300-hydrogen-storage>
- [76] Výkup elektřiny z decentralních zdrojů. [online]. Skupina ČEZ. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/firmy/cs/vykup-elekriny-z-decentralnich-zdroju.html>
- [77] MATAJS, Vladimír. Splňujete podmínky dotace Nová zelená úsporám? [online]. Solární experti. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/zakladni-pravidla-ziskani-dotace-nova-zelena-usporam/>
- [78] BLANC, Herib, TAIBI, Emanuele. Green Hydrogen: reducing the cost needs scaling up of electrolyser plants. [online]. Solární experti. [cit. 04.05.2021]. Dostupné z: <https://energypost.eu/green-hydrogen-reducing-the-cost-needs-scaling-up-of-electrolyser-plants/>
- [79] Záporné úrokové sazby si dokáží představit jen obtížně. [online]. Česká národní banka. [cit. 08.05.2021]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/verejnost/servis-pro>

media/autorske-clanky-rozhovory-s-predstaviteli-cnb/Zaporne-urokove-sazby-si-dokazi-predstavit-jen-obtizne/

Přílohy

Příloha A

Úvod do problematiky akumulace do vodíku



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Úvod do problematiky akumulace do vodíku

Příloha A k diplomové práci

Bc. Petr Vaněk
Praha, 2021

Úvod přílohy

Tento text jsem samostatně vypracoval v rámci rešeršní činnosti za účelem prohloubení znalostí o problematice. Jedná se o čistě teoretický výklad látky, který čtenáři poskytne širší znalosti o tématu, kterým se diplomová práce zabývá. Některé podkapitoly Přílohy A jsou součástí samotné diplomové práce. V tom případě obsahují odstavce v příloze rozšiřující informace, které v diplomové práci nejsou obsaženy.

V kapitole I. se věnuji vodíku jako prvku. Popisuji zde, proč je pro budoucnost důležitý a jaké jeho vlastnosti ho předurčují pro využití v energetice. V rámci kapitoly II. navazuji informacemi o výrobě vodíku. Popisuji zde různé způsoby, jak vodík vyrobit, konkrétně parní reforming, elektrolýzu vody a také zplyňování biomasy. Kapitola III. je věnována problematice skladování vodíku. Základní popis jednotlivých způsobů skladování je obsažen v diplomové práci, v této příloze je však daný popis detailnější. V kapitole IV. jsou popsány další informace o palivových článcích a dalších možnostech výroby energie z vodíku.

Veškeré nezbytné informace pro pochopení projektu, výhod a nevýhod využití akumulace do vodíku a rizik spojených s projektem jsou obsaženy v textu samotné diplomové práce. Pokud by ovšem investor chtěl proniknout hlouběji do teoretických základů problematiky akumulace do vodíku, doporučuji věnovat pozornost i této příloze.

Kapitola I.

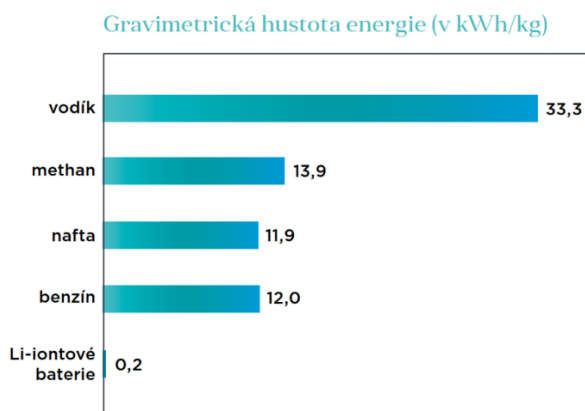
Vodík jako nositel energie

Pro začátek považuji za vhodné zmínit, proč je vodíková technologie tak důležitá pro obor elektroenergetiky. Jedná se o čistý zdroj energie, neboť spalováním vodíku vzniká pouze čistá voda. Tento prvek také vyniká výborným poměrem hmotnosti a získané energie (více v následující kapitole I.1), přičemž přeměna chemické energie na elektrickou může probíhat v palivových článcích. Nejzásadnější jsou však skutečnosti, že ho lze získávat z obyčejné vody (pomocí elektrolýzy, která je však energeticky poměrně náročná), a jeho zásoby jsou vzhledem k množství vody na Zemi a možnosti recyklace vyrobené vody téměř nevyčerpatelné.

Vodík byl dlouhé roky považován za palivo budoucnosti. Využití akumulace energie z OZE do vodíku je komplexní a složitý proces, který vyžaduje důkladnou teoretickou základnu. Aby bylo možné odborně posoudit technické a ekonomické specifikace technologie ukládání elektrické energie do vodíku a provést porovnání s dalšími vybranými způsoby akumulace, je třeba se nejprve zaměřit na samotný princip této technologie. Proto na následujících stránkách uvedu základní popis vodíku jako chemického prvku, který pomůže čtenáři pochopit detailní rozbor principu ukládání elektrické energie, jenž bude následovat. Prostor budu věnovat procesu výroby vodíku, jeho skladování a následné transformaci zpět na elektrickou energii. Zmíním také otázku bezpečnosti. Pro ucelený pohled na problematiku také popíšu využití této technologie v minulosti a poskytnu informace i o plánech do budoucnosti.

I.1 Chemické a fyzikální vlastnosti vodíku

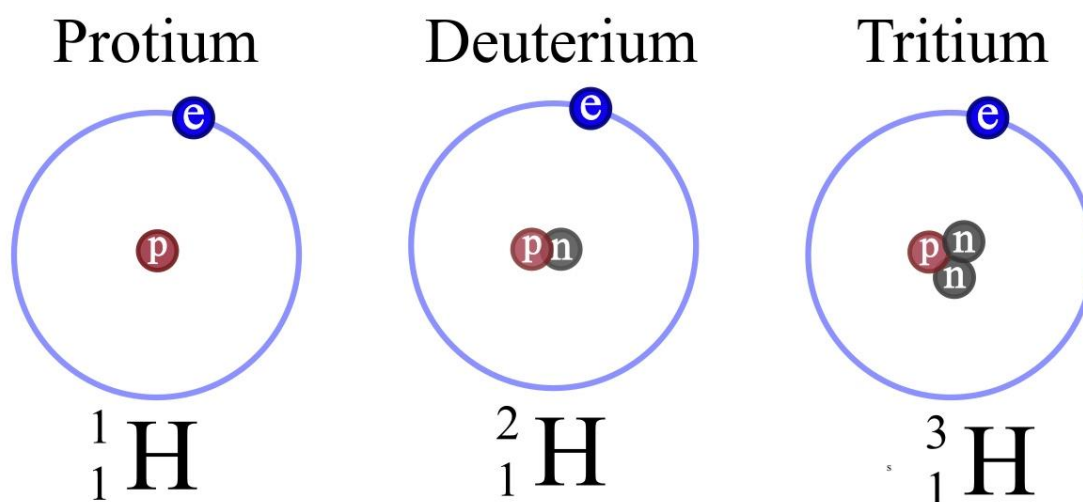
Vodík, latinsky Hydrogenium, je nejlehčí chemický prvek. Ve srovnání se vzduchem je 14,38krát lehčí a teplo vede 7krát lépe. Právě z důvodu velmi nízké hmotnosti je gravimetrická hustota energie² vysoká. Proto se vodík používá jako palivo pro pohon raketoplánů pro vesmírné lety. Porovnání gravimetrických hustot rozšířených nositelů energie je na následujícím obrázku.



Obr. I.1: Porovnání gravimetrických hustot energií pro rozšířené nositele energie [8]

² Gravimetrická hustota energie je označení pro energetický výkon na kilogram paliva.

Tento prvek má velmi nízké teploty tání a varu, konkrétně $-259,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pro teplotu tání) a $-252,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pro teplotu varu). Jedná se o plyn bez barvy, chuti a zápachu, který se v přírodě vyskytuje jako volný nebo vázaný. Ve vesmíru je právě volný vodík absolutně nejrozšířenějším prvkem, neboť tvoří hlavní složku Slunce a většiny hvězd (jejichž energie pochází z jaderné fúze) a mezihvězdné a mezigalaktické hmoty. Při velmi nízkém tlaku, který lze najít ve vesmíru, existuje vodík ve formě jednotlivých atomů. To stejné ovšem nelze tvrdit pro případ Země, kde je vázaný vodík v poměru s volným zastoupen mnohem více. To je dáno především skutečností, že je tento vodík vázán ve sloučeninách, které jsou na Zemi obrovsky rozšířené. Jedná se především o vodu v kapalném, plynném i pevném skupenství. Voda je tvořena dvěma atomy vodíku a jedním atomem kyslíku. Vodík je tedy (spolu s uhlíkem) majoritní složkou veškeré živé hmoty, ať už se jedná o zvířata nebo rostliny. Volný vodík je obsažen ve formě dvouatomových molekul H_2 ve velmi malém množství v atmosféře, přesněji řečeno v jejích horních vrstvách. Nejčastěji se vyskytuje jako nuklid značící se ^1_1H a odborně nazývaný protium. V této formě je v přírodě více než 99,9 % atomů vodíku. Dále jsou známy izotopy ^2_1H (deuterium) a ^3_1H (tritium). Tyto izotopy se liší počtem neutronů v jádře, přičemž protium neobsahuje žádný neutron, deuterium jeden neutron a tritium dva. Deuterium (také těžký vodík) je stabilní izotop, jenž nepodléhá radioaktivní přeměně. Na jeden atom tohoto izotopu připadá přibližně 6 000 atomů lehkého vodíku neboli protia (0,017 %). Pokud dojde ke spojení atomu deuteria s kyslíkem, vznikne těžká voda. Ta je používána v jaderném průmyslu, konkrétně v jaderných reaktorech, kde plní funkci moderátoru. To znamená, že zpomaluje letící neutrony z nukleární reakce a umožňuje řídit energii v reaktoru. Třetí izotop vzniká při jaderných explozích. Jeho jádro je značně nestabilní, poločas rozpadu činí více než 12 let. Tritium se vyskytuje v horních vrstvách atmosféry a ve stopovém množství i ve vodě. Celkově atomy tritia představují 10^{-18} % vodíku na Zemi. Každý atom vodíku (tedy všech tří izotopů) obsahuje jeden proton a jeden elektron, a právě to je důvod, proč je vodík nejlehčím prvkem z celé periodické tabulky prvků. [3,4]



Obr. I.II: Izotopy vodíku [9]

Vodík reaguje téměř se všemi prvky z periodické tabulky. Výjimku tvoří vzácné plyny a některé d-prvky. Jako d-prvky jsou označovány přechodné či přechodové kovy. Ty se vyznačují jednou speciální vlastností, konkrétně tyto prvky vykazují postupné přidávání elektronů do atomových orbitalů d. Tyto přechodné kovy tedy představují přechod mezi skupinou 2 a skupinou 13. Nyní se vrátím zpět k samotné reakci. Atomy vodíku vzniklé z reakce s jiným prvkem jsou značně reaktivnější než molekuly vodíku. To je dáno skutečností, že tyto atomy

obsahují nespárovaný elektron. Aby tedy molekulový vodík reagoval s dalšími prvky, je zapotřebí dodat určitou energii. Tato energie může být dodána buď ve formě tepla (reakce tedy proběhne za vyšší teploty), nebo formou katalyzátoru, který danou reakci umožní a zároveň urychlí. [4]

V následujících kapitolách se již budu zabývat samotným procesem akumulace elektrické energie do vodíku. Nejprve se zaměřím na výrobu vodíku (kapitola II), následně popíšu jeho uskladnění (kapitola III) a prostor věnuji také následné transformaci vodíku zpět na elektrickou energii (kapitola IV).

