



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Vyrovnání diagramu zatížení s využitím elektrolýzy vody

Balancing of the load curve by using water electrolysis

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Lubomír Musálek

Bc. Jakub Kladiiva

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jakub Kladiva**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vyrovnění diagramu zatížení s využitím elektrolýzy vody**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s možnostmi akumulace elektrické energie.
2. Popište současný stav možností elektrochemických přeměn.
3. Vytvořte technicko-ekonomický model zařízení na vyrovnávání diagramu pomocí elektrolýzy vody.
4. Navrhněte zařízení pro elektrolýzu vody s rozsahem elektrického výkonu 1-10 MW.
5. Nastihněte možnosti dalšího využití této technologie v rámci distribučních sítí.

Seznam odborné literatury:

- [1] Electrical Energy Storage – IEC – International Electrotechnical Commission
ISBN 978-2-88912-889-1
- [2] TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] M. Nakhamkin: Novel Compressed Air Energy Storage Concepts Developed by ESPC, EESAT, 2007
- [4] Janík, L - Doucek, A - Dlouhý, P. Implementační akční plán rozvoje vodíkového hospodářství v ČR, Husinec – Řež 130, 2011
- [5] Tuček, V. - Dvořáková, L. – Hanzal, J. Vodík, Česká asociace technických plynů, Praha, 2004

Vedoucí: Ing. Lubomír Musálek

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018



doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

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

24. 5. 2016

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval rodičům, kteří mě podporovali během celého studia a také vedoucímu diplomové práce Ing. Lubomíru Musálkovi za cenné rady a poskytnutí všech potřebných materiálů.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem řešení, které dokáže vyrovnat diagram zatížení průmyslového podniku. V teoretické části práce jsou popsány možnosti akumulace elektrické energie a možnosti elektrolýzy. Výstupem této práce je technickoekonomický model a ekonomické vyhodnocení projektu.

Klíčová slova

Akumulace energie, elektrolýza vody, elektrolyzér, vodík, výroba vodíku, diagram zatížení, NPV, IRR

Abstract

This diploma thesis deals with design solutions that can cope with the load diagram of an industrial company. The thesis describes the possibilities of the accumulation of electrical energy. The result of this work is technical-economic model and economic evaluation of project.

Key words

Energy storage, electrolysis of water, water electrolyzer, hydrogen, hydrogen production, load diagram, NPV, IRR

Obsah:

1. Úvod	12
2. Možnosti akumulace elektrické energie	13
2.1. Přeměna elektrické energie na mechanickou	13
2.2. Přeměna elektrické energie na elektrochemickou	16
2.3. Přeměna elektrické energie na chemickou	19
2.4. Přeměna elektrické energie na termální.....	20
2.5. Akumulace elektrické energie	21
2.6. Porovnání jednotlivých typů akumulace.....	23
3. Možnosti elektrochemických přeměn.....	24
3.1. Možnosti elektrolýzy	24
3.2. Termodynamika	27
3.3. Rozdělení elektrolýzéro H ₂ O	29
3.3.1. Alkalický elektrolýzér.....	31
3.3.2. PEM elektrolýzér	32
3.3.3. Elektrolýza za vysoké teploty	33
3.4. Využití vodíku	34
4. Technickoekonomický model zařízení na vyrovnávání diagramu zatížení pomocí elektrolýzy vody	35
4.1. Vstupy.....	36
4.1.1. Elektrická energie	36
4.1.2. Diagram zatížení	37
4.1.3. Diagram výroby	38
4.1.4. Stlačení a přeprava H ₂ a O ₂	39
4.1.5. Ostatní vstupy	40
4.2. Výstupní data, programové řešení.....	41

5.	Návrh zařízení pro elektrolýzu vody s rozsahem elektrického výkonu 1 – 10 MW	42
5.1.	Blokové schéma zařízení.....	42
5.1.1.	Elektrolyzér	43
5.1.2.	Transformátory	45
5.1.3.	Dvanácti pulsní řízený usměrňovač	46
5.1.4.	Kompresor.....	47
5.2.	Ekonomické vyhodnocení	47
5.2.1.	Prostá doba návratnosti.....	47
5.2.2.	Diskontovaná doba návratnosti.....	48
5.2.3.	Čistá současná hodnota NPV	48
5.2.4.	Vnitřní výnosové procento IRR	49
5.2.5.	Návratnost investice ROI	49
5.2.6.	Ekonomické vyhodnocení	49
5.3.	Citlivostní analýza	52
6.	Možnosti dalšího využití této technologie v rámci distribučních sítí	54
6.1.	Nákup na krátkodobém trh	54
6.2.	Využití kogenerační jednotky.....	55
7.	Závěr	56
8.	Seznam použité literatury.....	57
9.	Seznam použitých zkratk a symbolů	59
10.	Seznam obrázků.....	62
11.	Seznam tabulek.....	63
12.	Seznam příloh	64

1. Úvod

Elektrická energie je lidstvu známa již od roku 1800, kdy Alessandro Volta vytvořil první elektrický článek produkující elektrický proud. S vynálezem generátoru a motoru se elektrická energie dostává do výroby a domácností, začínají se osvětlovat ulice a elektrifikovat tratě. Dnes je elektrická energie běžnou a zároveň neodmyslitelnou součástí našeho života. Postupem času se vyvinula z této problematiky nová vědní disciplína, kterou dnes známe pod pojmem elektroenergetika, jejíž náplní je zajištění elektrické energie pro společnost. Hlavními částmi elektroenergetiky je proces výroby, přenosu, distribuce a spotřeby elektrické energie.

Elektrickou energii lze jednoduše transportovat na velké vzdálenosti a transformovat na odlišné typy energií, jako je například chemická, kinetická nebo mechanická.

V dnešní době mnoho zemí Evropské Unie mění svou energetickou koncepci a začíná využívat stále více energie z obnovitelných zdrojů, jako jsou větrné nebo solární elektrárny. Nevýhodou těchto zdrojů je nerovnoměrnost slunečního svitu a proměnlivá rychlost větru. Během dne tyto elektrárny generují přebytky elektrické energie v distribuční síti, je potřeba tuto přebytečnou energii akumulovat a v době nedostatku ji využít. Elektrickou energii není snadné uchovávat ve velkém množství, po určitou dobu a s přiměřenou velikostí ztrát.

Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout takové řešení, které dokáže vyrovnat diagram zatížení a to pomocí elektrolýzy vody. V teoretické části diplomové práce se budu zabývat možnostmi akumulace elektrické energie, zvláště pak elektrolýzou vody, dále popisuji současné možnosti elektrolýzy. Praktickou část diplomové práce pak tvoří technickoekonomický model v programovém prostředí wolfram Mathematica, v další části je popsán návrh zařízení pro vyrovnání diagramu zatížení s využitím elektrolýzy vody, v poslední části jsem popsal další možnosti využití této technologie.

2. Možnosti akumulace elektrické energie

V této kapitole jsem popsal možnosti akumulace elektrické energie, elektrická energie lze ukládat ve formě mechanické, elektrochemické, chemické a termální. Elektrická energie se může ukládat v nezměněné formě a to v superkapacitorech nebo magnetickém poli cívky.

2.1. Přeměna elektrické energie na mechanickou

Přečerpávací vodní elektrárny dokáží uchovat větší množství přebytečné elektrické energie po delší dobu, v České republice je typickým příkladem přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně. Dále jsou zde zastoupeny uložště na stlačený vzduch a akumulace v rotujících hmotách setrvačníku.

Obr 1. Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně [23]



Akumulace energie v přečerpávacích elektrárnách

Přečerpávací vodní elektrárny umožňují akumulovat velké množství energie, jejich hlavním úkolem je zabezpečit stabilitu elektrizační soustavy. Tyto vodní elektrárny tvoří dvě vodní nádrže s různou nadmořskou výškou, obě dvě nádrže jsou spojeny spádovým potrubím. Oproti průtočným a akumulacím vodním elektrárnám mají tu výhodu, že dokáží svůj chod měnit během několika minut z motorického na generátorický a naopak. Pokud je přebytek elektrické energie v soustavě, je voda akumulována ve vyšší nádrži, v době špičkového odběru v soustavě se voda využívá k výrobě elektrické energie. Obvykle se využívá Francisová turbína, která je pomocí hřídele propojena na synchronní motor-generátor. Účinnost PVE se pohybuje od 70 % do 85 %. Výhodou PVE je, že dokáže akumulovat velké množství elektrické energie, životnost je dána především životností systému, turbíny a motor-generátoru. PVE jsou důležitou součástí elektrizační soustavy při blackoutu¹. Nevýhodou je velká využitá plocha a zásah do rázu krajiny. [1]

Potenciální energie uložená v horní nádrži PVE:

$$E_p = m \cdot g \cdot \Delta h \text{ [J]} \quad (1)$$

m - hmotnost [kg]

g - tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

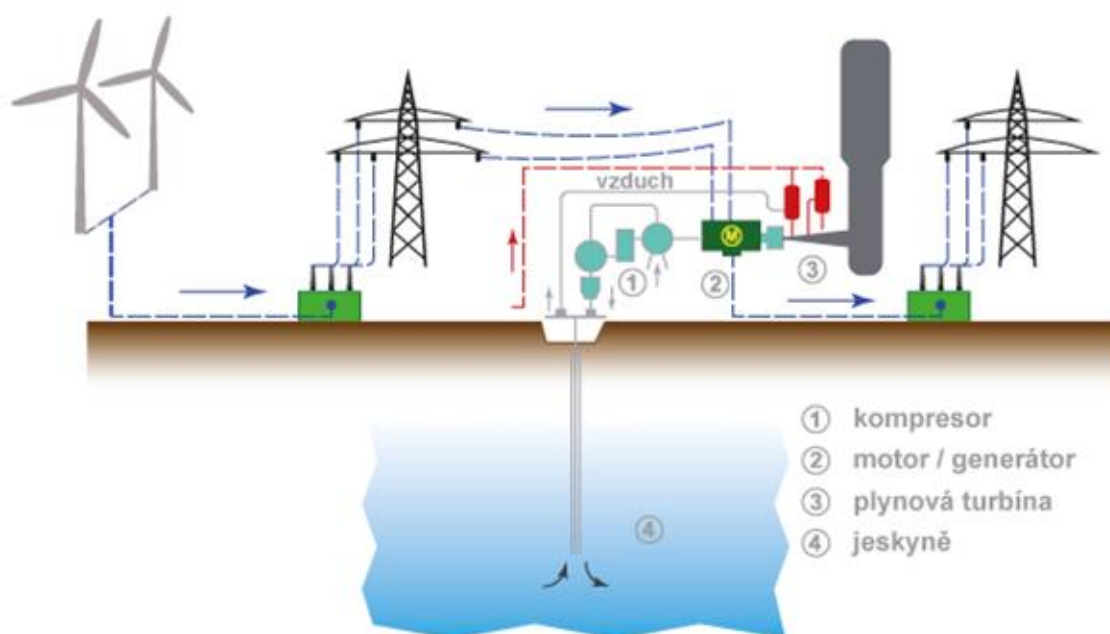
Δh - výškový rozdíl [m]

¹ Rozsáhlý výpadek elektřiny se označuje anglickým slovem blackout.

Akumulace energie ve stlačeném vzduchu

Skladování elektrické energie ve stlačeném vzduchu je technologie známa a používaná od 19. století v různých industriálních aplikacích. Při přebytečné elektrické energii je vzduch stlačen v podzemních prostorech a strukturách. Pokud je potřeba, tak je vzduch smíchán se zemním plynem, poté je zapálen a expanduje v modifikované plynové turbíně. Typickým podzemním uložištěm jsou jeskyně a opuštěné doly, výhodou tohoto systému je velká kapacita, nevýhodou pak vysoká doba návratnosti a omezení využití z geografického hlediska. [1] [2]

Obr 2. Akumulace energie ve stlačeném vzduchu [24]



Akumulace energie v mechanických akumulátorech

Akumulace v setrvačnicku, energie se ukládá v rychle rotujícím masivním válci, používají se dva typy setrvačnickových akumulátoru, jeden typ využívá rotory velké hmotnosti, které pracují při otáčkách do $8\,000\text{ min}^{-1}$, druhý typ používá lehčí rotory a pracuje při vyšších otáčkách až $90\,000\text{ min}^{-1}$. Rotory se otáčejí ve vakuu a jsou kvůli jejich velkému momentu setrvačnosti nadnášeny působením magnetického pole. [1]

Kinetická energie uložená
v rotujících hmotách:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 [J] \quad (2)$$

J - moment setrvačnosti [kg·m²]

ω - úhlová rychlost [rad·s⁻¹]

Dnes se v praxi tyto setrvačníky používají v systémech záložního napájení, firma Caterpillar využívá bezbateriový zdroj UPS, založený na akumulaci energie v rotujícím setrvačníku. Setrvačnick dokáže dodávat elektrickou energii po dobu 15 sekund, ve spojení s diesel-agregátem tvoří energocentrálu NZ²®.

2.2. Přeměna elektrické energie na elektrochemickou

V této části jsem popsal možnosti uložení elektrické energie v bateriích, tato technologie je dobře zvládnuta, nabízí možnost mnohonásobně opakovaného nabíjení a vybíjení. Výhodou je nízká pořizovací cena, nevýhodou baterii je proces samovybíjení a nenávratného poškození při hlubokém vybíjení, další nevýhodou je také poměr akumulované energie k hmotnosti baterií. V současnosti jsou nejrozšířenější akumulátory na bázi olova, niklu a lithia. Podle acidity elektrolytu je dělíme na kyselé a alkalické, kyselý elektrolyt mají pouze olovené akumulátory, akumulátory na bázi niklu a lithia mají alkalický elektrolyt.