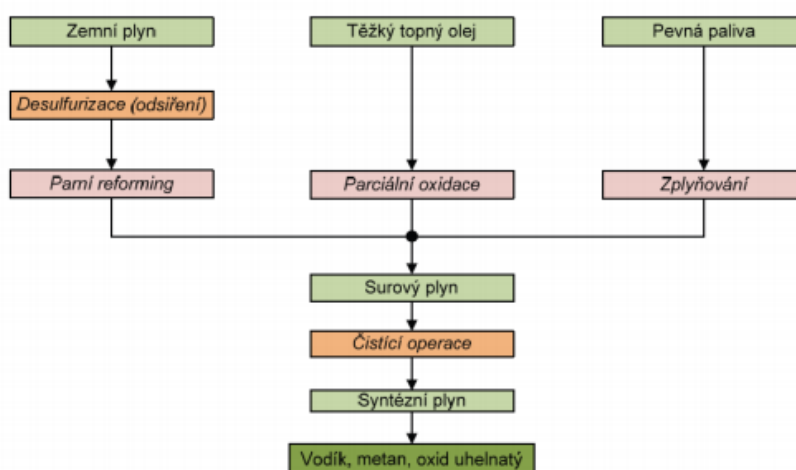
Kapitola II.

Výroba vodíku

V rámci této studie je zásadní otázkou získávání vodíku, neboť jak bylo konstatováno v předchozí kapitole, volný vodík se na Zemi s výjimkou sopečných plynů nevyskytuje. Je tedy nutné ho získat z některé ze sloučenin, ve které se vyskytuje ve formě vázaného vodíku. V dnešním světě existuje mnoho způsobů, jak daný prvek získat, přičemž tyto způsoby se liší technologickou náročností, dostupností surovin potřebných pro průběh procesu a z toho plynoucí ekonomickou náročností. Z tohoto důvodu jsou jisté metody výroby vodíku velmi využívané v praxi a jiným metodám zůstalo místo pouze v laboratorním prostředí. Výrobu vodíku je možné rozdělit na dvě skupiny procesů, které se liší tím, zda se při výrobě energie uvolňuje nebo je třeba ji dodávat. I přesto, že první skupina procesů je pro aplikaci akumulace přebytků elektrické energie z OZE nevyužitelná, považuji za nutné věnovat jí několik odstavců, aby si čtenář dokázal utvořit ucelený přehled a lépe se orientoval v rozdílech mezi zmíněnými skupinami způsobů a rozpoznal jejich výhody a nevýhody. Jistý prostor věnuji i získávání vodíku z biomasy.

II.1 Reforming

Jako první věnuji pozornost procesům, při kterých se energie uvolňuje. Takový způsob výroby je nazýván reforming a vodík je v tomto případě získáván ze sloučenin, které jsou na vyšší energetické úrovni. Mezi takové sloučeniny patří fosilní paliva. Schéma metod výroby vodíku z fosilních paliv je na obrázku II.1.



Obr. II.1: Schéma metod výroby vodíku z fosilních paliv [10]

Jak bylo konstatováno v úvodu kapitoly II, tento způsob výroby vodíku není využitelný pro akumulaci elektrické energie z OZE. V dnešním průmyslu však tato metoda absolutně dominuje, z fosilních paliv je vyráběno přibližně 98 % vodíku. To je dáno především tím, že

fosilních paliv je prozatím dostatek a energie, kterou je potřeba dodat do daného procesu výroby, je poměrně nízká. Surovinou bývá většinou zemní plyn, avšak významně je využívána i ropa a také uhlí. Výhodou tohoto způsobu je bezesporu účinnost procesu, která se blíží k 80 %. Velkou nevýhodou je však ekologická zátěž, kterou tato technologie vytváří. Na 1 kilogram vyrobeného vodíku připadá vyprodukování i 7,05 kilogramu oxidu uhličitého. V celosvětovém měřítku se ročně vyprodukuje při výrobě vodíku bezmála půl miliardy tun CO₂. Spolu se zdokonalováním technologických procesů a zlepšováním technologií čištění se postupem času snižuje množství emisí produkovaných při výrobě. Některé zdroje hovoří již o 5,5 kilogramu oxidu uhličitého na 1 kilogram vyrobeného vodíku. Ze samotné podstaty využívání fosilních paliv je však zřejmé, že emise vždy budou nenulové a tento proces výroby bude vždy způsobovat ekologickou zátěž. V neprospěch reformingu hovoří také omezené zdroje uhlí, ropy a zemního plynu. Nyní přejdu již k dalším způsobům získávání vodíku. Metoda s využitím těžkých topných olejů není v praxi využívána tolik, jako metoda využívající zemní plyn, proto se ji nebudu podrobněji věnovat. [5,6]

Dříve byla hojně využívána příprava vodíku z reakce koksu a vodní páry. V dnešní době tento způsob vzhledem k nedostatku vstupních surovin není již ve velkém využíván. Rovnice této reakce je následující:



kde C je uhlík neboli v tomto případě koks. Z rovnice plyne, že z procesu vznikne jeden atom vodíku, avšak reakce může probíhat dál ve formě konverze CO z reforméru dle rovnice:



To znamená, že vzniká ještě další atom vodíku z reakce oxidu uhelnatého a vodní páry. Podrobněji se zaměřím na proces získání hydrogenia ze zemního plynu, což je nejen průmyslově nejvyužívanější, ale také energeticky a ekonomicky nejlevnější způsob. Nejprve je třeba vstupní surovinu, tedy zemní plyn, odsířit. Sloučeniny síry totiž působí na katalyzátory reformování jako katalytický jed a mohou tudíž ohrozit průběh procesu. Aby bylo možné takto vodík vyrobit, je třeba docílit teploty přibližně 1 000 °C. Chemická rovnice tohoto procesu je následující:

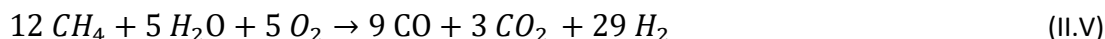


kde CH₄ je metan (neboli zemní plyn), C je uhlík a H₂ je volný vodík. Z jedné molekuly zemního plynu touto reakcí vzniká jeden atom uhlíku a dva atomy vodíku. Pokud není možné dosáhnout tak vysoké teploty, aby došlo k uskutečnění reakce, je možné nechat reagovat zemní plyn s vodní párou. V praxi je právě využití vodní páry nejčastější a většina vodíku je v dnešním průmyslu vyrobena právě tímto způsobem. V první fázi procesu se za přítomnosti katalyzátoru přivede do vodní páry metan (tlak v této fázi dosahuje 0,3 až 2,5 MPa). I pro tento proces je však nutné dosáhnout teploty minimálně 500 °C. Tuto reakci znázorňuje rovnice:

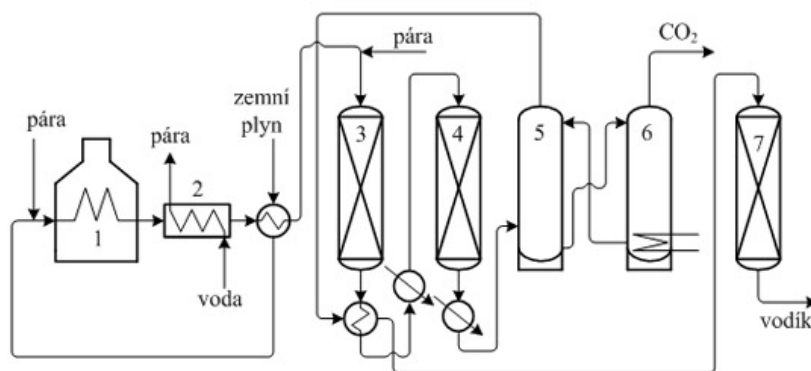


kde H₂O je voda ve formě vodní páry, CO je oxid uhelnatý a vznikají 3 atomy vodíku. I v tomto případě lze využít další reakce oxidu uhelnatého s nově přidanou vodní párou k následné výrobě

dodatečných atomů vodíku (dle rovnice II.II). Pokud dojde k přidání kyslíku do původní reakce metanu a vodní páry, dojde k zajímavé úpravě. Ta je zřejmá z následující rovnice:



kde O_2 je kyslík a CO_2 oxid uhličitý. Je patrné, že velmi vzrostl počet získaných atomů vodíku (vyrobí se celkem 29 atomů), avšak za cenu vyššího množství emisí. Oxid uhličitý produkovaný při výrobě se buď vypouští do atmosféry nebo dochází k jeho zkapalňování poté, co absolvuje důkladné čištění. Další možností je i převedení do tuhého stavu, ten je nazýván také jako suchý led. V tomto skupenství se pak oxid uhličitý využívá k chlazení například v potravinářském průmyslu. Na následujícím obrázku je schéma parního reformování zemního plynu jakožto nejpoužívanější metody výroby vodíku. Ze všech rovnic vyplývá závěr, že k získání vodíku touto cestou je třeba dodat procesu pouze malé množství energie (především zvýšení teploty, aby proběhla reakce), zatímco energie uvolněná z procesu je mnohem větší. Aby však bylo možné mluvit o vodíku jako o ekologicky čistém palivu, je nutné, aby i proces jeho výroby byl ekologicky šetrnější. Takový způsob již existuje a popíšu ho v následující kapitole. [5]



(1 - pec, 2 - kotel na výrobu páry, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 - absorbér CO₂, 6 - desorbér CO₂, 7 - metanizér)

Obr. II.II: Schéma parního reformování zemního plynu [11] (upraveno)