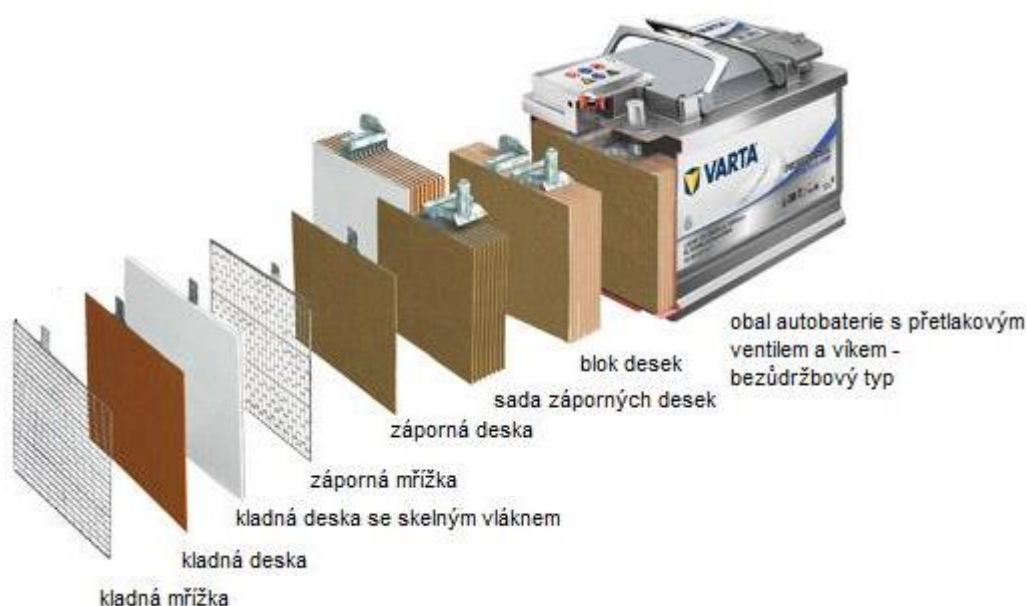
Baterie na bázi lithia Li-ion, Li-pol

Mají vyšší nominální napětí na článek 3,7 V, výhodou lithiových baterii, je jejich vyšší energetická hustota, lze je nabíjet vyššími proudy. Další výhodou je malé samovybíjení a vyšší životnost, u některých typů až 3 000 cyklů. Lithium-iontová baterie dnes v mnoha aplikacích nahradila NiMH baterii, nejčastěji ji můžeme najít ve svých mobilních telefonech. Lithium-polymerové baterie mají podobné charakteristiky a napětí jako Li-ion, elektrolytem je polymer v tuhém skupenství, vyznačují se vysokým vybíjecím proudem až 40 CA, což znamená 40 násobkem kapacity baterie, tyto baterie se používají v závodní modelářské technice.

Olověné baterie

Jsou nejvíce používané, komerčně se využívají od roku 1890, jejich typické aplikace jsou akumulátory, startovací baterie v autech, využívají se v ostrovních systémech společně s fotovoltaickými panely, olověné baterie mohou být využity jako záložní napájecí systémy. Jejich doba životnosti se pohybuje od 6 do 10 let, dosahují 1 500 cyklu. [1]

Obr. 3. Řez olověnou baterií [25]



Baterie na bázi niklu NiCd, NiMH

V porovnání s olověnými bateriemi mají větší počet nabíjecích cyklů a vyšší hustotu energie. V praxi se NiCd baterie využívají jako staniční akumulátory pro zálohování provozu. Dokáží pracovat ve velkém rozsahu teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nevýhodou je vyšší cena oproti olověným bateriím a obsah karcinogenního kadmia. Baterie typu NiMH se využívají především v přenosných přístrojích a nářadích, dříve se používaly v mobilních telefonech. [1]

Baterie kov-vzduch (metal-air battery)

Tento typ elektrotechnického článku se využívá v elektromobilitě. Využívá elektropozitivní kovy jako lithium, železo, hořčík a hliník. Tyto kovy společně s kyslíkem, který je získán ze vzduchu, vytvářejí elektrickou energii. Z konstrukčního hlediska si tento bateriový článek vystačí jen s jednou elektrodou. Tyto baterie mohou mít až trojnásobnou energetickou hustotu oproti Li-ion bateriím.

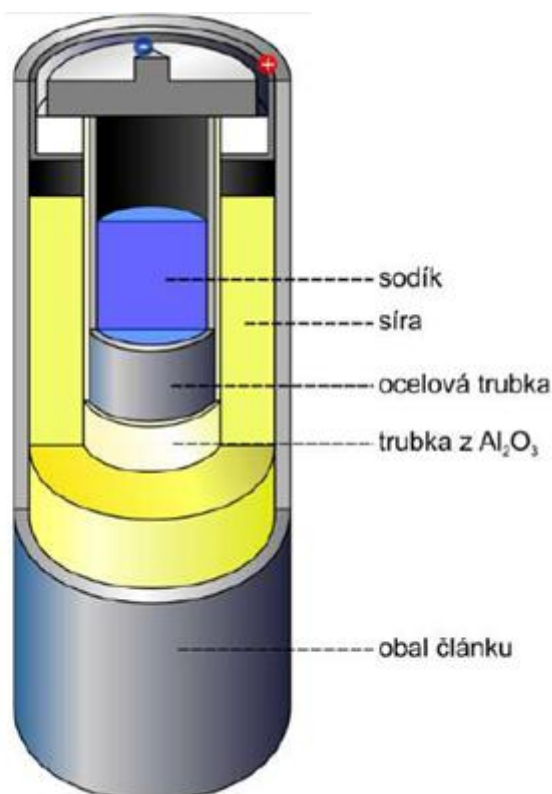
Nevýhodou tohoto typu baterií je, že nejdou dobíjet podobně jako olovené či lithiové baterie. Hliníková anoda se spotřebovává při styku s kyslíkem, při provozu baterie vzniká vedlejší produkt – hydratovaná hliníková forma, tato forma se musí po čase obměňovat. Nevýhodou této technologie jsou vyšší provozní náklady, výhodou je její stabilita. [5]

Sodíkové baterie

Baterie NaS

Elektrody tohoto typu baterie nejsou v pevném skupenství, ale jsou v kapalném, jejich provozní teplota se pohybuje okolo 300 °C. Baterie obsahují kovový sodík, musí být hermeticky uzavřeny, aby nedošlo ke styku s vodou. Tato technologie je poměrně nová, teoreticky může dosahovat vyšších hodnot energetické hustoty než lithiová baterie a to až 792 Wh.kg⁻¹. Tyto baterie se používají jako akumulátory energie u fotovoltaických a větrných elektráren, kdy v době špičky uchovává elektrickou energii a poté při vyšší spotřebě, než je okamžitá výroba se elektrická energie spotřebovává. [6]

Obr 4. Schéma NaS článku [16]



Baterie NaNiCl

Svou konstrukcí se podobá NaS baterii, při nabíjení se sůl a nikl přemění na nikl-chlorid a roztavený sodík, při vybíjení je tomu naopak. Články pracují také při teplotě v okolí 300 °C. Teoreticky dosažitelná energetická hustota je odhadována na 787 Wh.kg⁻¹. [6]

Flow baterie

Tyto baterie fungují tím způsobem, že vodivý roztok volně nabitých iontů kovů rozpuštěných v elektrolytu je napumpován z externí nádrže skrze elektrochemický článek, ve kterém přemění chemickou energii v elektrickou. Flow baterie lze nabíjet a vybíjet velice rychle, nevýhodou je obsah toxických látek jako je vanad a bromid zinečnatý. Výhodou je vyšší energetická hustota. [7]

2.3. Přeměna elektrické energie na chemickou

V této části jsem popsal výrobu vodíku a syntetického zemního plynu. Hlavním účelem je využívat přebytky elektrické energie pomocí elektrolýzy vody. Tato přeměna se využívá pro výrobu čistého vodíku nebo pro výrobu syntetického zemního plynu. Nevýhodou tohoto procesu je dlouhá doba návratnosti. Hlavní výhodou je, že můžeme využít vodík v různých odvětvích jako je doprava, mobilita, vytápění a chemický průmysl. Této oblasti se budu více věnovat v následujících kapitolách, kde bude blíže popsána chemická přeměna vodíku a možnosti využití vodíku.

Přeměna na vodík

Systém pro tvorbu vodíku se skládá ze zásobníku vodíku, palivových článků a elektrolyzérů. Elektrolyzér je elektrochemický konvertor, který rozdělí vodu pomocí elektrické energie na vodík a kyslík. Vodík se uchovává v tlakových lahvích nebo v palivových nádržích, může být takto uchován téměř po neomezenou dobu. Při výrobě elektřiny jsou oba plyny spalovány v palivovém článku, kde probíhá elektrochemická reakce, která je opakem štěpení vody, uvolňuje se teplo a generuje elektrický proud. [1]

Přeměna na syntetický zemní plyn SNG

Syntéza metanu je druhá možnost jak skladovat elektřinu v chemické energii. Tento proces je doplněn oproti výrobě vodíku ještě o další krok. Výroba umělého zemního plynu, kdy se prostřednictvím Sabatierovy reakce, slučuje vodík a oxid uhličitý za vysokého tlaku a teploty. Výhodou je již existující síť plynovodů, nevýhodou je dlouhá doba návratnosti a to díky ztrátám při přeměně vody na vodík v elektrolýze, ztrátám v procesu metanizace, ztrátám při skladování a přepravě a následným ztrátám při generování elektřiny, celková účinnost je poté menší než 35 %. [1]

2.4. Přeměna elektrické energie na termální

Energie je uložena ve formě tepla pro pozdější vyžití v různých aplikacích, jako je vytápění nebo ohřev teplé vody. Tepelné systémy slouží při nerovnosti nabídky a poptávky tepelné energie. Nejznámějším uložištěm je ohřev teplé užitkové vody. Jako médium může sloužit užitková voda, pro vyšší teploty termo-olej. Kapacita úložného systému je definována technickým parametrem měrné tepelné kapacity a hmotností použitého média. Podle využívaného fyzikálně chemického principu můžeme rozdělit akumulaci tepelné energie do několika typů akumulace citelného tepla a akumulace latentního tepla.

Akumulace citelného tepla

Nejjednodušší způsob akumulace tepla, jako pracovní látka se využívá voda, kvůli její nízké ceně a zároveň přijatelné tepelné kapacitě. Nejznámější aplikací je zásobníkový ohřívač teplé vody, bojler nebo zásobník solárního kolektoru. Akumulaci v pevných látkách využívají kachlové pece a kamna, umožňují vyšší rozsah teplot, mají nižší tepelnou kapacitu. Výhodou tohoto systému je jednoduchost, nevýhodou vyšší nárok na objem a ztráty tepla v čase. [8]

Akumulace latentního tepla

Akumulace latentního tepla využívá entalpii fázové změny pracovní látky, využívá se fázového přechodu mezi tuhou látkou a kapalinou. Nevýhodou oproti akumulaci citelného tepla je dražší pracovní látka, výhodou je poté konstantní teplota a menší objem. Jako pracovní látka se používá chemicky čisté látky například síran sodný nebo směsi jako parafín. Chemicky čisté látky tají při konstantní teplotě na rozdíl od směsí, které tají v rozmezí teplot. [8]

2.5. Akumulace elektrické energie

Elektrickou energii lze skladovat také v nezměněné formě a to v superkapacitorech nebo magnetickém poli cívky, která je vyrobena ze supravodivého materiálu.

Superkapacitory

Základem superkapacitorů je speciální materiál elektrod s velkou plošnou hustotou. Tato technologie má velký potenciál, který by mohl vést k mnohem větším kapacitám a hustotám energie, než jsou schopny uchovat dnešní kondenzátory. Základní dva rysy těchto superkapacitorů jsou: vysoké hodnoty kapacity v řádu několika tisíc faradů a možnost velmi rychlého nabíjení a vybíjení, to je možno díky mimořádně nízkému vnitřnímu odporu. Dalšími výhodami je životnost, vysoká spolehlivost, provoz v širokém rozsahu teplot a bezúdržbový provoz. Životnost těchto kapacitorů je jeden milion cyklů bez jakékoliv degradace nebo se také uvádí 10 let. Jsou šetrné k životnímu prostředí a dají se snadno recyklovat. Vzhledem k jejich vlastnostem jsou vhodné zejména pro aplikace s velkým počtem nabíjení a vybíjení, nejsou vhodné pro dlouhodobé skladování energie, dochází k samovybíjení. Předpokládá se, že časem budou tyto superkapacitory konkurovat dnes používaným bateriím u fotovoltaických elektráren. [1]

Energie v superkapacitorech je akumulována do elektrického pole kondenzátoru.

Energie uložena
v kondenzátoru:

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 [J] \quad (3)$$

C - kapacita kondenzátoru [F]

U - elektrické napětí [V]

Akumulace do magnetického pole cívky

Elektrická energie je uložena v magnetickém poli supravodivé cívky. Tento princip je založen na akumulaci stejnosměrného proudu, který protéká cívkou. Cívka musí být dimenzována na velké proudy a musí být ze supravodivého materiálu, elektrický odpor se blíží k hodnotě 0Ω .

Energii akumulovanou do cívky lze vyjádřit následujícím vztahem.