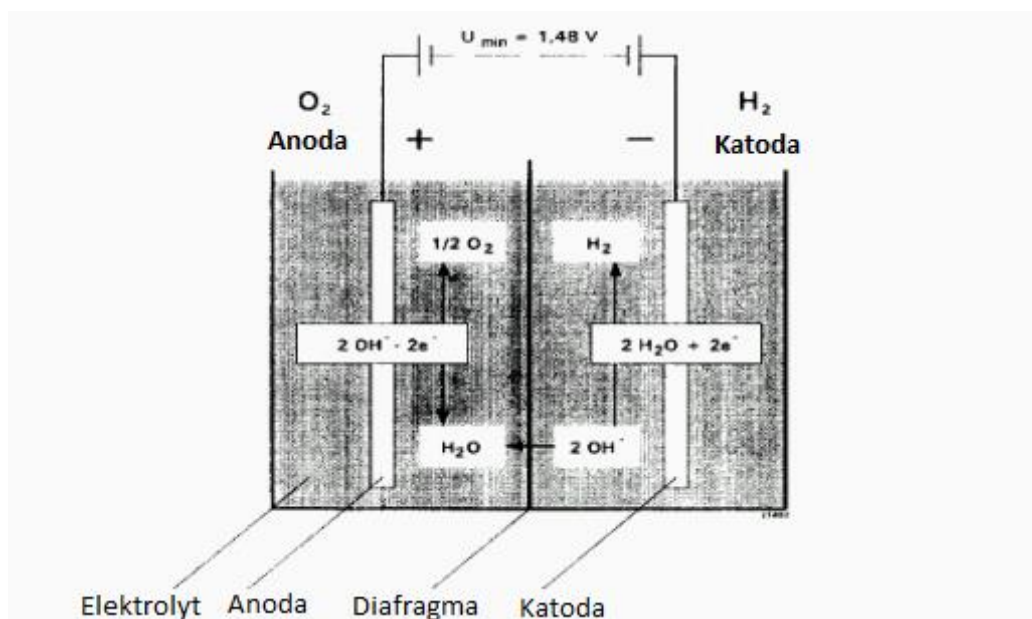
II.II Elektrolýza vody

Využití v energetice se věnuje diplomová práce. Zde krátce zmíním potenciál využití v dopravě. Na základě studie z Iránu lze konstatovat, že výstavbou jedné sestavy větrných turbín typu Gamesa G47 dojde k vyprodukování 91 kilogramů vodíku za jediný den. Tato hodnota postačí pro pohánění 91 aut na celý týden, což ušetří týdně 1 347 litrů benzínu. V případě, že by došlo k využití sluneční energie místo větrné, postavila by se soustava tisíce panelů X21-345. Takto se vyrobí 20 kilogramů vodíku denně, přičemž tolik vodíku dokáže pohánět 20 aut celý týden. Tím dojde k úspoře 296 litrů benzínu týdně. [7]

V rámci diplomové práce věnuji prostor především současnému stavu elektrolýzy vody. Popsal jsem detailně technologii PEM a SOFC, neboť princip PEM elektrolýzy využívá elektrolýzér zvolený do projektu k rodinnému domu a technologie SOFC se považuje za technologii budoucnosti. V následujících odstavcích podám podrobnější informace také o alkalické elektrolýze a o faktorech, které mají na elektrolýzu významný vliv.

II.II.I Alkalická elektrolýza (AEC)

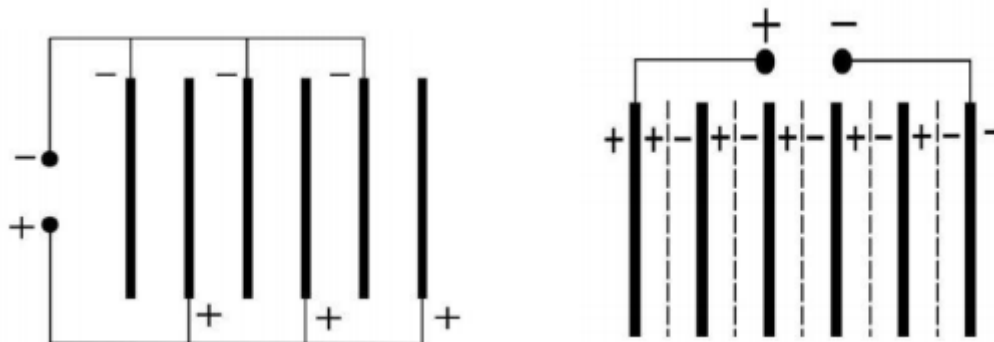
Princip této metody je znázorněn na obrázku II.III:



Obr. II.III: Princip alkalické elektrolýzy [14] (upraveno)

Dvě molekuly vody jsou na katodě rozštěpeny na jednu molekulu vodíku a dva ionty hydroxidu. Vodík opouští povrch katody v plynné formě a hydroxidové ionty se vlivem elektrického pole pohybují mezi katodou a anodou. Při průchodu porézním separátorem (jenž je nejčastěji vyroben z azbestu) pak dochází k rozkladu těchto iontů na polovinu molekuly kyslíku a jednu molekulu vody. Kyslík, stejně jako vodík v případě katody, následně opouští povrch anody v plynném skupenství. [14]

Nejjednodušší, a tedy i nejpoužívanější zapojení elektrolyzáru je monopolární. Existuje však i zapojení bipolární, které skýtá zajímavé výhody. Bipolární zapojení ušetří značnou část prostoru a materiálu, proto je vhodné ho využít u velkých elektrolytických jednotek. Mezi nevýhody bipolárního zapojení patří výskyt zkratových proudů uvnitř elektrolytu. Z toho důvodu je nutné upravit elektrolyt a celkový systém vedení plynu v elektrolyzáru. Rozdíl mezi monopolárním a bipolárním zapojením je patrný z následujícího obrázku:



Obr. II.IV: Monopolární a bipolární zapojení alkalického elektrolyzáru [12]

Monopolární zapojení tedy znamená, že každá elektroda je zapojena buď jako katoda, nebo jako anoda. Naopak při zapojení bipolárním jsou ke zdroji elektrického napětí

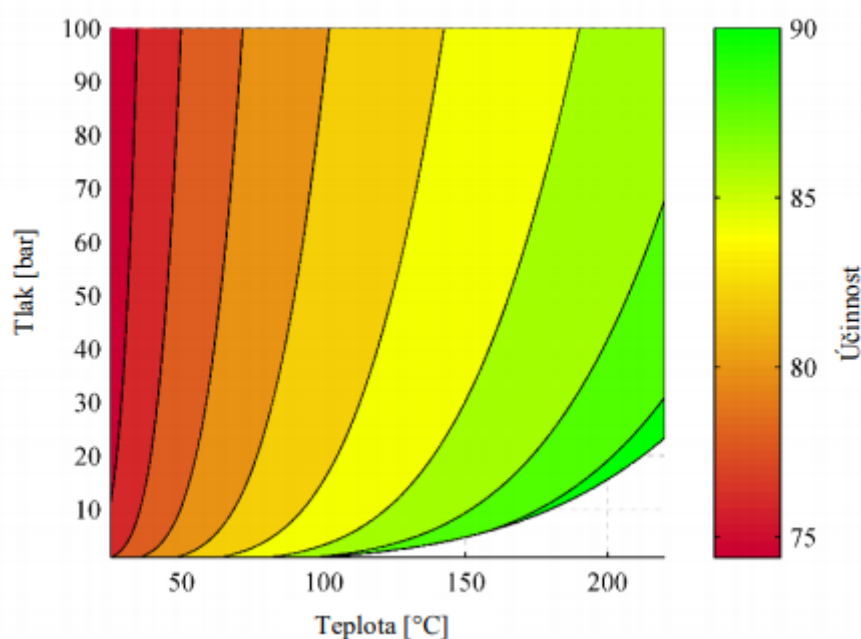
připojeny pouze elektrody krajní a napětí ze zdroje se následně rozdělí v poměru mezi ostatní elektrody. V praxi lze využít i kombinaci obou zapojení. [12,14]

II.II.II Faktory ovlivňující průběh elektrolýzy

Vždy, když jsem v této kapitole provedl porovnání různých metod výroby vodíku, jsem definoval přijatý předpoklad, že vnější podmínky pro porovnávané metody jsou stejné a v čase konstantní. Důvodem je skutečnost, že právě vnější podmínky jako teplota, tlak, vzdálenost elektrod a napětí mají na průběh elektrolýzy velký vliv. Nejprve se zaměřím na teplotu. Vliv teploty a tlaku na průběh elektrolýzy je rozebrán i v samotné diplomové práci, zde je mu však věnován podstatně větší prostor. Vliv teploty na elektrolýzu je patrný na obrázku II.V. Z toho plyne kauzalita, že se zvyšující se teplotou dochází ke zvyšování celkové energie, kterou je potřeba systému dodat, také zvyšování dodávané energie, avšak snižování elektrické energie, která se do soustavy dodává. Z toho důvodu obecně platí, že se zvyšující se teplotou se zvyšuje i účinnost. [17]

Tlak ovlivňuje výrobu vodíku následujícím způsobem: Se zvyšujícím se tlakem roste množství energie potřebné k tomu, aby elektrolýza proběhla. Z toho důvodu tedy klesá účinnost. Na druhou stranu však s rostoucím tlakem klesá odpor v elektrolytu. Odpor v elektrolytu je způsoben bublinami plynu, jenž je vlivem zvýšeného tlaku stlačen a dojde ke zmenšení jeho objemu. Odporové ztráty tedy s rostoucím tlakem klesají. [12,18]

Vliv změny teploty a tlaku na účinnost je znázorněn na analýze na obrázku II.V. Analyzována je alkalická elektrolýza pro teploty 0 až 250 °C a tlaky od 0 do 100 barů.