Energie uložena v cívce:

$$E_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 [J] \quad (4)$$

L - indukčnost [H]

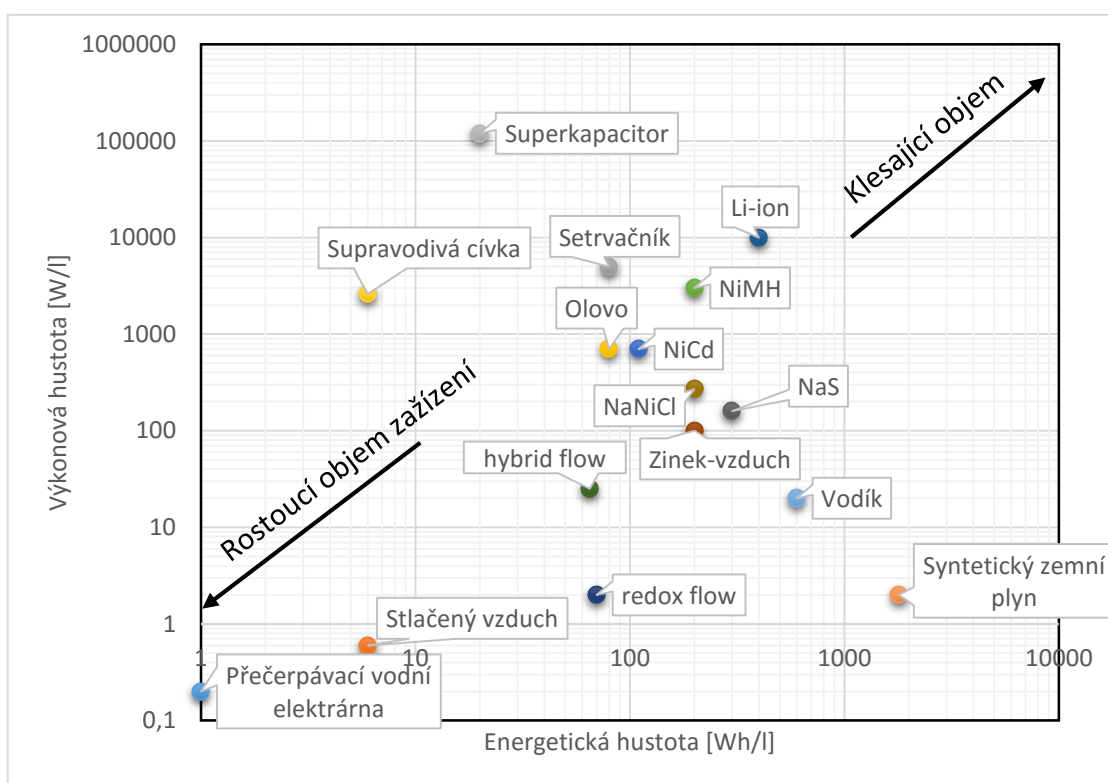
I - elektrický proud [A]

Dnešní supravodivé materiály pracují přibližně při teplotách kolem 100 K. Hlavní součástí tohoto systému je cívka ze supravodivého materiálu, dalšími komponenty jsou klimatizační zařízení a chladicí systém. Hlavní výhodou tohoto mechanismu je okamžitá odezva na požadovaný výkon. Systém se vyznačuje vysokou účinností 85 % – 90 % a velmi vysokým výstupním výkonem, který může být dodáván jen po krátkou dobu. Celková spolehlivost závisí především na chladicím systému. Energie může být uložena tak dlouho, dokud bude funkční chladicí systém, delší doby uchování energie jsou omezeny energetickou náročností na chladicí systém. Velké systémy se používají pro fyzikální experimenty a výzkum jaderné fúze. [1]

2.6. Porovnání jednotlivých typů akumulace

Pro akumulaci elektrické energie lze využít mnoho možností, každá z možností má své výhody a nevýhody. Porovnávacím kritériem může být doba, za kterou se přemění energie zpět na energii elektrickou, množství akumulované energie a velikosti dodávaného výkonu. Na následujícím grafu je znázorněna energetická hustota v závislosti na výkonové hustotě pro jednotlivé typy akumulace. Ve 3. příloze je přiložena tabulka, ve které lze porovnávat hodnoty pro jednotlivé technologie, z této tabulky vychází následující graf.

Obr 5. Graf energetické hustoty v závislosti na výkonové hustotě



3. Možnosti elektrochemických přeměn

Pro tuto práci jsem si zvolil problematiku elektrolýzy, v této části jsem popsal možnosti elektrolýzy, rozdělení elektrolyzérů. Zaměřil jsem se na elektrolýzu vody, protože touto elektrochemickou přeměnou lze nejlépe akumulovat elektrickou energii.

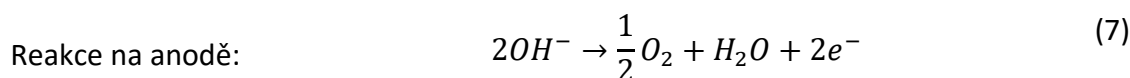
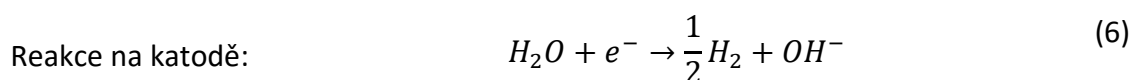
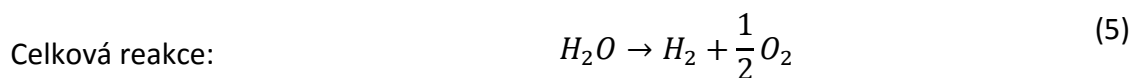
Elektrolýza je děj probíhající na elektrodách při průchodu stejnosměrného elektrického proudu roztokem nebo taveninou. Roztok nebo tavenina musí obsahovat volně pohyblivé ionty, jedná se o redoxní reakci². Elektrolýzou vody lze získat nejčistší zdroj vodíku, dále se využívá při výrobě kovů, čištění kovů a galvanickému pokovování.

Ke kladné elektrodě, anodě jsou přitahovány anionty, probíhá na ní oxidace. K záporné elektrodě, katodě jsou přitahovány kationty, probíhá na ní redukce. Elektrolyt obsahuje kladně i záporně nabitě částice zvané ionty.

3.1. Možnosti elektrolýzy

Elektrolýza H₂O

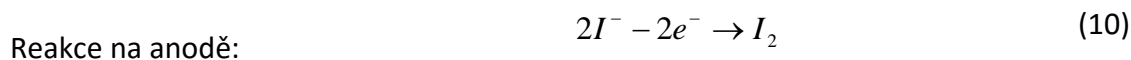
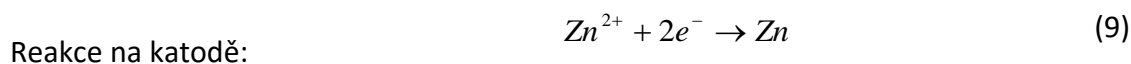
Při elektrolýze vody vzniká na katodě vodík a na anodě kyslík, následující rovnice popisují děj v elektrolyzáru s alkalickým roztokem. Tento typ elektrolýzy je nejvíce vhodný pro akumulaci přebytečné elektrické energie. Vyroběný vodík a kyslík se zpětně přeměňuje na elektrickou energii v palivových článcích.



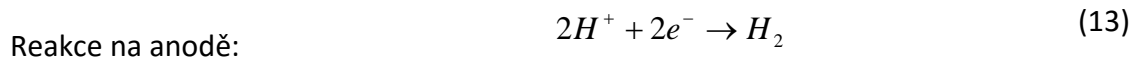
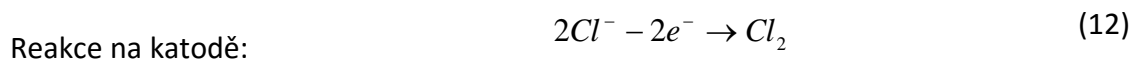
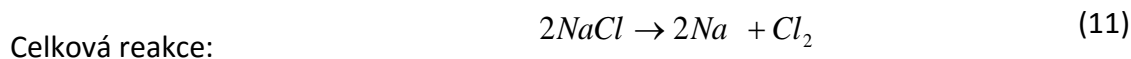
² Redoxní reakce jsou chemické reakce, při kterých se mění oxidační čísla atomů.

Elektrolýza roztoku jodidu zinečnatého ZnI_2 [14]

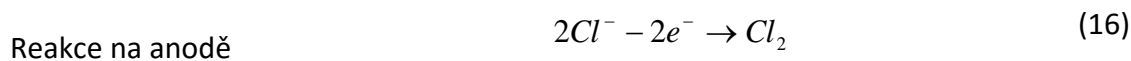
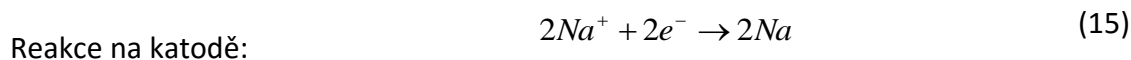
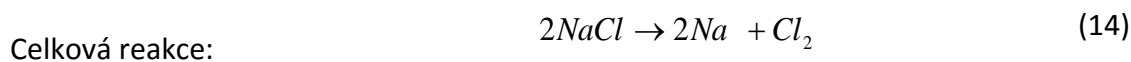
Na záporné elektrodě se vylučuje kovový zinek, na kladné elektrodě vzniká jod.

**Elektrolýza roztoku chloridu sodného $NaCl$ [14]**

Na katodě vzniká vodík z vody, na anodě chlor z $NaCl$, dále v roztoku vzniká hydroxid sodný, který lze získat odpařením vody.

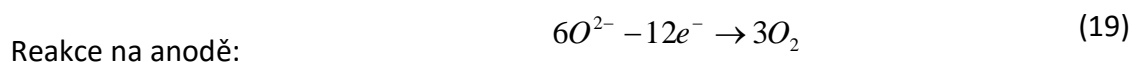
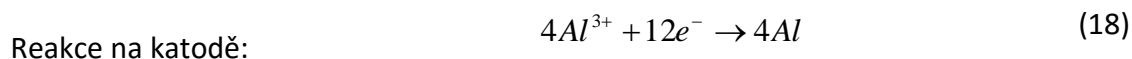
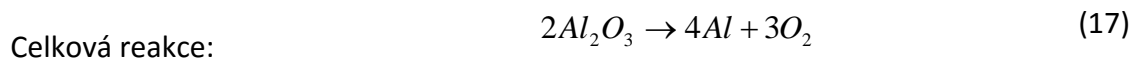
**Elektrolýza taveniny $NaCl$ [14]**

Na anodě vzniká chlor, na katodě sodík, využívá se pro získání chloru.



Výroba hliníku z bauxitu elektrolýzou taveniny [14]

Vyrábí se z rudy bauxitu, která obsahuje 40 – 60 % vázaného Al_2O_3 , čistí se od příměsí, poté se zpracovává čistý Al_2O_3 , elektrolýzou taveniny oxidu hlinitého s kryolitem vzniká na katodě hliník a na anodě kyslík



Tato metoda výroby hliníku je velice drahá, výhodnější je získávání Al z hliníkových odpadů.

Galvanické pokovování

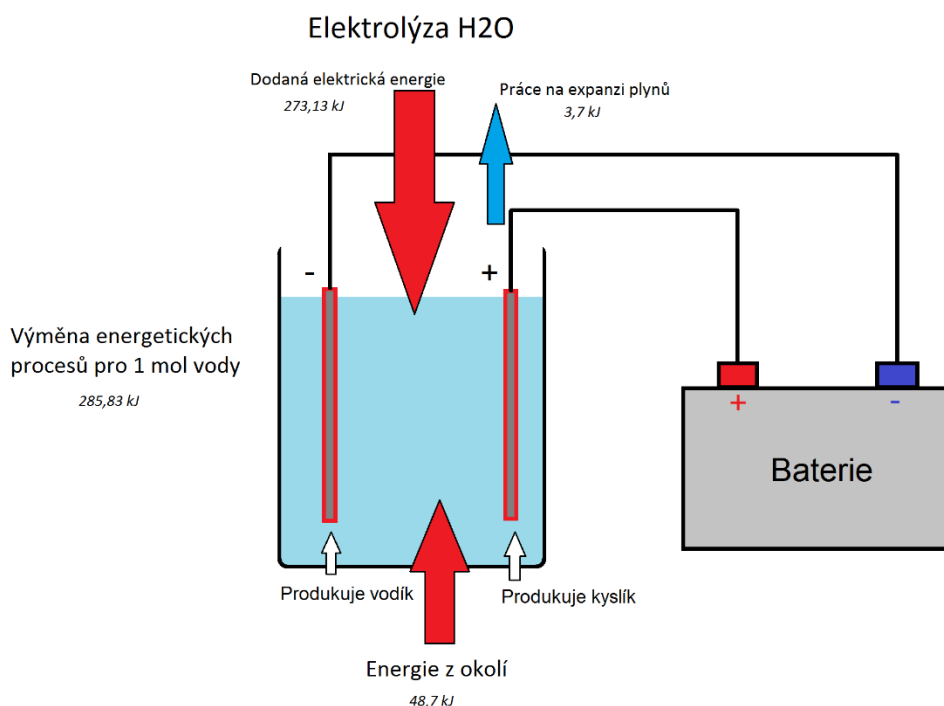
Další možností využití elektrolýzy je galvanické pokovování, které se využívá například při pokrývání předmětů mědí, zinkem, zlatem, stříbrem, chromem nebo niklem. Předmět, který chceme pokovit, zapojujeme jako katodu, kov je při elektrolýze vylučován na anodě.

Tyto typy elektrolýzy se využívají při výrobě kovů, čištění kovů a galvanickém pokovování a nejsou vhodné pro akumulaci elektrické energie.

Většina těchto typů elektrolýzy je velice nákladná, nejvhodnější pro akumulaci elektrické energie je elektrolýza vody. Výroba vodíku z vody je v dnešní době dobře zvládnutá, spotřeba elektrické energie lze dobře regulovat. Vstupní surovinou je voda, té je na planetě Zemi téměř neomezené množství, při elektrolýze vody nevznikají životu nebezpečné látky a další výhodou je, že vyprodukovaný vodík lze využít ve větším množství aplikací viz obr. 11 Vodíkové hospodářství.

3.2. Termodynamika

Obr. 6. Výměna energií při elektrolýze H₂O [12]



Tab. 1. Tabulka pro entalpii a entropii ideálních plynů [12]

	Entalpie ideálního plynu (kJ/mol)	Entropie ideálního plynu (kJ/mol*K)
O ₂	0	0,205
H ₂	0	0,130
H ₂ O	-263,03	0,069



Dodaná energie:
$$\Delta E_R^0 = 286 \left[\frac{kJ}{mol} \right] \tag{21}$$

Změna entropie:
$$\Delta S^0 = S_{H_2}^0 + \frac{1}{2}S_{O_2}^0 - S_{H_2O}^0 = 0,163 \left[\frac{kJ}{mol \cdot K} \right] \tag{22}$$

Změna entalpie
$$\Delta h^0 = h_{H_2}^0 + \frac{1}{2} h_{O_2}^0 - h_{H_2O}^0 = 286,03 \left[\frac{kJ}{mol} \right] \quad (23)$$

Teoretická energie potřebná pro průběh elektrolýzy se vyjadřuje pomocí následujícího vztahu. Energií je dodána elektrickým proudem nebo teplem. V reálných podmínkách je u nízkoteplotní elektrolýzy použit pouze elektrický proud. [12]

Změna Gibbsovy energie:
$$\Delta G^0 = \Delta h^0 + T \Delta S^0 = 286,03 + T \cdot 0,163 \left[\frac{kJ}{mol} \right] \quad (24)$$

- T termodynamická teplota [K]

Hodnota minimálního napětí jednoho článku pro spuštění elektrolýzy vody je reverzibilní napětí. Pro teplotu 25 °C je $U_R = 1,23$ V. [12]

Reverzibilní napětí:
$$U_R = - \frac{\Delta E^0}{n \cdot F} [V] \quad (25)$$

- n množství přenesených elektronů $n=2$ [-]

- F Faradayova konstanta [C/mol]

Termoneutrální napětí je napětí, při kterém by pracoval dokonale efektivní článek a to v případě, že veškerá potřebná energie je dodávána elektrickým proudem. Pro teplotu 25 °C je $U_T = 1,48$ V.

Termoneutrální napětí:
$$U_T = - \frac{\Delta h^0}{n \cdot F} [V] \quad (26)$$

Pokud je napětí na článku vyšší, než U_T , tak se na článku generuje Joulovo teplo a článek se ohřívá. Pokud je napětí na článku nižší, U_T , tak se článek ochlazuje a odvádí teplo spojené se změnami entropie, nevratně. [12]

Účinnost elektrolýzy je definována jako poměr termoneutrálního a provozního napětí.
[12]

$$\text{Účinnost elektrolýzy} \quad \varepsilon = \frac{U_T}{U} [-] \quad (27)$$

$$\text{Napětí článku} \quad U = U_{REV} + \eta_A + |\eta_K| + i \cdot R [V] \quad (28)$$

- $\eta_{A,K}$ Přepětí na anodě, katodě [V]
- R Elektrický odpor článku [Ω]
- i Proud procházející článkem [A]

Člen $i \cdot R$ v rovnici reprezentuje ohmické ztráty ve článku. Při elektrolýze dochází v článku k různým procesům, na základě těchto procesů vznikne v buňce napětí $U > U_{REV}$.
[12]

3.3. Rozdělení elektrolýzoru H₂O

Elektrolýzery mají dvě elektrody a mezi nimi vodivý elektrolyt. Liší se podle typu elektrolytu, který používají. Existuje několik typů elektrolýzérů, které jsou v současné době používány nebo ve fázi vývoje. Dva nejběžnější jsou alkalické elektrolýzery a PEM elektrolýzery. [10]

Elektrolýzér je elektrochemické zařízení, které používá elektrickou energii k rozdělení molekul na jednotlivé atomy. Elektrolýzery jsou široce používány k rozdělení vody na vodík a kyslík. Elektrolýza je v současnosti nejnadějnější způsob výroby vodíku s velmi vysokou čistotou (99,999 %) a to díky vysoké účinnosti a rychlé dynamické odezvě ve srovnání s některými jinými metodami. Vodík vyrobený elektrolýzou je velmi čistý a může být využit zpět do sítě díky palivovým článkům. [10]

Prvním typem elektrolýzoru je alkalická elektrolýza, u níž se používá elektrolyt KOH, druhým typem je elektrolýza, která jako elektrolyt využívá polymerní membránu, třetí typem je elektrolýza v parách, tento typ elektrolýzy probíhá oproti předešlým typům za mnohem vyšších teplot.

Tab. 2. Přehled elektrolyzérů a jejich vlastnosti [12]

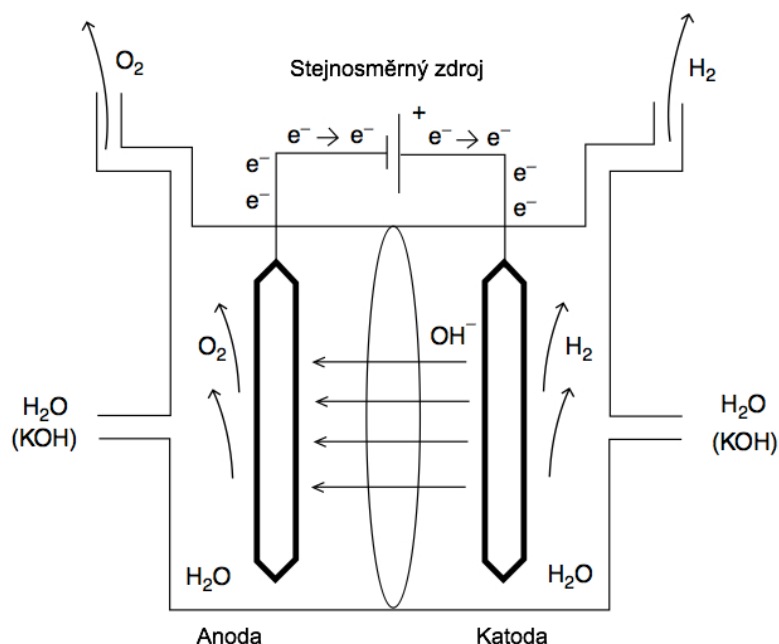
Typ elektrolyzéro	Alkalický roztok	Kyselý roztok	PEM	Vysokoteplotní
Nosič náboje	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	O ²⁻
Reaktant	voda	voda	voda	voda, CO ²
Elektrolyt	KOH	kyselina sírová	polymer	keramický
Elektroda	nikl	platina	platina	nikl
Teplota [°C]	40 - 90	150	20 - 150	700 – 1 000
Reakce na katodě	$H_2O + e^- \rightarrow \frac{1}{2}H_2 + OH^-$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$
Reakce na anodě	$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$	$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2 + 2e^-$	$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2 + 2e^-$	$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$
Napětí článku [V]	1,5 – 2,5	3*	1,4 - 2	1 – 1,3
Proudová hustota [A/cm ²]	0,2 – 2	*	1 - 4	0,3 – 1
Tlak [bar]	až 120	*	až 400	900 – 1 000
Účinnost článku [%]	80 – 90	*	85- 98	90 – 99
Spotřeba elektrické energie [kWh/Nm ³ H ₂]	3,8 – 4,3	*	3,6 - 4	2,5 – 3,5

³ *Údaj nezjištěn, hodnoty se přibližně odpovídají elektrolyzéro s alkalickým roztokem.

3.3.1. Alkalický elektrolyzátor

U tohoto typu elektrolyzátoru je použit alkalický elektrolyt, v destilované vodě je rozpuštěn hydroxid draselný v koncentraci od 25 % do 30 %. U KOH se využívá jeho dobré vodivosti, na rozdíl od kyselých elektrolytů nezpůsobuje korozi elektrod. Důležitou součástí je membrána, ta odděluje oba plyny kyslík a vodík, zároveň musí dobře vézt ionty. Membrána je nejčastěji z azbestu, kompozitu, keramiky nebo polymeru. Rozlišují se dva typy těchto elektrolyzátorů unipolární a bipolární. Unipolární elektrolyzátor mají elektrody připojeny paralelně a membrána oddělující vyprodukovaný vodík a kyslík je umístěna mezi anody a katody. Články bipolárního elektrolyzátoru jsou zapojeny do série, vodík je produkován na jedné straně článku, na druhé straně kyslík. Elektrody jsou odděleny membránami, tyto elektrolyzátor vyrábějí větší množství vodíku a jsou nejčastěji používány. Účinnost tohoto typu elektrolyzátoru se pohybuje kolem 80 %. Tyto elektrolyzátor jsou z robustní a spolehlivé konstrukce, vyrábějí vodík o čistotě 99,8 %, pracují při relativně nízkých teplotách a mají relativně vysokou kapacitu. Typicky pracují při tlaku až 30 barů a při nízké proudové hustotě.

Obr 7. Schéma alkalického článku [13]

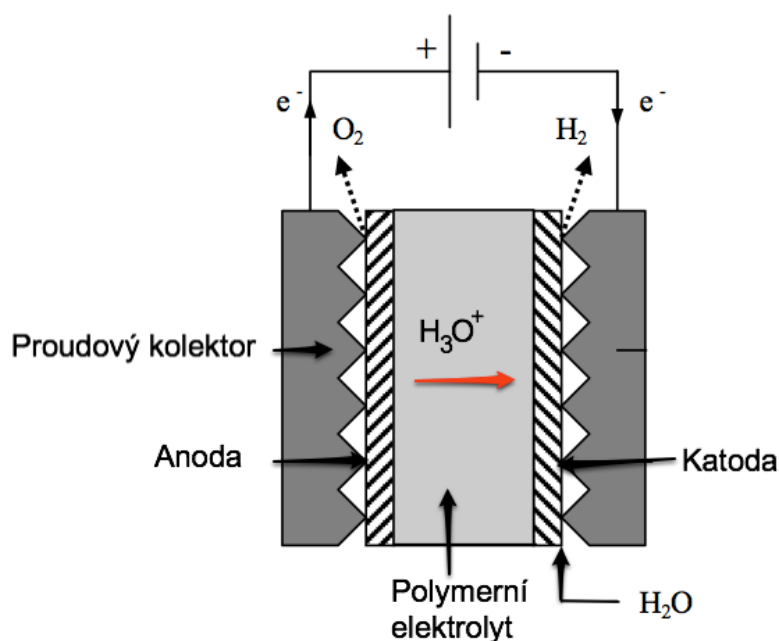


3.3.2. PEM elektrolyzér

Polymer Electrolyte Membrane (PEM) elektrolyzér využívá pevný polymerní elektrolyt membrány jako elektrolyt. PEM elektrolyzéry získávají stále větší oblibu z následujících důvodů, v elektrolyzéru není elektrolyt způsobující korozi elektrod, proto se snižují náklady na údržbu. Nevyžadují žádné pomocné zařízení, které odstraňuje KOH z vodíku. Jsou schopny pracovat při vyšších tlacích a vyšších proudových hustotách, to je výhodné zejména u systémů pracujících s dynamickými zdroji elektrické energie, jako jsou větrné a solární elektrárny, elektrolyzéry jsou schopny zachytit špičky vstupní energie. Z tohoto důvodu jsou lepší alternativou pro systémy akumulace energie z obnovitelných zdrojů elektrické energie. Tento typ elektrolyzéru je charakterizován nízkými ohmickými ztrátami, vysokou účinností a velmi vysokou čistotou vyrobeného vodíku. Velmi čistý vodík je vhodný pro aplikace, které využívají vodíkové palivové články, jako je záložní zdroj napájení pro bezdrátová telekomunikační místa, obytné oblasti, nemocnice nebo jako pohonné hmoty pro silniční dopravu. [10]

U tohoto typu elektrolyzéru je jako elektrolyt polymerní membrána, tato membrána dokáže propouštět ionty. Voda je přiváděna k anodě, kde se rozloží na kyslík, vodíkové ionty a elektrony, atomy kyslíku se na povrchu elektrody spojují na O_2 , zatímco vodíkové ionty prostupují přes membránu.

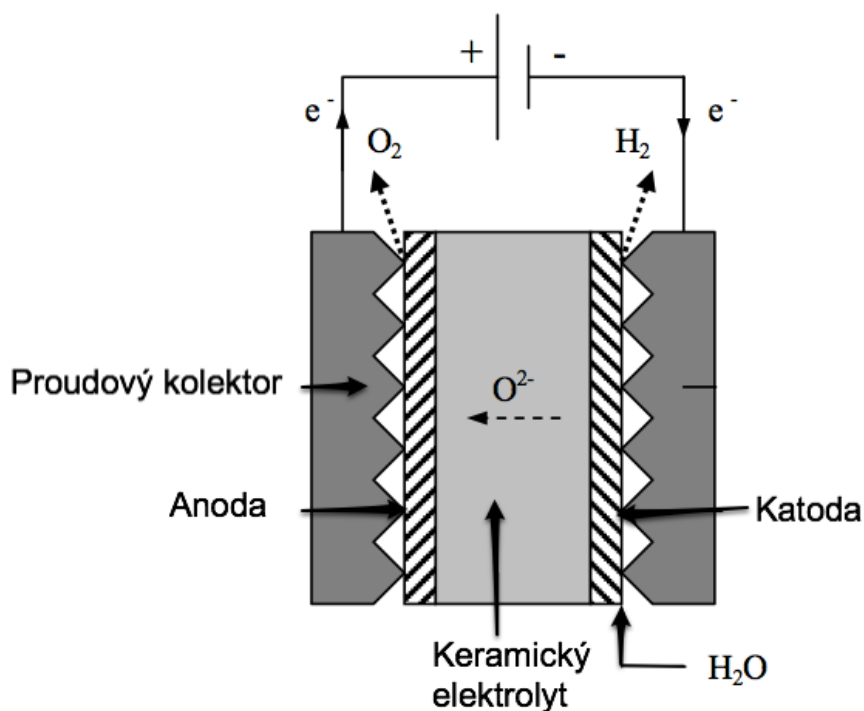
Obr. 8. Průběh PEM elektrolýzy, energie z FV panelu [13]



3.3.3. Elektrolýza za vysoké teploty

Tento typ elektrolýzy probíhá oproti předešlým typům za mnohem vyšších teplot, voda je do procesu přiváděna jako pára. Elektrolyt je vyroben z pevného keramického materiálu, který vede kyslíkové ionty. Parní elektrolýzéry dodávají velkou část potřebné energie na elektrolýzu pomocí tepla z páry. Principiálně funguje stejně jako elektrolýza využívající polymerní elektrolyt. Pevný keramický elektrolyt dovoluje kyslíkovým ionům procházet materiálem od katody k anodě, zatímco zabraňuje pohybu elektronů, které se přemísťují externím obvodem. Keramický elektrolyt také zabraňuje promíchávání vznikajících plynů. [13]