Obr. II.V: Vliv změny teploty a tlaku na účinnost alkalické elektrolýzy [18]

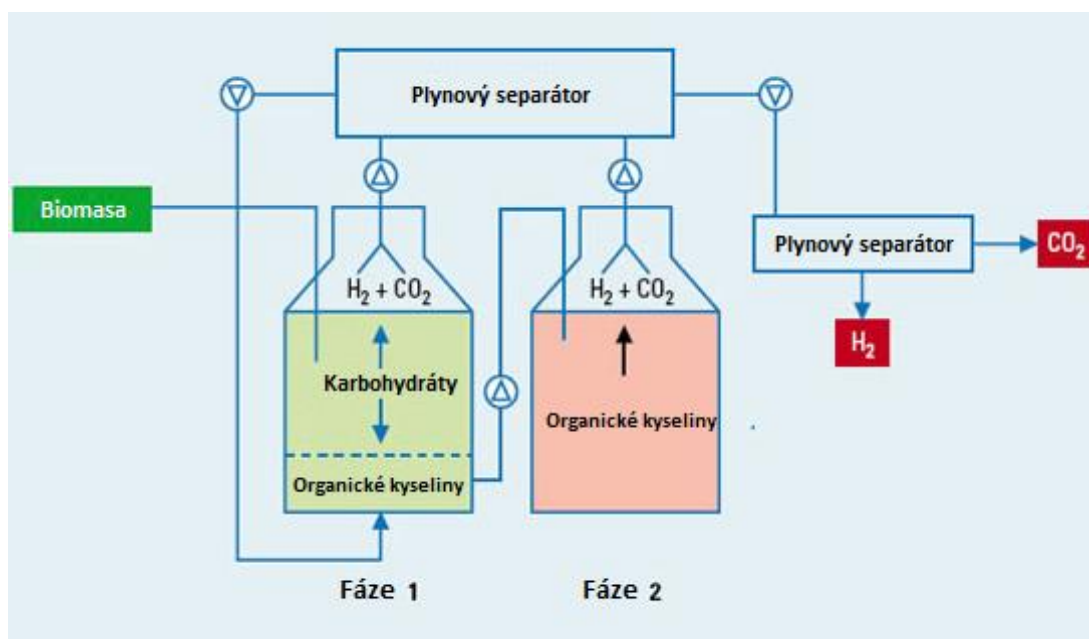
Kromě teploty a tlaku mají velký vliv na elektrolýzu i elektrody, přesněji jejich aktivní plocha a vzdálenost mezi nimi. Vzhledem ke skutečnosti, že elektrolyt je vyplněn nežádoucími bublinkami plynu, které zvyšují odpor a tedy i ztráty, platí pravidlo, že se zvyšující se vzdáleností mezi elektrodami dochází ke snižování účinnosti (větší vzdálenost znamená více elektrolytu a tedy více odporových bublin). Zároveň však není vhodné, aby byly elektrody příliš blízko u sebe. V tom případě je celý prostor mezi anodou a katodou vyplněn plynem a ztráty jsou značné.

Ideální vzdálenost elektrod je v intervalu od 0,8 mm do 3 mm. Aktivní plocha elektrody je plocha, která je v přímém kontaktu s elektrolytem. Pouze na této ploše může následně vznikat vodík. V praxi jsou anoda i katody ponořeny v elektrolytu úplně celé, dochází však k zachytávání výše zmíněných bublin plynu na jejich povrchu a tedy snižování aktivní plochy. Aby se tomuto problému zabránilo, nechává se elektrolyt systémem cirkulovat. Právě cirkulace zamezí zachytávání bublin na povrchu elektrod. [19]

Jako poslední zde zmíním vliv elektrického napětí zdroje, jenž je připojen na elektrody. Pokud leží napětí v intervalu od 1,229 V do 1,481 V, teplo je dodáváno do systému z okolí a účinnost výroby vodíku přesahuje 100 % (maximální hodnota účinnosti činí až 120 %). Při hodnotě 1,481 V je účinnost rovna 100 %, avšak v praxi je třeba překonat odporové vlivy a napětí zdroje je tedy vždy větší než zmíněná hodnota 1,481 V. Z těchto informací však plyne, že se zvyšujícím se napětím klesá účinnost systému. Na druhou stranu s rostoucím napětím je možné pozorovat efektivnější štěpení molekul vody na vodík a kyslík. [35]

II.III Zplyňování biomasy

Existuje více způsobů, jak docílit zplyňování biomasy. Nejzákladnější je technologie biochemická, avšak její nevýhoda je nízký obsah vodíku v poměru s oxidem uhličitým ve vytvořeném plynu a také celkově dlouhá doba procesu. Větší potenciál má technologie využívající vodní páru. Tato termochemická technologie je podobná získávání vodíku z uhlí. Na následujícím obrázku je znázorněn princip získávání vodíku z biomasy:



Obr. II.VI: Schéma procesu výroby vodíku z biomasy zplyňováním [22] (upraveno)

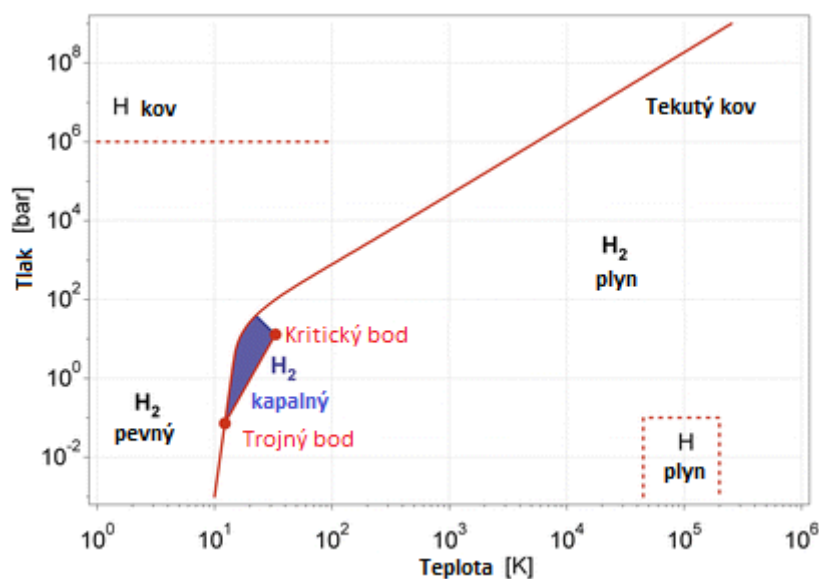
Biomasa je velmi široký pojem a ne všechny složky, které označení biomasa splňují, jsou pro tento proces vhodné. Pro výrobu vodíku se jeví jako vhodný především dřevní odpad a rostlinná hmota, která je odpadem při výrobě rostlinných olejů. Tento typ biomasy obsahuje přibližně 6 % vodíku. Ostatní biomasa nemusí splňovat nároky na složení, vlhkost a obsah popelovin, a proto ji nelze využít. Jelikož je třeba zvážit i cenu dopravy biomasy do místa zpracování, momentálně je v ČR prakticky využitelný pouze řepkový šrot. Ročně je ho k dispozici přibližně 600 000 tun. [21]

Samotný proces má dva stupně. Nejprve je palivo zplyňováno buď vzduchem, přičemž takto vzniklý plyn má výhřevnost $5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, nebo kyslíkem, tehdy dosahuje plyn výhřevnosti až $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Následuje pyrolýza při přibližně $600 \text{ }^\circ\text{C}$, při níž dochází k disociaci plynu a úniku těžkých par. V těchto parách je obsažen oxid uhličitý, oxid uhelnatý, plynné uhlovodíky a právě také vodík. Poté již dochází ke zplyňování sazí reakcí s kyslíkem, vodní párou a vodíkem (část sazí je možné spálit a dosáhnout tak vyšších teplot). Právě teploty při tomto procesu musí být poměrně vysoké, i přes $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$, což činí tuto metodu energeticky náročnější. Celková účinnost výroby vodíku zplyňováním biomasy je nízká, například v porovnání s vysokoteplotní elektrolýzou dvakrát až třikrát nižší. [15,21]

Kapitola III.

Uskladnění vodíku

V předchozí kapitole jsem podal informace ohledně výroby vodíku. Nyní je třeba rozebrat podrobněji další část cyklu vodíkové technologie, a to uskladnění vyrobeného vodíku. I přes skutečnost, že skladování vodíku bylo rozebráno v rámci diplomové práce, odstavce níže obsahují detailnější informace o jednotlivých způsobech. Kvalitní uskladnění umožňuje uchovat energii tohoto plynu na pozdější použití, vyřešení otázky, jak plyn uchovat, je pro celý systém akumulace energie do vodíku naprosto zásadní. Důležitá je vzhledem ke skutečnosti, že vodík tvoří v chemické reakci se vzduchem velmi hořlavou směs, bezpečnost jeho skladování. To musí být nejen bezpečné, ale zároveň i energeticky efektivní, aby nedocházelo k nežádoucím únikům plynu a samozřejmě také ekonomicky dostupné. Z podstaty vodíku jako prvku vyplývá, že je možné ho skladovat jak v plynném, tak v kapalném skupenství. Na obrázku III.1 je graficky znázorněno, v jakém skupenství se vodík nachází v závislosti na teplotě a tlaku.



Obr. III.1: Skupenství vodíku v závislosti na teplotě a tlaku [23] (upraveno)

Z grafů vyplývá, že vodík je při velmi nízkých teplotách pevný. Jeho hustota v tomto stavu je 70,6 kg·m⁻³. V tomto stavu však v praxi vodík uchovávat nelze, neboť dosáhnout takových vnějších podmínek je prakticky nemožné. Kapalný vodík ovšem vytvořit lze. Aby tento plyn zkapalněl, je nutné, aby průnik teploty a tlaku ležel v malém prostoru začínajícím trojným bodem, jenž je roven $T_T = 21,2$ K, a končícím kritickým bodem (ten je roven $T_C = 32,0$ K). Při vyšších teplotách je již vodík plynný. Základem skladování je zmenšení objemu vodíku. 1 kilogram vodíku za standardních atmosférických podmínek má objem 11 m³. Existuje několik způsobů, jak docílit zvýšení hustoty vodíku v zásobníku, přičemž každý způsob vyžaduje nemalou energii. Plyn může být buď stlačen, nebo lze snížit teplotu pod kritický bod. Jak bylo psáno výše, teplota kritického bodu je poměrně nízká, činí 32 K. To je dáno silnou repulzní interakcí

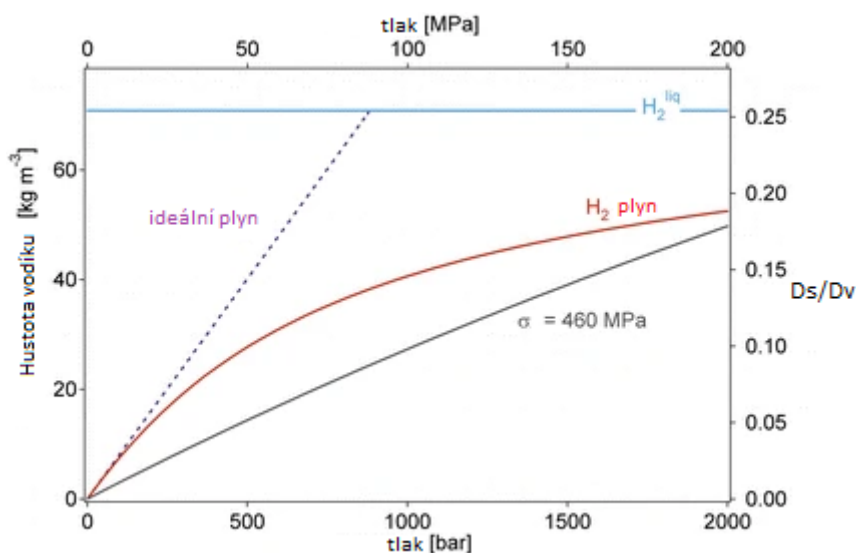
mezi molekuly vodíku. Třetí možností jak docílit snížení objemu plynu, je tedy jeho adsorpce do jiného materiálu. Reakcí s dalším materiálem dojde k omezení vzájemných interakcí molekul vodíku. Všechny varianty skýtají jisté výhody a nevýhody, které je nutné definovat a náležitě popsat. Podobně jako v případě vodíku platí i pro skladování, že jisté metody jsou více využívané a jiné méně. V následujících kapitolách tedy rozeberu ty, které jsou pro dnešní aplikace důležité. [23]

III.1 Skladování plynného vodíku

Zásobníky na stlačený plynný vodík jsou dnes nejběžnějším typem zásobníků. Maximální tlak v klasických nádobách dosahuje až 20 MPa, ovšem nový typ kompozitních nádob vydrží tlak i 80 MPa. Při takovém tlaku již vodík dosahuje hustoty $36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je přibližně polovina hustoty tekutého vodíku. Stlačování se řídí následující rovnicí:

$$\frac{D_S}{D_V} = \frac{\Delta p}{2 \cdot \sigma + \Delta p} \quad (\text{III.1})$$

kde D_S je tloušťka stěny nádoby, D_V je vnější průměr nádoby, Δp je přetlak uvnitř nádoby a σ je pevnost v tahu materiálu, ze kterého je nádoba vyrobena. Pevnost v tahu je materiálová konstanta, jejíž jednotky jsou Pa. Pro příklad, pevnost v tahu pro hliník činí 50 MPa, zatímco pro vysoce kvalitní ocel 1 100 MPa. Nové kompozitní materiály mají pevnost v tahu ještě mnohem vyšší, než ocel. Na následujícím obrázku je uvedeno, jak se mění hustota vodíku se vzrůstajícím tlakem. Měřítka hustoty je zaneseno na levé svislé ose, zatímco na pravé svislé ose je poměr D_S ku D_V . Vodorovná osa je osa tlaku. [23]



Obr. III.II: Změna hustoty vodíku v závislosti na změně tlaku [23] (upraveno)

Je zřejmé, že takto stlačený vodík může znamenat nemalé bezpečnostní riziko, zejména pokud je uskladněn v obydlených oblastech. Proto jsou zásobníky vyrobeny ze tří vrstev materiálů. Vnitřní polymerní vrstva je obalena kompozitní vrstvou vyrobenou z uhlíkových vláken, která odolává dlouhodobému namáhání. Vše obklopuje ještě vnější vrstva z aramidů, což je pevný žáruvzdorný syntetický materiál. Tato vrstva je schopná ochránit nádobu před mechanickým poškozením a korozí. Vodík může být stlačen klasickým pístovým kompresorem. Na stlačení 1 kilogramu vodíku z tlaku 0,1 MPa na 80 MPa je zapotřebí dodat energii 2,21 kWh

v případě izotermického stlačení. V praxi však izotermického stlačení dosáhnout nelze, proto je hodnota potřebné energie ještě vyšší. Příklad nádoby na uskladnění stlačeného vodíku je na následujícím obrázku. [23,24]



Obr. III.III: Nádoba na uskladnění stlačeného vodíku [25]

III.II Skladování tekutého vodíku

Z obrázku III.IV vyplývá, že tekutý vodík je skladován v kryogenní nádobě při teplotě trojného bodu, která je rovna $T_T = 21,2$ K. Tlak však může být atmosférický.

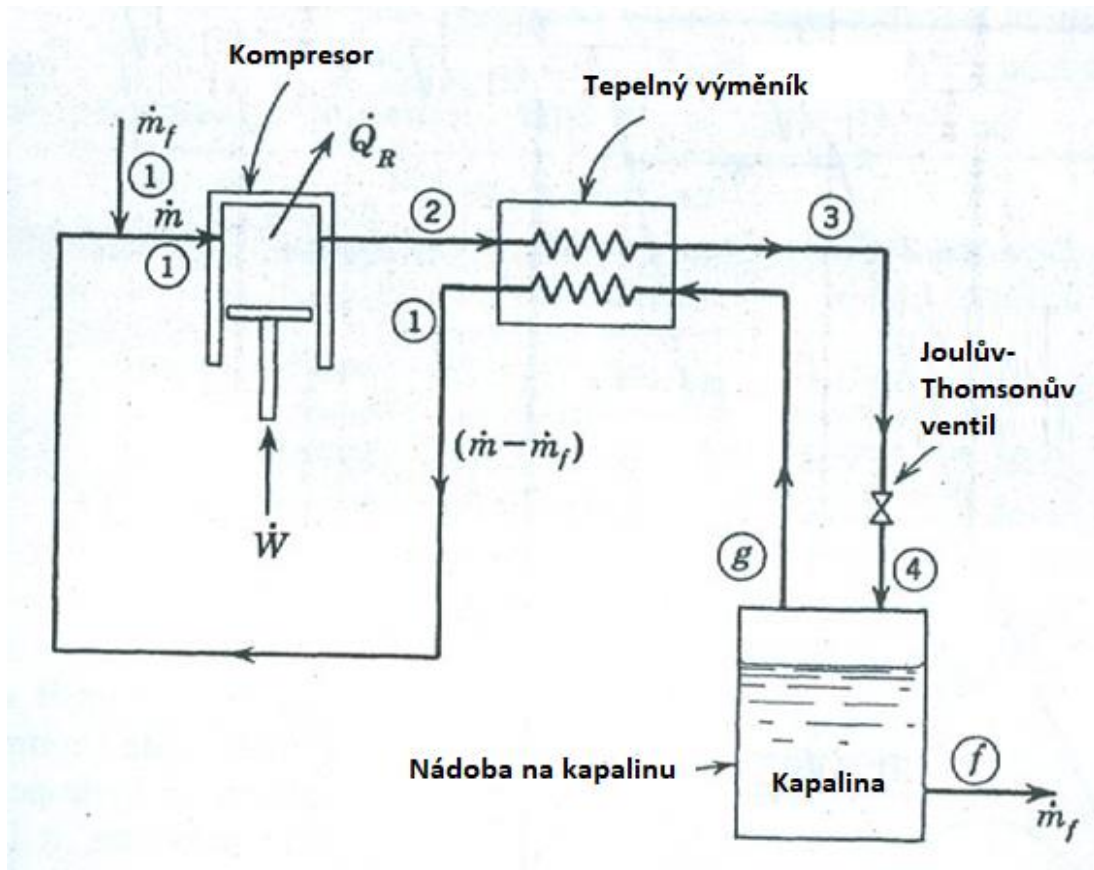


Obr. III.IV: Nádoba na uskladnění tekutého vodíku [36]

Hustota kapalného vodíku je o $0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ vyšší, než hustota pevného vodíku, je tedy rovna $70,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Energetické nároky na dosažení takto nízké teploty jsou však značné, činí až 40 % obsažené v uskladněném vodíku. Zásadní problémy jsou tedy jednak provedení dostatečně energeticky úsporného snížení teploty na potřebnou hodnotu a zároveň dostatečné tepelné odizolování vnitřku nádoby tak, aby nedocházelo k nadměrnému odpařování vodíku. Vlivem nedokonalé tepelné izolace nádoby však vždy dochází k odpařování vodíku, je tedy nutné, aby byla nádoba vybavena přetlakovým mechanismem u upouštění odpařeného vodíku, neboť čím vyšší tlak v nádobě je, tím rychleji dochází dle grafu na obrázku III.II k odpařování tekutého vodíku. Jelikož teplo prostupuje do nádoby skrz její stěny, tvar nádoby se volí tak, aby byla plocha stěn minimální. Této podmínce nejlépe vyhovují sférické nádoby. Výroba velkých sférických

zásobníků je však velmi obtížná, a tedy i nákladná. Obecně lze konstatovat, že ztráty vypařováním vodíku jsou přímo úměrné poměru povrchu nádoby ku jejímu objemu. Pro sférickou nádobu o objemu 50 m³ platí, že se denně vypaří 0,4 % vodíku, pro nádobu s objemem 100 m³ již pouze 0,2 % a pro nádobu o 20 000 m³ je hodnota výparu rovna pouze 0,06 % objemu vodíku. [23,26]

Nejjednodušší způsob, jak zkapalnit vodík, je využití Jouleova-Thomsonova jevu. Princip tohoto jevu je na následujícím obrázku, kde \dot{m} a \dot{m}_f jsou hmotnostní toky látek, \dot{Q}_R je tepelný tok vydaný plynem při kompresi a \dot{W} je práce vykonaná na stlačení plynu:



Obr. III.V: Schéma Joulova-Thomsonova jevu [29] (upraveno)

Vodík v plynném skupenství musí být nejdříve ochlazen pod teplotu 202 K. Toho se docílí například ochlazením pomocí tekutého dusíku (ten má teplotu 78 K). Plyn je poté stlačen a následně dále ochlazován v tepelném výměníku. Následně prochází škrtícím ventilem, kde podstupuje adiabatickou Joulovu-Thomsonovu expanzi. Tento jev spočívá ve skutečnosti, že pokud plyn při adiabatické expanzi koná práci, je tato práce konána na úkor vnitřní energie plynu. Protože klesá vnitřní energie, klesá tedy i kinetická energie částic vodíku a tím dochází k poklesu teploty. Z uvedeného vyplývá, že adiabatická expanze reálného plynu je vždy doprovázena změnou teploty. Při takové expanzi dojde vlivem poklesu teploty plynu k jeho částečnému zkapalnění. Nezkapalněný ochlazený plyn je následně oddělen od tekutiny a vrácen do kompresoru přes tepelný výměník a celý proces se opakuje. Na zkapalnění 1 kilogramu vodíku z pokojové teploty je zapotřebí dodat energii přibližně 15,2 kWh. Právě tato relativně vysoká hodnota omezuje aplikaci zkapalnění vodíku za účelem uchování energie pouze tam, kde není důležitá cena uskladnění a také tam, kde je (vzhledem k neustálému vypařování) vodík spotřebován v poměrně krátkém čase. Těmto podmínkám vyhovuje například použití ve vesmírných programech. [23,27,28]

III.II Shrnutí skladování vodíku

V kapitole III jsem podal teoretický základ k problematice skladování vodíku. Popsal jsem dnes nejvíce využívaný způsob, tedy uskladnění stlačeného vodíku. Rozebral jsem i další dnes již poměrně využívaný způsob s velkou perspektivou do budoucnosti – skladování tekutého vodíku. O dalších alternativních způsobech se zmiňuji v rámci diplomové práce. V následující tabulce je souhrn specifikací jednotlivých metod, které jsem popsal výše.