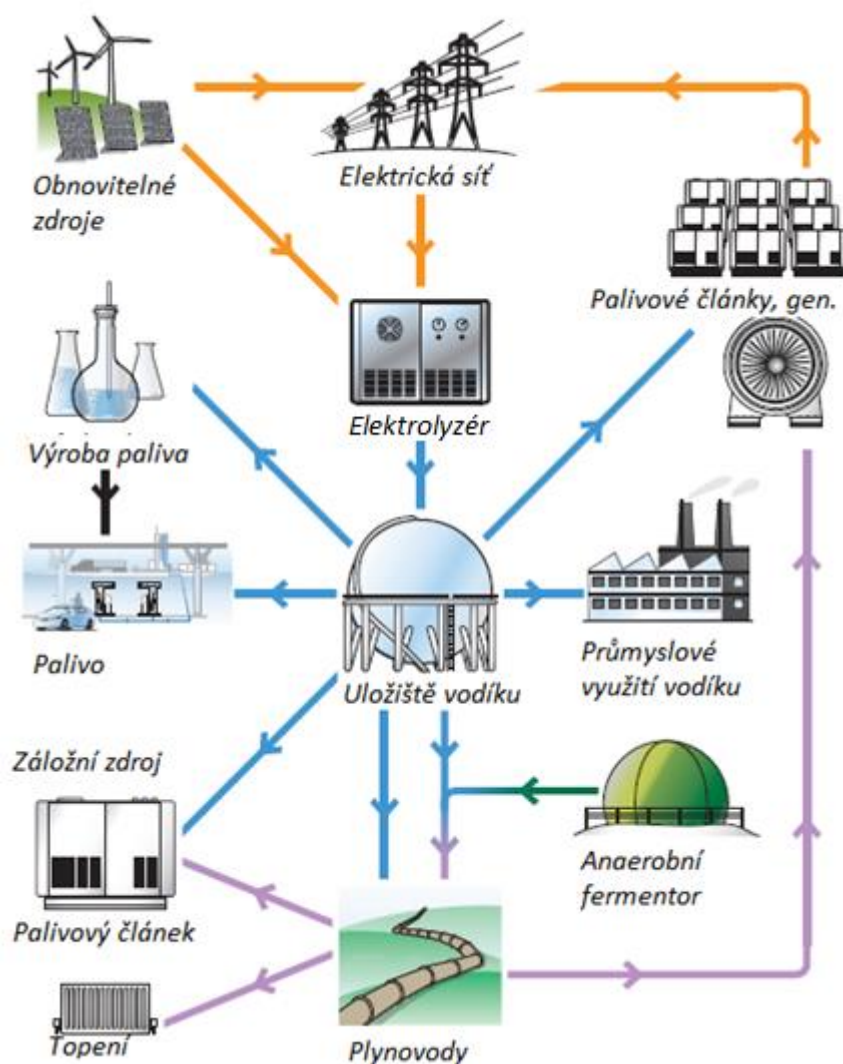
Obr. 9. Elektrolýza za vysoké teploty [13]



3.4. Využití vodíku

Vodík se v současné době využívá v průmyslu, k výrobě syntetického zemního plynu, jako zdroj energie do palivových článků, které generují elektrickou energii, pro přepravu osob v autech, autobusech městské hromadné dopravy a v užitkových vozidlech. Dále se vodík využívá jako záložní zdroj elektrické energie pro nemocnice, datová centra, firmy, výrobní závody, pro telekomunikace, pro malé komerční stavby, elektrické elektrárny a systémy UPS (systémy s nepřetržitým napájením).

Obr. 10. Vodíkové hospodářství [15]



Legenda:

Elektrická energie

Vodík

Bioplyn

Zemní plyn

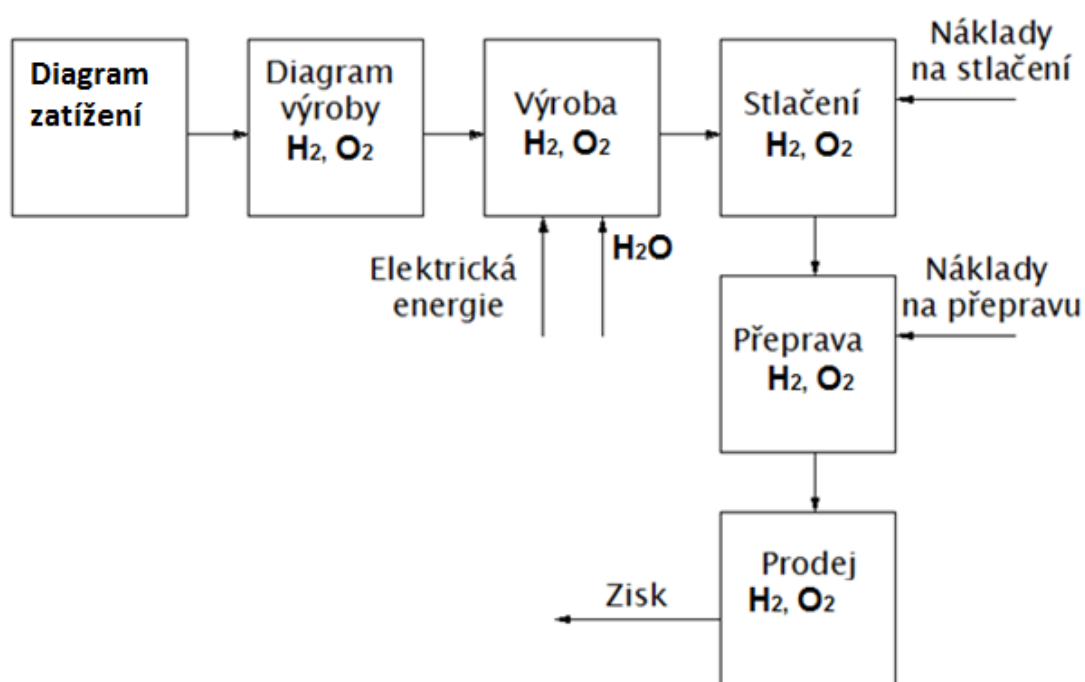
Syntetické palivo

4. Technickoekonomický model zařízení na vyrovnávání diagramu zatížení pomocí elektrolýzy vody

Hlavní myšlenkou tohoto modelu je vyrovnat diagram zatížení v průmyslovém podniku, který odebírá elektrickou energii z hladiny vysokého napětí 22 kV. Velkoodběratelé platí fixní část z platby za elektrickou energii za rezervovaný příkon a variabilní část podle aktuální spotřeby silové elektrické energie. Nabízí se více možností řešení, jak lze vyrovnat denní diagram zatížení. Podnik může snižovat své maxima spotřeby, tím sníží také rezervovaný příkon. Toho lze dosáhnout například akumulací elektrické energie do baterií. V časových úsecích, kdy je spotřeba minimální se baterie nabíjejí, poté se vybíjejí v intervalech maximálního odběru. Tímto se sníží rozdíl mezi maximem a minimem odběru elektrické energie.

Další možností, se kterou budu dále pracovat, je možnost využití celkového rezervovaného příkonu. Dle ročního (měsíčního) maxima se stanoví rezervovaný příkon. V intervalech, kdy není dosahováno maxima rezervovaného příkonu, se elektrická energie využívá v elektrolyzérech.

Obr 11. Blokové schéma technickoekonomického modelu



Vstupem tohoto modelu budou roční data spotřeby elektrické energie průmyslového podniku, který zpracovává plasty. Spotřeba byla měřena v patnácti minutových intervalech. Z těchto hodnot jsem sestavil hodinový diagram spotřeby pro elektrolyzátor. Proces výroby, stlačení a přepravy je řešen v programu Wolfram Mathematica, program je přiložen na CD a také v tištěné formě v příloze. Výstupem programu jsou celkové roční příjmy.

4.1. Vstupy

Nejdůležitějším vstupním údajem jsou data aktuální spotřeby elektrické energie, z těchto dat se vykreslí křivka denního diagramu zatížení, podle té se stanoví výroba vodíku a kyslíku v elektrolyzérch. Tato výroba bude rozdělena do hodinových intervalů. Cena elektrické energie bude nejvíce ovlivňovat celkovou ekonomiku modelu, cena je složena s regulované a neregulované složky. Dalším vstupem bude destilovaná voda a u alkalického elektrolyzátoru také KOH. Ekonomickou část modelu dále ovlivní stlačení a následná přeprava vodíku a kyslíku.

4.1.1. Elektrická energie

Ceny za rezervovanou kapacitu jsou ceny za maximální hodnotu čtvrt hodinového elektrického výkonu, kterou smí odběratel odebrat v jednom odběrném místě ze zařízení provozovatele distribuční soustavy. [11]

Cena za rezervovanou kapacitu pro odběr z distribuční soustavy je uplatňována na kalendářní rok s pevnou měsíční cenou za roční rezervovanou kapacitu nebo na kalendářní měsíc s pevnou měsíční cenou za měsíční rezervovanou kapacitu, přičemž měsíční cenu za roční rezervovanou kapacitu lze kombinovat s měsíční cenou za měsíční rezervovanou kapacitu pro daný kalendářní rok. Došlo-li v odběrném místě ke zvýšení roční rezervované kapacity v průběhu kalendářního roku, účtuje se platba za zvýšenou kapacitu počínaje kalendářním měsícem, pro který bylo navýšení roční rezervované kapacity uplatněno. Roční rezervovanou kapacitu lze v odběrném místě snížit až po uplynutí doby 12 měsíců od poslední změny výše roční rezervované kapacity, pokud se smluvní strany nedohodnou jinak. [11]

Tab. 3. Cena za rezervovanou kapacitu provozovatele distribuční soustavy (ceny bez DPH)

Provozovatel distribuční soustavy	Úroveň napětí	Měsíční cena za roční rezervovanou kapacitu v Kč/MW a měsíc	Měsíční cena za měsíční rezervovanou kapacitu v Kč/MW a měsíc
ČEZ Distribuce, a. s.	VVN	66 336	73 306
	VN	159 183	175 908
E.ON Distribuce, a.s.	VVN	48 464	56 691
	VN	112 462	131 553
PREdistribuce, a.s.	VVN	66 591	74 470
	VN	162 387	181 600
LDS Sever, spol. s r.o.	VN	189 706	204 938
SV servisní, s.r.o.	VN	156 018	168 499

Tento model využívá toho, že průmyslový podnik již za tuto rezervovanou kapacitu platí, cena za odběr 1 MWh silové elektřiny se pohybuje od 1 000 Kč do 1 300 Kč, podle podmínek distributora, k této ceně je dále nutno připočítat regulované složky za využití sítí, podporu výkupu z obnovitelných zdrojů, za systémové služby a za činnost operátora trhu s elektřinou. Pro výpočty jsem zvolil cenu silové elektřiny 1 300 Kč za MWh.

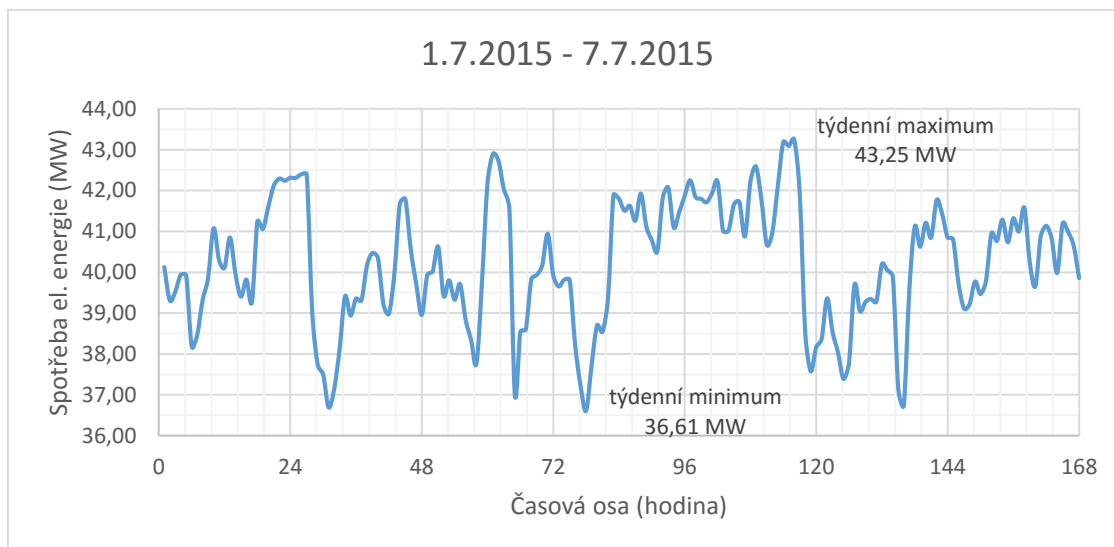
Tab. 4. Cenové položky elektrické energie

Cena elektrické energie	
Použití sítí	66,37 Kč/MWh
Podpora výkupu OZE-KVET-OZ	495,00 Kč/MWh
Systémové služby	119,25 Kč/MWh
Činnost OTE	7,55 Kč/MWh
Celkem za služby	688,17 Kč/MWh
Cena silové elektřiny	1 300,00 Kč/MWh
Cena za elektřinu celkem	1 988,17 Kč/MWh

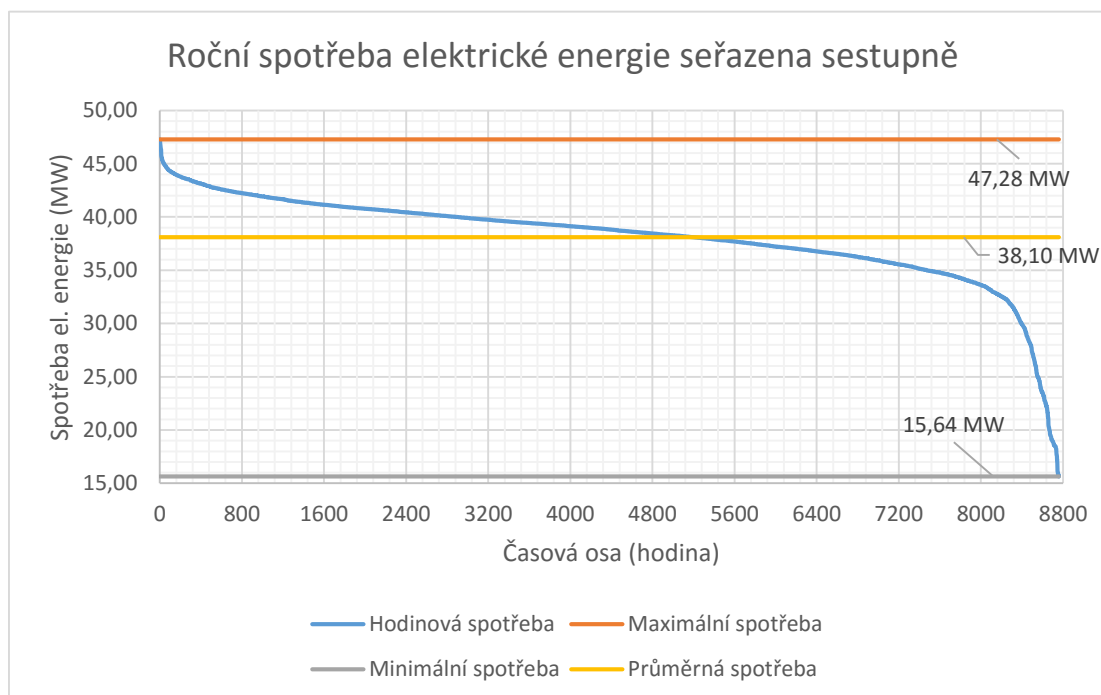
4.1.2. Diagram zatížení

Denní diagram zatížení tvoří hlavní vstup v tomto modelu, podle ročního (měsíčního) maxima se stanoví roční (měsíční) rezervovaná kapacita příkonu. Jako vstupní data jsou použity hodnoty spotřeby elektrické energie v průmyslovém podniku, jehož hlavní činností je zpracování plastů. Spotřeba elektrické energie byla měřena v 15 minutových intervalech, měřené hodnoty spotřeby elektrické energie jsou za rok 2015.