Tab. III.I: Shrnutí způsobů skladování vodíku [33]

Metoda skladování	ρ_m [%]	ρ_v [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	p [bar]
Stlačený vodík	13	< 40	PT	800
Tekutý vodík	<A>	70,8	-252	1
Fyzisorpce vodíku	2	20	-80	100
Metalhydridy a hydridy	< 18	150	> 100	1

kde ρ_m značí uskladněné procento hmoty vodíku, ρ_v je hustota uskladněného vodíku, T je teplota a p je tlak.

Poznámky: <A> procento uskladněného vodíku závisí na velikosti nádoby

Kapitola IV.

Přeměna vodíku na elektrickou energii

V minulých kapitolách jsem podal informace ohledně výroby vodíku a jeho uskladnění. Nyní je třeba zaměřit se na proces zpětného získání energie, která byla do vodíku uložena. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o velmi hořlavý plyn, jednou z možností získání energie je spalování plynu ve speciálním spalovacím motoru nebo turbíně. Z tohoto procesu získá uživatel tepelnou energii, kterou následně může přeměnit na elektrickou. Tento způsob využití vodíku je dnes poměrně rozšířený i v průmyslové praxi, avšak velkou nevýhodou je nízká úspěšnost. Druhým způsobem je přeměna vodíku na elektrickou energii přímo v palivových článcích. Tato metoda se ke kombinaci vodíku a obnovitelných zdrojů energie hodí nejlépe, proto jí v následujících odstavcích věnuji podstatně větší prostor. [37]

IV.1 Palivové články

V diplomové práci jsem podrobně popsal technologie PEMFC, ACF a SOFC. Existují však i další důležité technologie. Těm věnuji prostor v následujících odstavcích. Nejprve je ale třeba popsat obecnou chemickou rovnici palivového článku.

Obecné chemické rovnice reakcí v palivovém článku jsou následující. Pro reakci na anodě platí rovnice:



Rovnice na katodě má tento tvar:



Celková rovnice reakce v palivovém článku tedy vypadá následujícím způsobem:



Z těchto rovnic plyne, že při reakci vzniká pouze voda. Výroba elektrické energie z vodíku v palivových článcích tedy nezatěžuje životní prostředí žádnými skleníkovými plyny a jinými škodlivinami. [37,38,39]

IV.I.I PAFC

Palivové články PAFC jsou dnes průmyslově nejvíce využívaným typem. Princip tohoto článku je podobný klasickému AFC. Technologie se liší v použitém elektrolytu a elektrodách a v různých provozních parametrech jako například teplota a tlak. Elektrolytem v tomto případě je stoprocentní kyselina fosforečná. Materiálem elektrod je pórovitý grafit vytvarovaný do tenkých destiček, přičemž ty jsou pokryty tenkou vrstvou platiny. Při tomto způsobu zpracování vodíku vzniká velké množství tepla, které je nutné odvádět. Toto teplo lze však využít v kombinaci s kogeneračními jednotkami, které toto odpadní teplo dokáží zužitkovat. Účinnost kombinované výroby energie pak dosahuje i 80 %. Dále již mohou přejít rovnou k popisu chemických reakcí. Rovnice na anodě je následující: [10, 37, 38]



Chemická reakce na katodě je totožná s reakcí na katodě v případě AFC:

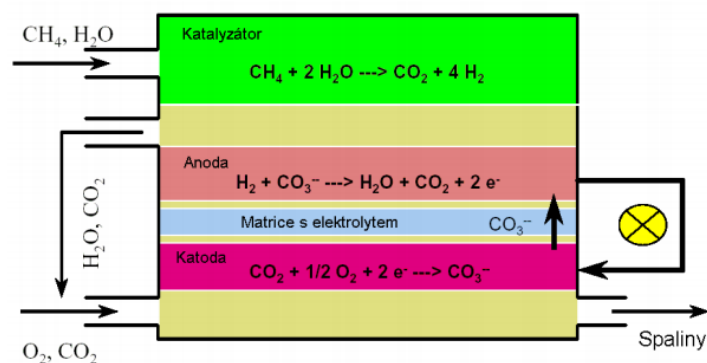


Celková rovnice má tedy tvar:



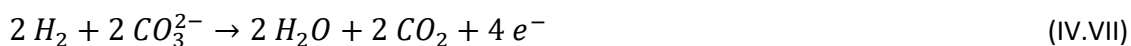
IV.I.II MCFC

Jelikož tento typ palivového článku obsahuje elektrolyt z taveniny, je zřejmé, že provozní teplota je velmi vysoká. Tavenina obsahuje 62 % Li_2CO_3 a 38 % K_2CO_3 . Výhodou toho, že teplota dosahuje vysokých hodnot, je skutečnost, že není třeba dodávat katalyzátor ve formě drahých kovů. Nevýhodou je však fakt, že ztráty způsobené ohmickým odporem rostou s tloušťkou vrstvy elektrolytu. Tyto ztráty je možné vyčíslit přibližně na 0,533 V za každý centimetr elektrolytu. Pro zvýšení účinnosti je tedy zapotřebí snížit tloušťku elektrolytu na minimum. Elektrody jsou tvořeny v případě anody slitinami niklu s chromem nebo hliníkem a v případě katody oxidem niklu. Hlavní podstatou tohoto typu článku je dle předchozích informací vnitřní reforming paliva. Pro tuto reformní reakci se využívá odpadní teplo z palivového článku, čímž je zvyšována účinnost. Je možné využít vnitřní nebo vnější reforming, přičemž využívanější je technologie s použitím toho vnitřního. Schéma MCFC článku je na následujícím obrázku. [37, 38, 39]



Obr. IV.I: Schéma palivového článku MCFC s vnitřním reformingem [37]

Chemickou reakci na anodě tohoto palivového článku lze zapsat rovnicí:



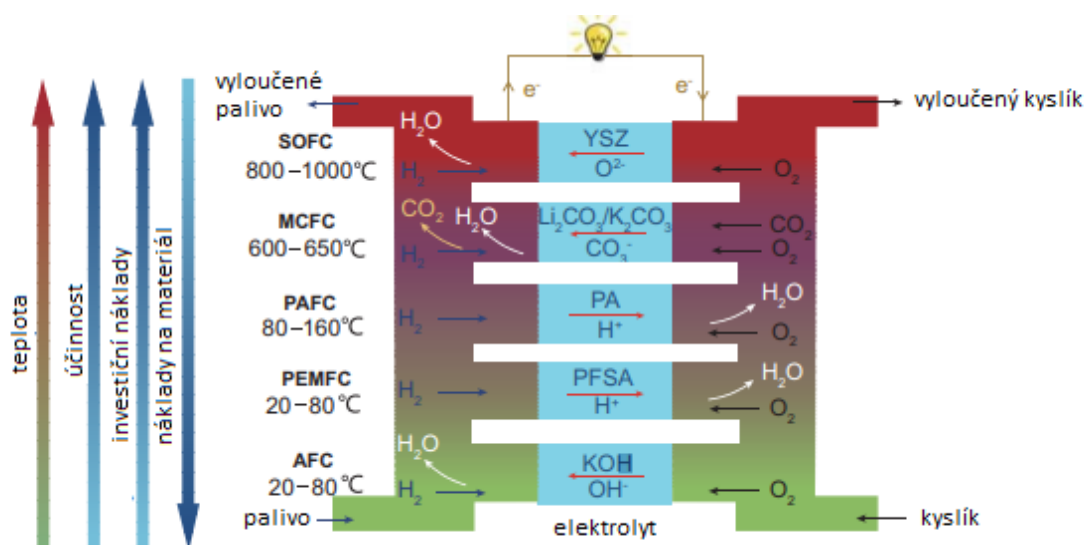
Reakce na katodě má tvar:



Výhody této technologie spočívají ve vysoké účinnosti, dobře využitelném odpadním teple, nižších nákladech vzhledem k absenci drahých kovů v elektrodách a samovolném vnitřním reformingu využívajícím odpadní teplo. Nevýhody jsou však dlouhá doba náběhu způsobená nutností dosáhnout vysokých teplot, obtížnější manipulace vlivem využití kapalného elektrolytu, vysoká citlivost na obsah síry v palivu a velké nároky na použité materiály, které musí odolat vysokým teplotám a značně korozivnímu prostředí. [37]

IV.II Shrnutí přeměny vodíku na elektrickou energii

V odstavcích výše jsem rozebral základní typy používaných palivových článků. Rozdíly v účinnostech a principech funkce jsem již popsal, pro rekapitulaci zde uvedu souhrn popsaných článků.



Obr. IV.II: Souhrn palivových článků [39] (upraveno)

Z rekapitulačního obrázku vyplývá, že se zvyšující se teplotou roste účinnost (není třeba využívat přidružené zařízení spotřebovávající elektrickou energii) a také investiční náklady, neboť je nutné investovat do materiálů, které musí odolat vysokým teplotám. Naopak náklady na další materiály (katalyzátor v podobě drahých kovů) nejsou při vysokých teplotách potřeba, se snižující se teplotou tedy tyto náklady rostou.