Obr 12. Příklad týdenního diagramu zatížení



Obr 13. Roční spotřeba elektrické energie



4.1.3. Diagram výroby

Diagram výroby jsem vytvořil z roční spotřeby elektrické energie, určil jsem nejvyšší roční spotřebu a od té odečetl aktuální v dané hodině. V kapitole 5. jsou popsány parametry elektrolyzérů, jedním z parametrů je maximální příkon 3,5 MW, model počítá s využitím třech těchto elektrolyzérů. Celkový příkon všech elektrolyzérů je 10,5 MW. Pro lepší pochopení uvedu příklad, rozdíl mezi maximální a aktuální hodnotou spotřeby elektrické energie je 15 MW, elektrolyzéry budou využity na maximum tedy na 10,5 MW.

- n_{ot} Otáčky motoru [ot/min]
- η_m Účinnost pohonu [%]

Spotřeba elektrické energie elektromotoru pro n stupňový kompresor:

$$W_{el} = \frac{p_1 \cdot V}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \cdot \left[1 - e \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right] \quad [kWh] \quad (30)$$

- V Stlačené množství [m^3]
- p_1 Vstupní tlak kompresoru 30 bar [bar]
- p_2 Výstupní tlak kompresoru 200 bar [bar]
- n Počet stupňů kompresoru [-]
- κ Počet stupňů volnosti pro H_2 a O_2 [-]
- e Nestlačitelný objem [-]

Přeprava

Ceny za přepravu autodopravci většinou uvádějí v jednotkách Kč/km, obvykle se tyto ceny pohybují od 27 Kč/km do 35 Kč/km. Cenu ovlivňuje několik parametrů jako je například dlouhodobá spolupráce nebo přeprava nebezpečného nákladu. Po konzultaci s dispečerem jsem stanovil cenu pro model 30 Kč/km, a přepravní vzdálenost 1 000 km.

4.1.5. Ostatní vstupy

Parametry elektrolyzéru

Pracovní podmínky: 30 bar, 85°C, podíl 25 % KOH v H_2O

Výroba: 760 m^3/h H_2 , to odpovídá 3,3 MW el.

Spotřeba elektrické energie: 4,3 - 4,6 kWh/ m^3 H_2

Částečné zatížení: 25 % nominální kapacity

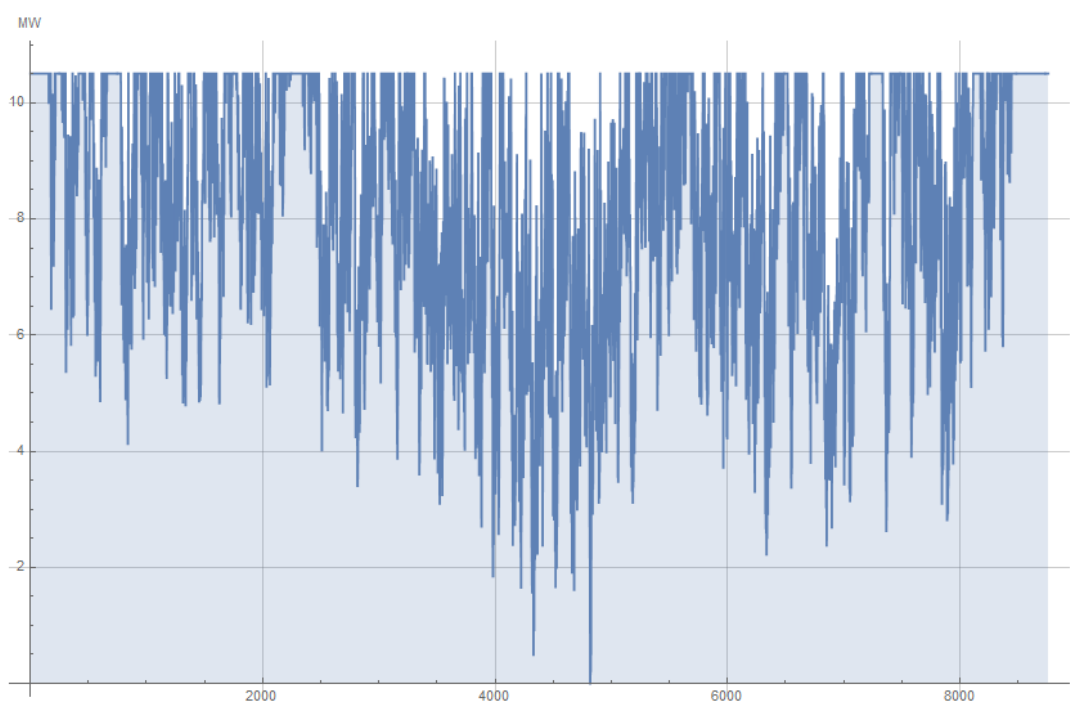
Destilovaná H_2O

Minimální spotřeba H_2O na výrobu 1 Nm^3 vodíku je 0,8 l, po přičtení ztrát jsem zvolil hodnotu 0,85 l na výrobu normovaného kubického metru vodíku, tuto spotřebu uvádí také výrobce elektrolyzéru.

4.2. Výstupní data, programové řešení

Okomentovaný model je přiložen v příloze a také na CD. Na CD je soubor *program.nb*, který načítá vstupní data hodinové spotřeby elektrické energie ze souboru *data.xlsx*. Výstupem tohoto modelu je množství vyrobeného vodíku, kyslíku a celková spotřeba elektrické energie. Data z tohoto programu slouží jako podklad pro ekonomické výpočty v následující kapitole.

Obr 15. Spotřeba elektrické energie v elektrolyzáru



Výstupní data:

Množství vyrobeného H ₂ za rok:	15,622·10 ⁶ Nm ³
Množství vyrobeného O ₂ za rok:	7,811·10 ⁶ Nm ³
Spotřeba elektrické energie za rok:	71,861 GWh

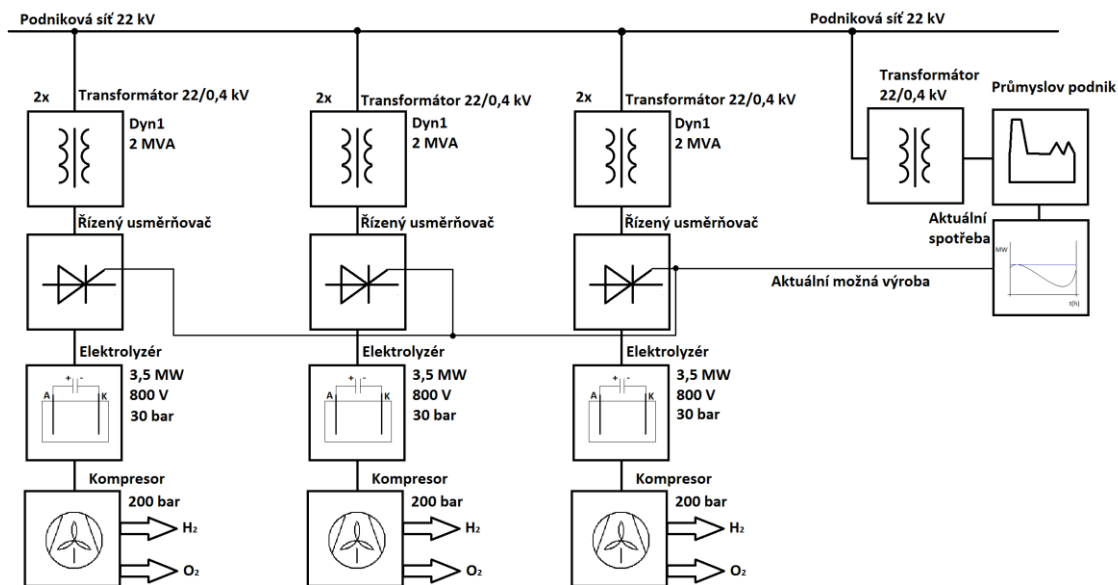
5. Návrh zařízení pro elektrolýzu vody s rozsahem elektrického výkonu 1 – 10 MW

V této části popíšu zařízení, které vyrábí vodík a kyslík z přebytků energie v průmyslovém podniku. Hlavními komponenty, na kterých stojí tento model, jsou transformátory, řízené výkonové usměrňovače, kompresory a samozřejmě také elektrolýzéry.

5.1. Blokové schéma zařízení

Toto uspořádání vychází z požadavku zadání, tedy navrhnout takové zařízení, které dokáže měnit rozsah elektrického výkonu od 1 MW do 10 MW. Limitem byl výkon elektrolýzéry, elektrolýzéry jsou navrženy tři, každý s výkonem 3,5 MW dohromady tedy 10,5 MW. Tyto elektrolýzéry požadují, vstupní napětí 800 V. Pro jeden elektrolýzér budou použity dva transformátory s napěťovým převodem 22 kV / 0,4 kV a zdánlivým výkonem 2 MVA. Tyto dva transformátory budou spojeny paralelně. Jejich výstupní svorky budou spojeny tak, aby se výstupní napětí rovnalo 800 V. Výstupní střídavé napětí se usměrnění ve dvanácti-pulzním tyristorovém usměrňovači. Výrobce elektrolýzérů uvádí, že je možno tyto elektrolýzéry řídit od 25 % jejich maximálního výkonu. Na výstupu elektrolýzéry je plynný kyslík a vodík, jehož tlak je 30 bar. Pro zlepšení ekonomiky při přepravě se tyto plyny stlačí na 200 barů.

Obr 16. Blokové schéma zařízení



5.1.1. Elektrolyzér

Pro navrhované zařízení bude použit tlakový alkalický elektrolyzér firmy ELB, který vyrábí vodík a kyslík ve vysoké čistotě. Oproti atmosférické elektrolýze má tu výhodu, že vodík a kyslík na výstupu mají již tlak 30 barů. To samo o sobě umožňuje přímé použití vyprodukovaných plynů ve většině aplikací. [17]

Obr 17. Alkalický tlakový elektrolyzér [17]



Tlakové elektrolyzéry se vyznačují propracovaným designem, vysokou spolehlivostí, jednoduchostí použití a dlouhou dobou života. Elektrody jsou vyrobené z pozinkované oceli, která zvyšuje aktivní oblast elektrody. Vylepšená konstrukce napomáhá ke snížení stejnosměrného odporu a zvýšení aktivní plochy elektrolyzéro. Díky tomuto uspořádání může elektrolyzér vyrábět větší množství vodíku v jednom zařízení s malými rozměry. Elektrolyzér používá jako elektrolyt hydroxid draselný, jehož koncentrace je 25 %. Elektrolyt cirkuluje v elektrolyzéro a tím dopomáhá k odvodu tepla a rovnoměrné koncentraci ve všech člancích elektrolyzéro. Oddělování plynů a elektrolytu probíhá v horizontálním separátoru. [17]

Čistota plynu: [17]

Vodík: 99,8 % - 99,9 % objemu

Kyslíku: 99,3 % - 99,6 % objemu

Zbytkové nečistoty v produktových plynech: [17]

O₂ v H₂ : 0,1 % - 0,2 % objemu

H₂ v O₂ : 0,4 % - 0,7 % objemu

H₂O 1 g - 2 g / Nm³

KOH: <10 mg / Nm³ H₂

Plyny jsou bez složek CO, CO₂, CH₄, síry nebo chlóru.

Spotřeba a výroba:

V elektrolýze je objem výroby vodíku z Faradayova zákona přímo úměrný elektrickému proudu I. Pro vyprodukování standardního kubického metru vodíku je potřeba přenos náboje přes elektrolýzér o velikosti 2,4 kAh. Tento přenos náboje lze docílit tak, když přes elektrolytické buňky, bude po dobu jedné hodiny procházet proud o velikosti 2,4 kA. Obvyklé proudové hustoty pro alkalické elektrolýzéry jsou v současné době v rozmezí od 2 000 A / m² do 4 000 A / m². Měrná spotřeba elektrické energie na výrobu normovaného krychlového metru vodíku (v kWh / Nm³) se získá ze specifických požadavků na výkon a napětí článků. Běžné napětí článku při uvádění do provozu je od 1,8 V do 2,0 V, potřebné množství energie je tedy v rozmezí od 4,3 kWh do 4,8 kWh na 1 Nm³ H₂. Tato hodnota je spojena s počátkem doby života zařízení, neměla by být považována za trvalou hodnotu. Spotřeba vody je 0,85 l / Nm³ H₂. Voda potřebná na chlazení elektrolýzéro je 80 l / Nm³ H₂. Produkce plynu je pohyblivá mezi 25 % a 100 % jmenovité kapacity na každém elektrolýzéro. [17]

Údržba:

Tlakové elektrolýzéry jsou určeny pro mnoho let nepřetržitého provozu a jsou v podstatě bez nároků na údržbu. Tento typ elektrolýzéro lze provozovat po dobu 20 let bez jakékoli údržby. [17]

Elektrické parametry:

Elektrické napětí 800 V, výkon elektrolyzéro 3,5 MW.

Investiční náklady:

Investiční náklady u elektrolyzéro s kapacitou produkce větší než 200 Nm³ H₂/h se pohybují kolem 2 500 € - 4 000 € za 1 Nm³/h vyprodukovaného vodíku. Tyto náklady navyšují další systémové komponenty, jako jsou kompresory nebo zařízení pro skladování plynu. [17]

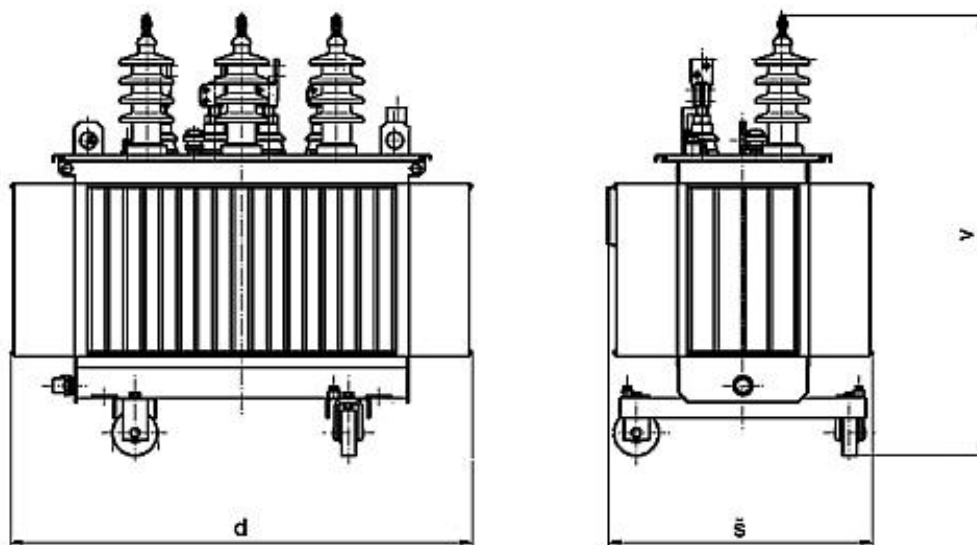
5.1.2. Transformátory

Průmyslový podnik je připojen k distribuční síti na hladině napětí 22 kV, vstupní napětí navrhovaného elektrolyzéro je 800 V. Neoptimálnější řešení je zvolit transformátor s napěťovým převodem 22 kV / 0,4 kV v zapojení Dyn1. Tento typ transformátoru se vyskytuje v distribuční síti nejčastěji. Jeho technologie je dobře zvládnuta a nabízí velkou škálu výkonových řad. Pro jeden elektrolyzér tedy budou spojeny dva transformátory paralelně, uvažují tři elektrolyzéry, celkově tedy šest transformátoru s převodem 22 kV / 0,4 kV, spojení vinutí a hodinový úhel Dyn1 a zdánlivým výkonem 2 MVA. Tento výkon jsem zvolil z těchto důvodů, při paralelním spojení transformátorů je dostatečná výkonová rezerva pro plynulý chod elektrolyzéro. Při poruše jednoho z transformátoru mohou elektrolyzéry dále pracovat. Výkonové zatížení se rovnoměrně rozdělí do třech transformátorů, tím se zvýší jejich životnost, spolehlivost a sníží náklady na údržbu. [26]

Podmínky paralelního spojení transformátorů: [19]

1. Stejná velikost napětí na primárním a sekundárním vinutí, $U_1 = 22 \text{ kV}$, $U_2 = 0,4 \text{ kV}$
2. Stejně napětí nakrátko, $u_K = 6 \%$
3. Stejný zdánlivý výkon, $S = 2 \text{ MVA}$
4. Stejný hodinový úhel a spojení vinutí, Dyn1
5. Stejný sled fází

Obr 18. Nízkoztrátový olejový transformátor [19]



Rozměry pro výkonovou řadu 2 MVA: [19]

$$d = 1\,920 \text{ mm}, \text{ š} = 1\,190 \text{ mm}, v = 2\,145 \text{ mm}$$

5.1.3. Dvanácti pulsní řízený usměrňovač

Elektrolyzéry pracují se stejnosměrným proudem. Pro toto zařízení bude potřeba takový usměrňovač, který dokáže poskytnout na svém výstupu stejnosměrné napětí 800 V a stejnosměrný proud podle potřeby až 3 500 A. Tento typ řízeného usměrňovače má ve své nabídce firma Siemens, usměrňovače této firmy lze řadit paralelně a umožňují dvanácti pulsní zapojení. Tyto měniče lze doplnit o další příslušenství, jako jsou pojistky, filtry vyšších harmonických a přepětové ochrany. [20]

Obr 19. SINAMICS DC Master [20]



5.1.4. Kompresor

Kompresor slouží ke zhušťování objemu, pro tento typ modelu je plynem vodík a kyslík. Při stlačování plynu se zvyšuje jeho tlak a teplota. Kompresory nad 500 fyzikálních atmosfér což je přibližně 506,6 barů se musí chladit. Pro snížení teploty při stlačení se využívá vícestupňové komprese. Asi do 25 barů se používají dvojstupňové kompresory, od 40 barů třístupňové a pro mnou navrhované řešení 200 barů jsou to čtyřstupňové a pětistupňové kompresory. Díky rozdělení kompresoru na více stupňů se nejen sníží teplota, ale také se zvýší spolehlivost a komprese se přiblíží k ideální izotermické kompresi. Pro stlačování kyslíku musí být použity speciální kompresory, tyto kompresory bývají nejčastěji třístupňové a jejich pracovní tlak bývá kolem 165 barů. Klasické kompresory mažou písty olejem, olej v kyslíku vybuchuje, proto píst ve válci běhá na sucho, válec se maže destilovanou vodou s 5 % až 10 % koncentrací glycerínu. [22]

5.2. Ekonomické vyhodnocení

V této části jsem popsal ekonomické vyhodnocení modelu, na CD je uložen soubor *Ekonomika modelu.xlsx*, v tomto souboru lze nastavovat vstupní data a pozorovat změny na průběhu ročního peněžního toku.

5.2.1. Prostá doba návratnosti

Prostá doba návratnosti je porovnávací ekonomické kritérium, zanedbává fakt, že lze peníze vložit do alternativní investice. Toto kritérium je nejméně vhodné, ale nejčastěji používané.

$$T_P = \frac{IN}{CF} [\text{roky}] \quad (31)$$

- IN Investice [Kč]
- CF Roční cash flow (peněžní tok) [Kč]

5.2.2. Diskontovaná doba návratnosti

Jedná se o obdobné kritérium jako prostá doba návratnosti, zahrnuje v sobě možnost investovat do jiného projektu.

Stanovení diskontu

Pro výpočet čisté současné hodnoty je hodnota diskontu stěžejní, diskont zahrnuje hodnotu alternativní investice, riziko investice a časovou hodnotu peněz. Diskontní míru lze pro tento typ projektu určit z meziroční inflace⁴ a úroků dlouhodobých dluhopisů ČR, ty se pohybují kolem 4 %. [18]

$$T_D = \frac{IN}{DCF} = \frac{IN}{\frac{CF}{(1+r)^t}} \text{ [roky]} \quad (32)$$

- DCF Diskontovaný cash flow (peněžní tok) [Kč]
- R Diskont [%]

5.2.3. Čistá současná hodnota NPV

Nejvhodnější ekonomický ukazatel, zahrnuje celkovou dobu životnosti i možnost investice do stejně rizikového projektu. Pokud má NPV kladnou hodnotu projekt lze doporučit. Pokud má projekt nulovou hodnotu, lze tvrdit, že splnil naše očekávání.

$$NPV = \sum_0^t \frac{CF_t}{(1+r)^t} = \sum_1^t \frac{CF_t}{(1+r)^t} - IN \text{ [Kč]} \quad (33)$$

⁴ Od roku 2014 míra inflace nepřekročila 1 %

5.2.4. Vnitřní výnosové procento IRR

Je to takový diskont, při kterém se rovná čistá současná hodnota 0.

$$NPV = 0 \quad \sum_1^t \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} - IN = 0 [\%] \quad (34)$$

5.2.5. Návratnost investice ROI

Poměr ročního čistého zisku k celkové investici. Tento ukazatel slouží pro rozhodování, zda danou investici učinit nebo k porovnání podobných investic.

$$ROI = \frac{EAT}{IN} \cdot 100 [\%] \quad (35)$$

- EAT Čistý zisk

5.2.6. Ekonomické vyhodnocení

V podkladech pro diplomovou práci jsem našel, že cena elektrolýzérů se může pohybovat od 2 000 € do 4 000 € za kapacitu výroby jednoho normovaného metru kubického vodíku za hodinu. Jeden elektrolýzér vyrábí 760 Nm³ H₂/h, celková kapacita je tedy 2 280 Nm³ H₂/h.

Tab. 5. Investiční náklady elektrolýzérů

Poživovací cena pouze pro elektrolýzér		
Hodinová výroba	2 280	Nm ³ H ₂ / h
Investiční náklady elektrolýzéry	3 000	€ za Nm ³ / h
Kurz	27	Kč/€
Investiční náklady	184 680 000	Kč

V následujících tabulkách jsou hodnoty z excelu, který je přiložen v příloze. Pomocí posuvných panelů je možno nastavovat diskont, výkupní ceny plynů, cenu za silovou složku elektřiny a celkovou cenu investičních nákladů. Hodnoty produkce plynů, výdaje na přepravu a stlačení, spotřeby elektrické energie v následující tabulce jsou importovány z programu *příloha 1.* a *2.*. Chyby v systému zahrnují ztráty v celém systému výroby, zhoršují produkci plynů, mají tedy negativní vliv na výslednou ekonomiku.

Tab. 6. Tabulka vstupů a výstupů z excelu *Ekonomika modelu*

Vstupní hodnoty z programu		
Diskont	4	%
Prodej H ₂	12	Kč/Nm ³
Prodej O ₂	11	Kč/Nm ³
Roční produkce H ₂	13 278 785	Nm ³
Roční produkce O ₂	6 639 392,5	Nm ³
Roční spotřeba elektrické energie	71 861,5	MWh
Výdaje na stlačení a přepravu	218	Kč/MWh
Výdaje voda	1 128 696,70	Kč/rok
Ztráty v systému	15	%
Roční provozní výdaje	363 556,78	Kč
Instalovaný výkon elektrolyzéro	10,5	MW
Investiční náklady	1 300	\$/kWh
Kurz	24,5	Kč/\$
Doba životnosti	20	Let
Roční cash flow	72 711 355,32	Kč
Celkové investiční náklady	334 425 000,00	Kč

Pro prezentaci výsledků do této diplomové práce jsem zvolil následující hodnoty z předchozí tabulky: diskont, ztráty, roční provozní výdaje.

V následující tabulce jsou ekonomické výstupy z excelu. V ukazateli návratnosti investice (ROI) jsem pro zjednodušení čistého zisku po zdanění (EAT) použil hodnotu ročního cash flow, od této hodnoty jsem odečetl 15 % daň z příjmu.

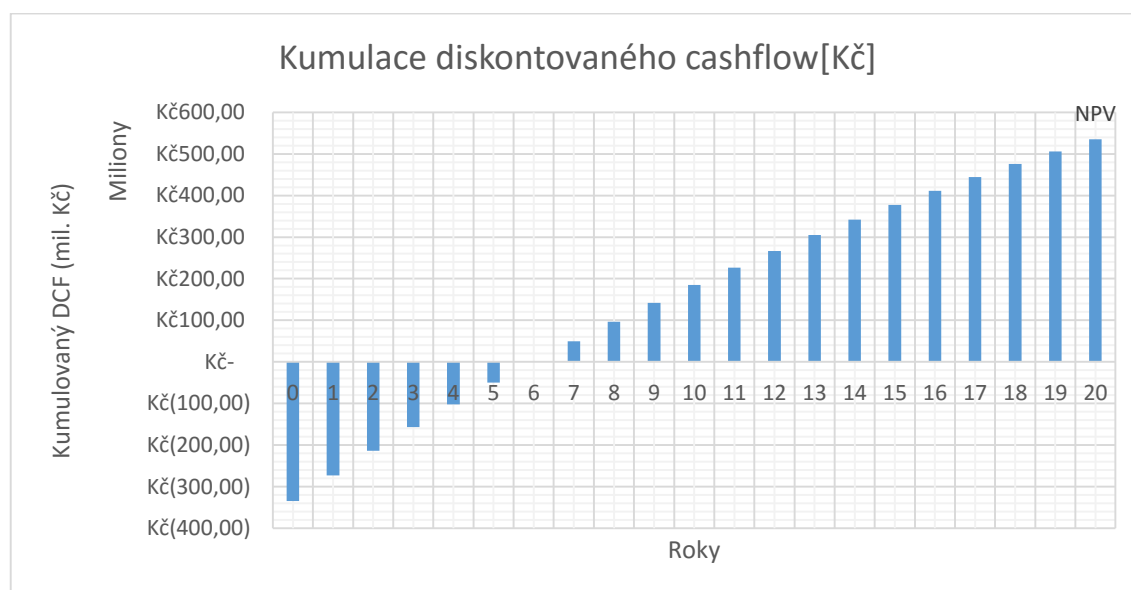
Tab. 7. Tabulka ročních zisků

Tabulka ročních zisků		
Daň z příjmu	15	%
Odpisy	16 721 250,00	Kč
EBITDA	72 711 355,32	Kč
EBT	55 990 105,32	Kč
EAT	47 591 589,52	Kč

Tab. 8. Ekonomické vyhodnocení investice

Ekonomické vyhodnocení investice		
Prostá doba návratnosti	5,2	roky
Diskontovaná doba návratnosti	11,4	roky
Vnitřní výnosové procento IRR	18,5%	%
Čistá současná hodnota NPV	535 407 750,32 Kč	Kč
ROI	14	%