Literatura přílohy

- [1] European Commission. 2020 climate & energy package. [online]. EC. [cit. 26.10.2020]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en#tab-0-0
- [2] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/29/ES ze dne 23. dubna 2009, kterou se mění směrnice 2003/87/ES s cílem zlepšit a rozšířit systém pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů ve Společenství. In: *Úřední věstník*, L 140 05.06.2009, s. 1-5. [cit. 26.10.2020] Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0063:0087:CS:PDF>
- [3] AVERSA, Raffaella and PETRESCU, Rely Victoria and APICELLA, Antonio and PETRESCU, Florian Ion. The Basic Elements of Life's. 17.12.2016. In: *American Journal of Engineering and Applied Sciences, Volume 9, Issue 4, Pages 1189-1197*. [cit. 22.12.2020] Dostupné z: <https://ssrn.com/abstract=3074489>
- [4] KLIKORKA, Jiří, HÁJEK, Bohumil, VOTINSKÝ, Jiří. *Obecná a anorganická chemie*. Praha, 1989. SNTL – Nakladatelství technické literatury Alfa, vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava. 2., nezměněné vydání. [cit. 22.12.2020] ISBN 04-607-89.
- [5] SOMOLOVÁ, Markéta, DLOUHÝ, Petr. *Výroba vodíku*. [online]. 9.5.2007 www.hytep.cz. [cit. 30.12.2020]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [6] MURADOV, Nazim. Low to near-zero CO₂ production of hydrogen from fossil fuels: Status and perspectives. 2017. In: *International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 20, Pages 14058-14088. ISSN 0360-3199*. [cit. 30.12.2020] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917314908>
- [7] REZAEI, Mostafa, MOSTAFAEIPOUR, Ali, QOLIPOUR, Mojtaba, MOMENI, Mozghan. Energy supply for water electrolysis systems using wind and solar energy to produce hydrogen: a case study of Iran. 2019. *Front. Energy* 13, 539–550. [cit. 30.12.2020]
- [8] Siemens. *Sylizer – další významný krok vpřed v rozvoji vodíkové energetiky*. [online]. 11.02.2020 www.visionmag.cz. [cit. 30.12.2020]. Dostupné z: <https://www.visionmag.cz/sylizer-dalsi-vyznamny-krok-vpred-v-rozvoji-vodikove-energetiky>
- [9] *Understanding Isotopes*. [online]. www.terpconnect.umd.edu [cit. 30.12.2020]. Dostupné z: <https://terpconnect.umd.edu/~wbreslyn/chemistry/isotopes/isotopes-of-hydrogen.html>
- [10] MASTNÝ, Petr a kolektiv autorů. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2011. [cit. 30.12.2020]. ISBN 978-80-01-04937-2.

- [11] Petroleum. *Výroba vodíku parním reformováním*. [online]. www.petroleum.cz. [cit. 30.12.2020]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [12] BALAJKA, Jiří. *Vodík a jiné nové nosiče energie*. Bratislava, 1982. SNTL – Nakladatelství technické literatury Alfa, vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava. [cit. 30.12.2020] ISBN 04-607-89.
- [13] M. HASSEN SELLAMI, K. LOUDIYI. Electrolytes behavior during hydrogen production by solar energy. 2017. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 70, Pages 1331-1335*. [cit. 31.12.2020]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310917>
- [14] ZOULIAS, Emmanuel, et al. A review on water electrolysis. *Tcst*, 2004. 4.2: 41-71. [cit. 31.12.2020]. Dostupné z: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32222925/A_REVIEW_ON_WATER_ELECTROLYSIS.pdf?1383475390=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DA_REVIEW_ON_WATER_ELECTROLYSIS.pdf&Expires=1609410558&Signature=M4JP~X0ixDPfrT5tbUUgvUXxHdeKT4UNMPbBPZd3ScN6x1QTo6bOjaTvQWJg-uA0OaxrKtZGnDfzoQDBzej-fXf3ycE0fmd1djAKGA9Ux1-0X1Joo8TTFDw6bm8NDNqFk1zIly9djOQXZLAO-j4FV0G9mlTtNAJ9xK-wQyDKzROC3jyi93fUZd9d3Gj6MuO3KrJDNGy9GaLkjr~MeHEwMhcUtUPCVZA2jBA-XJN2p-WWAEb1I~sfrbSdmljCviVwE7qp5j-DraM4~etiBeu4meC~CFgEfONcnkNHZtx0Fz0jyTRfDdgQ5I2OKwnFuDmzZfCMGJ4Uy7W3SphsRT9MQA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [15] TKÁČ, Martin, STEHLÍK, Karin. *Centrální výroba vodíku*. [online]. Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2017 [cit. 31.12.2020]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2017_02_121-128.pdf
- [16] VA5 Vodíkové technologie. [online]. SUSEN, Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2020 [cit. 31.12.2020]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkum/program-teo/va9-vodikove-technologie/>
- [17] SHIN, Youngjoon, et al. Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen. 2007. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, 32.10, Pages 1486-1491. [cit. 31.12.2020]
- [18] R. LEROY, C. BOWEN, D. LEROY. The thermodynamics of aqueous water electrolysis. 2007. In: *Journal of the Electrochemical Society, Volume 127, Pages 1954-1962* [cit. 31.12.2020]
- [19] N. NAGAI, M. TAKEUCHI, M. NAKAO. Effects of generated bubbles between electrodes on efficiency of alkaline water electrolysis. 2003. In: *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, 46(4), Pages 549-556 [cit. 31.12.2020]

- [20] ŠILHAN, Martin, TOCHÁČKOVÁ, Anna. *Využití vodíkových technologií v energetice*. [online]. www.allforpower.cz. 8.9.2020 [cit. 31.12.2020]. ISSN: 1802-8535. Dostupné z: <https://allforpower.cz/technologie-a-materialy/vyuziti-vodikovych-technologie-v-energetice-228>
- [21] TUKAČ, Vratislav, HANIKA, Jiří, VESELÝ, Václav, LEDERER, Jaromír. *Možnosti produkce vodíku parciální oxidací odpadní biomasy*. [online]. www.biom.cz. 13.07.2011 [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-produkce-vodiku-parcialni-oxidaci-odpadni-biomasy>
- [22] DOUCEK, Aleš. *Výroba vodíku z biomasy*. [online]. www.hytep.cz. 4.2.2008 [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/666-vyroba-vodiku-z-biomasy>
- [23] Züttel, A. Hydrogen storage methods. [online]. *Naturwissenschaften* 91. 157-172 (2004). [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>
- [24] R. STRÖBEL, J. GARCHE, P.T. MOSELEY, L. JÖRISSEN, G. WOLF. Hydrogen storage by carbon materials. 2006. In: *Journal of Power Sources, Volume 259, Issue 2, Pages 781-801* [cit. 01.01.2021]
- [25] Skladování, přeprava a distribuce vodíku. [online]. www.tuvsud.cz. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/odvetvi/energetika/konvencni-energie/vodikova-energie/skladovani-preprava-a-distribuce-vodiku>
- [26] SOKANSKÝ, Karel. *Palivové články v energetice*. [online]. Ostrava: VŠB Ostrava, 2007. [cit. 01.01.2021].
- [27] DLOUHÝ, Petr, JANÍK, Luděk. *Skladování vodíku I*. [online]. Česká vodíková technologická platforma, 2007. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [28] NAVRÁTIL, Vladislav. J-T jev. [online]. Brno: Masarykova univerzita, 03.11.2015. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2015/FY2MP_TF3/J-T_jev.doc.pdf
- [29] CHOUDHURY, Balaji Kumar. *Process Design of Turboexpander based nitrogen Liquefier*. [online]. Parala Maharaja Engineering College. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/37394556_Process_Design_of_Turboexpander_based_nitrogen_Liquefier
- [30] European Commission. *Questions and answers: A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe*. [online]. EC. [cit. 01.01.2021]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_1257

- [31] HIROSE, Katsuhiko. Handbook of hydrogen storage: new materials for future energy storage. John Wiley & Sons, 2010.
- [32] KLEBANOFF, Lennie (ed.). *Hydrogen storage technology: materials and applications*. CRC Press, 2012.
- [33] Züttel, A. Materials for hydrogen storage. [online]. *Materials Today*, Volume 6, Issue 9, 2003, Pages 24-33. ISSN 1369-7021. [cit. 02.01.2021]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702103009222>
- [34] DLOUHÝ, Petr, JANÍK, Luděk. Skladování vodíku II. [online]. Česká vodíková technologická platforma, 2007. [cit. 02.01.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>
- [35] O. ULLEBERG. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a systém simulation approach. 2003. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, Pages 21-33 [cit. 03.01.2021]
- [36] Liquid Hydrogen Storage. [online]. 2014. Florida's Premier Energy Research Center at the University of Central Florida. [cit. 03.01.2021]
- [37] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články*. 2002. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky. [cit. 04.01.2021]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [38] DLOUHÝ, Petr, JANÍK, Luděk. *Palivové články*. [online]. Česká vodíková technologická platforma, 17.04.2007. [cit. 04.01.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/588-palivove-clanky>
- [39] WANG, Shuangyin, JIANG, San Ping. Prospects of fuel cell technologies. [online]. In: *National Science Review*, Volume 4, Issue 2, March 2017, Pages 163-166. [cit. 02.01.2021]. Dostupné z: <https://academic.oup.com/nsr/article/4/2/163/2866463>
- [40] MACEK, Jan. Vodíkové spalovací motory. [online]. Česká vodíková technologická platforma, 03.12.2007. [cit. 04.01.2021]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/657-vodikove-spalovaci-motory>
- [41] ŠVÁB, Michal. Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice. [online]. Česká energetická agentura, 2006. [cit. 05.01.2021].

Příloha B

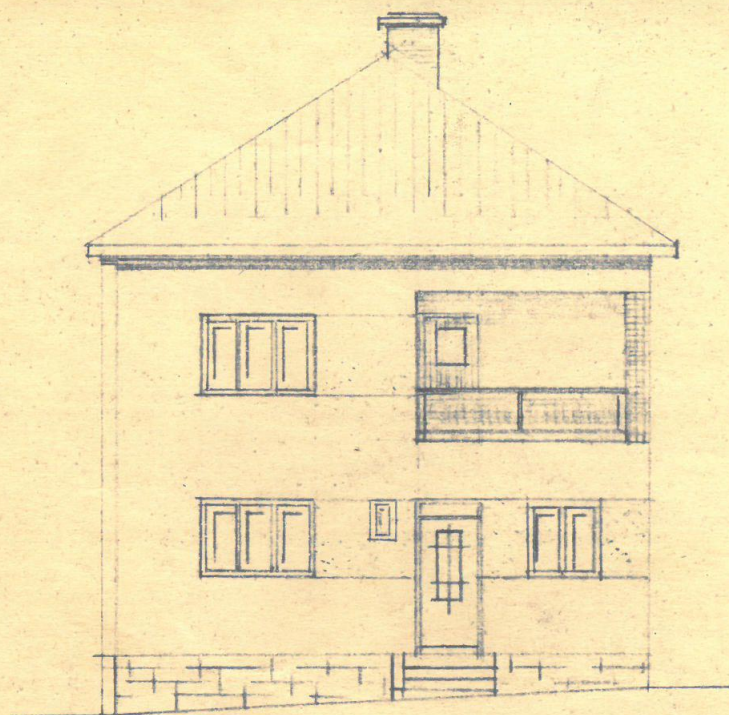
Výpočty k akumulaci do vodíku. Nahráno na přiloženém CD.



Výpočty k
akumulaci do vodíku

Příloha C

Plány a řezy rodinného domu.



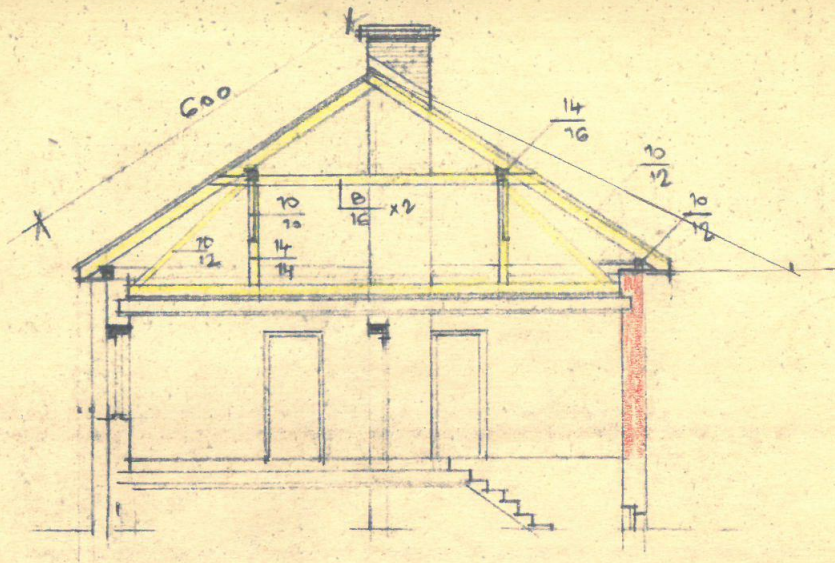
POHLED VÝCHODNÍ

NĀSTAVBA RODINNĚHO DOMKU PANA
LADISLAVA VAŇKA V LEDČI N/SĚZ. ČP 392

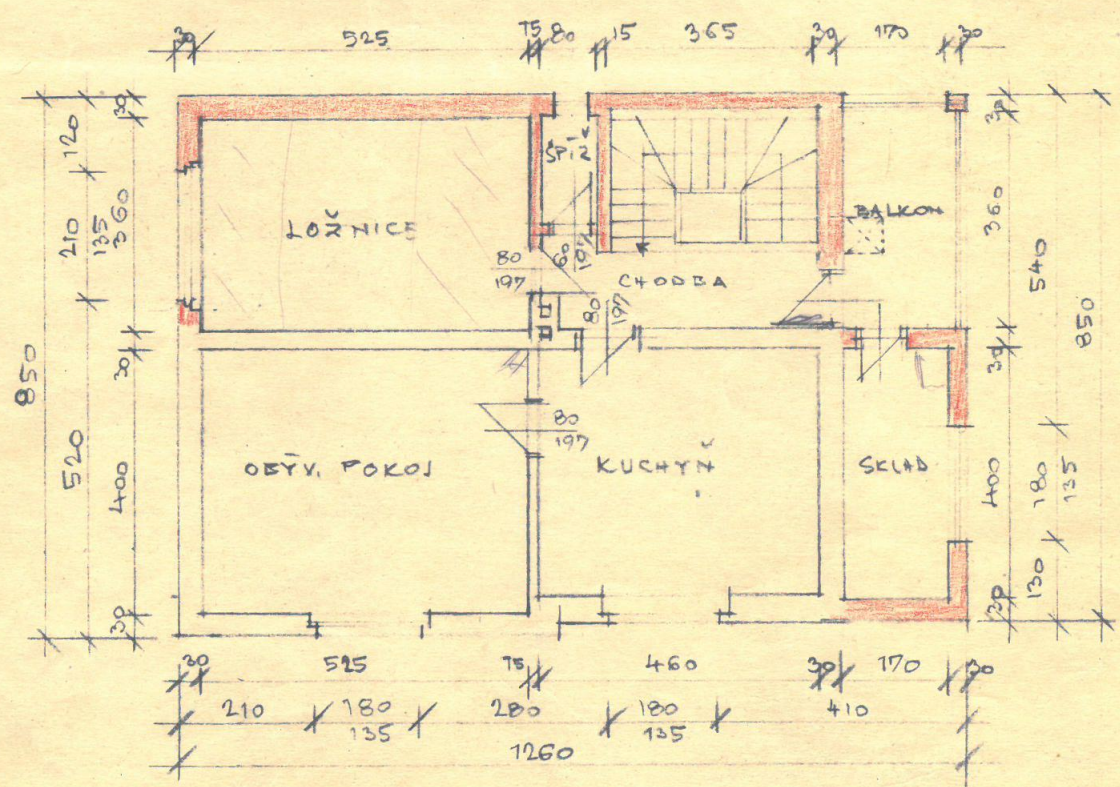
VLEDČI 5/73

MĚŘ 7:700

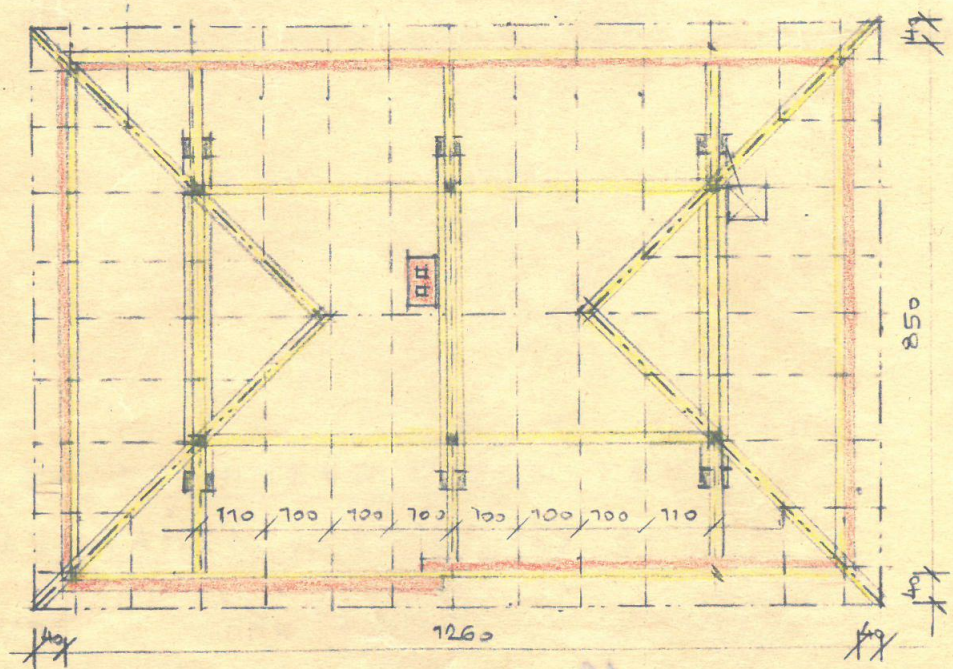
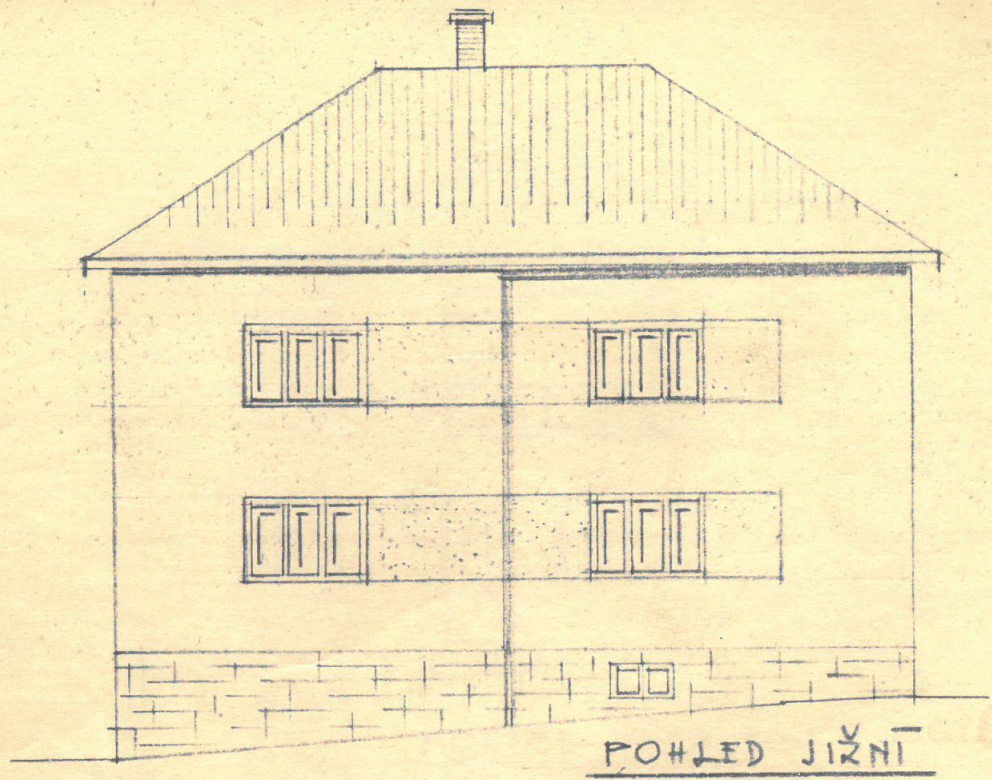
W. W.



KER A: B



I. PATRO



KROV

Příloha D

Kalkulace hypotečního úvěru k variantě 1A.

Porovnání hypotečních úvěrů

Varianta 1A

Typ hypotéky: **Standardní nová hypotéka** Poradce:
E-mail:
Telefon:
IČ:

Věk žadatele: 49
Aktivní účet: Ano
Pojistění úvěru: Ano

	A	B	C
Banka	UniCredit Bank	Sberbank	Česká spořitelna
Fixace	10 let	10 let	10 let
Doba splácení	20 let	20 let	20 let
Sazba	2,29 %	2,39 %	2,44 %
Sazba - základ	2,59 %	2,89 %	3,04 %
Sleva za účet	-0,00 %	-0,40 %	-0,50 %
Sleva za PMAJ u banky	-0,00 %	-0,00 %	-0,00 %
Sleva za PPI	-0,30 %	-0,10 %	-0,10 %
Sleva za výši úvěru	-0,00 %	-0,00 %	-0,00 %
Poplatek za vyřízení	2.900 Kč	0 Kč	0 Kč
Poplatek za vedení	0 Kč	0 Kč	0 Kč
Zpoplatněná čerpání	2. a další (900 Kč)	2. a další (500 Kč)	2. a další (500 Kč)
Čerpání na návrh na vklad	1.900 Kč	1.500 Kč	2.000 Kč