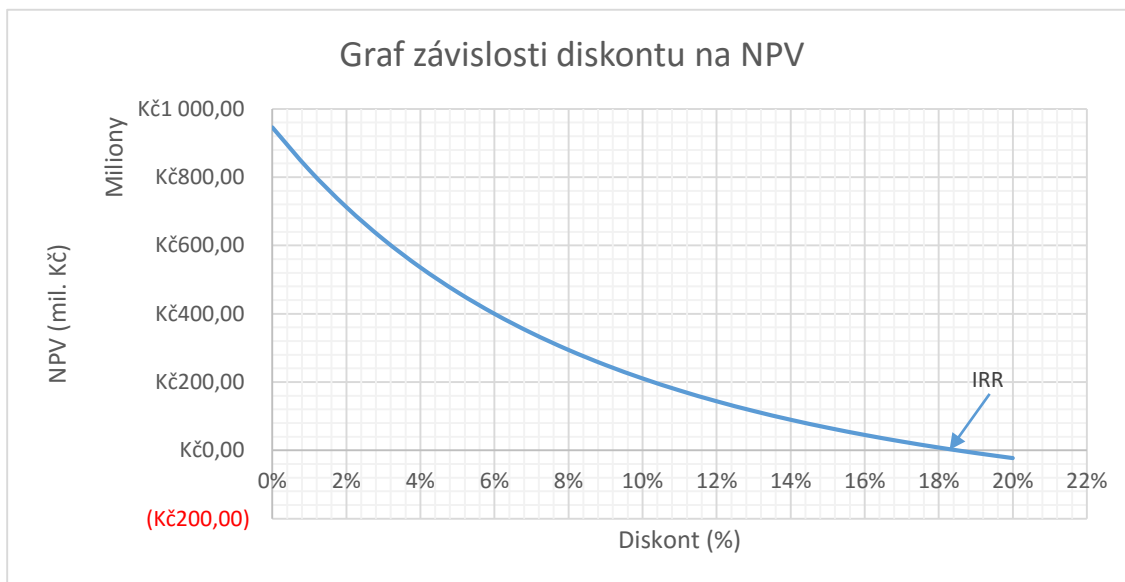
Obr 20. Průběh peněžního toku



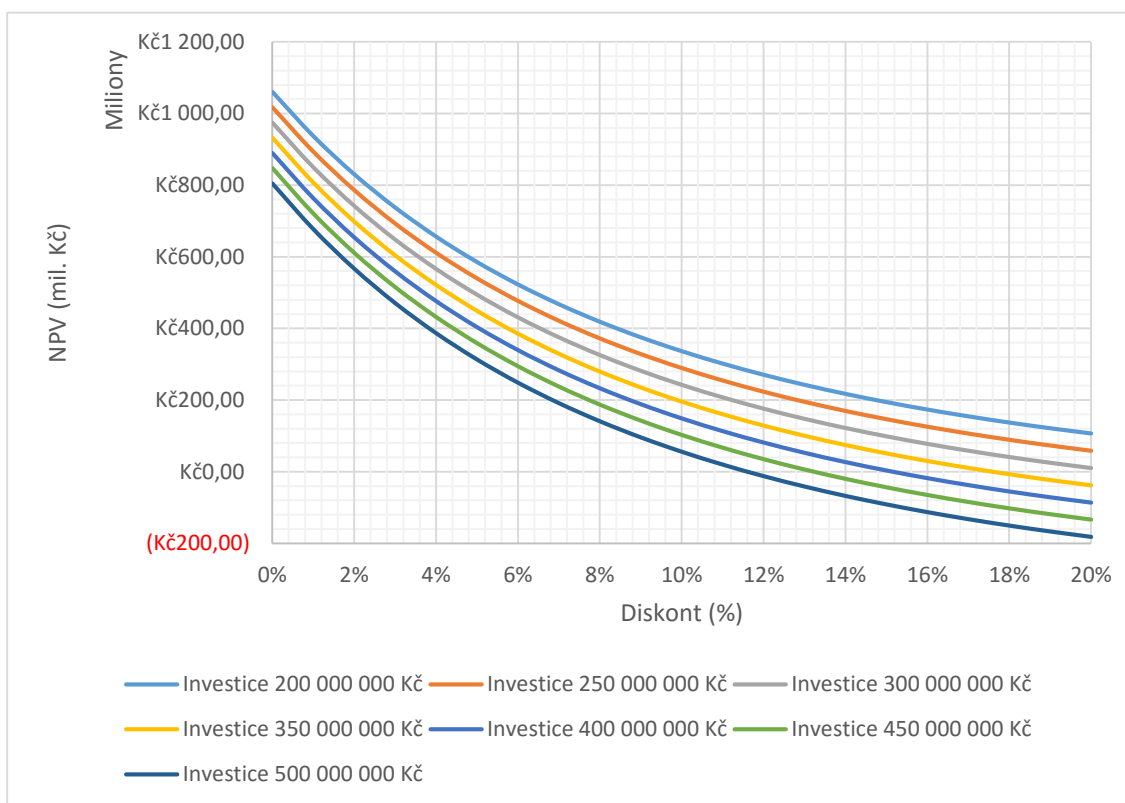
5.3. Citlivostní analýza

Na následujícím grafu lze pozorovat, jak se mění čistá současná hodnota v závislosti na změně diskontu, při NPV = 0 Kč dosahuje hodnota vnitřního výnosového procenta 18,5 %.

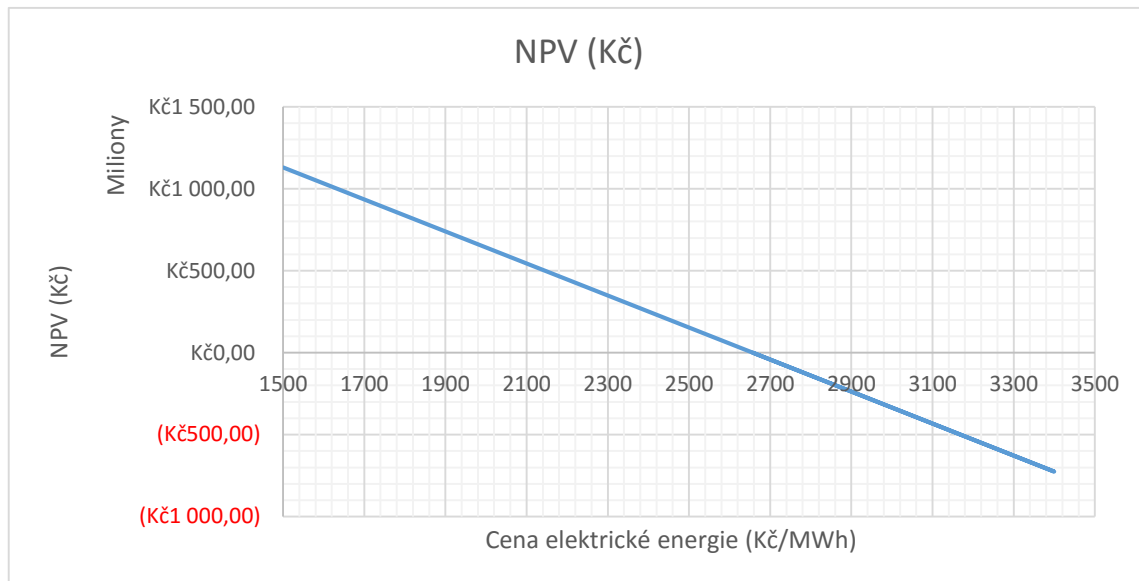
Obr 21. Graf závislosti diskontu na NPV



Obr 22. Graf závislosti diskontu na NPV pro různé hodnoty investic

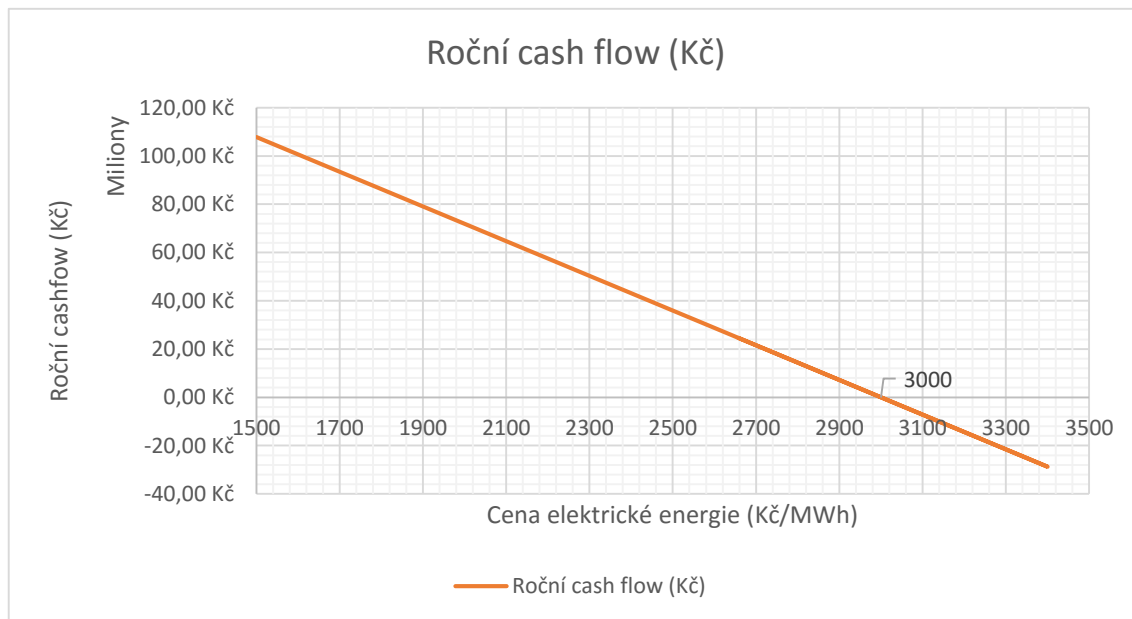


Obr 23. Graf závislosti ceny elektrické energie na NPV



Nulová hodnota NPV je při ceně elektrické energie 2 657,5 Kč/MWh, při této ceně a stanoveném diskontu lze říct, že tato investice splnila naše očekávání.

Obr 24. Graf závislosti ceny elektrické energie na ročním peněžním toku



Cena elektrické energie má největší vliv na výslednou ekonomiku projektu, pokud by celková cena za elektrickou energii překročila hodnotu 3 000 Kč/MWh projekt by generoval zápornou hodnotu meziročního cash flow.

6. Možnosti dalšího využití této technologie v rámci distribučních sítí

V této poslední kapitole jsou nastíněny možnosti dalšího využití této technologie. Jednou z možností je nakupovat na krátkodobém trhu, kde lze v krajních případech sjednat i záporné ceny za odebranou elektrickou energii v daný čas. V praxi to může znamenat, že za spotřebovanou elektrickou energii dostaneme zapláceno. Další možností je propojit předchozí model s kogenerační jednotkou. Kogenerační jednotky se řídí podle potřeby tepelné energie na daný den, vyprodukovaná elektrická energie by byla využita v elektrolyzátoru.

6.1. Nákup na krátkodobém trhu

První možností je nákup na krátkodobém trhu. Na tomto trhu se obchoduje s dodávkou v řádu dní až hodin předem. Existuje více možností, jak se dá obchodovat. [21]

Blokový trh:

Na blokovém trhu se obchoduje s produkty: Base, Peak nebo Off-Peak. Anglické názvy určují, na které denní období je dodávka uzavírána. [21]

- Base – základ = celý den.
- Peak – špička = od 8 do 20 hod..
- Off-Peak – mimo špičku = od 20 do 8 hod.

Denní trh:

Na denním trhu se obchoduje s dodávkou na den dopředu. Obchod probíhá formou 24 aukcí, na každou hodinu dne jedna. Výsledkem aukce je vždy výsledná cena a zobchodované množství energie. [21]

Vnitrodenní trh:

Na vnitrodenním trhu se obchoduje v daný den na dodávku většinou minimálně hodinu předem. Na tomto trhu mohou upevňovat svojí pozici účastníci, kteří neplánovaně mají nedostatek nebo přebytek energie. Obchody na tomto trhu probíhají formou průběžného obchodování. [21]

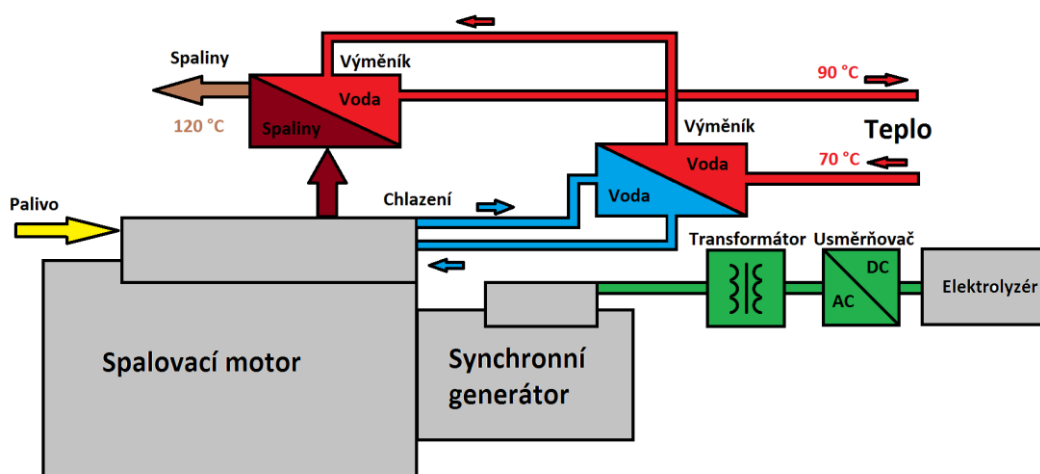
Vyrovňovací trh:

Tento trh má centrální poptávku - nabídku, kterou řídí provozovatel přenosové soustavy, uzavírá se 30 minut před začátkem dodávky a provozovatel přenosové soustavy zde může nakoupit regulační energii. [21]

6.2. Využití kogenerační jednotky

Kogenerační jednotka se řídí podle potřeby tepla, přebytek elektrické energie jsou ve většině případů spotřebovány v místě provozu kogenerační jednotky a snižují tak spotřebu elektrické energie. Všechna elektrická energie je spotřebována v místě výroby, odpadájí tak problémy s prodejem. Pokud chceme elektrickou energii prodávat, je nutné získat licenci pro podnikání v energetice, kterou vydává Energetický regulační úřad.

Obr 25. Schéma kogenerační jednotky a elektrolýzoru



7. Závěr

V této práci jsem se zabýval možnostmi akumulace elektrické energie, především pak elektrolýzou vody, kde je přebytečná elektrická energie přeměněna na energii chemickou. V praktické části jsem vytvořil technickoekonomický model pro elektrolýzu vody. Tento model vyrovnává diagram zatížení a využívá tak celkovou rezervovanou výkonovou kapacitu průmyslového podniku.

Výstupem této diplomové práce je také program v prostředí Wolfram Mathematica, tento program načítá tabulku spotřeby, ta je přiložena v excelu. Položky v této tabulce jsou hodnoty hodinové spotřeby podniku. Tento program lze implementovat na různé průmyslové podniky, pokud známe jejich roční hodinový odběr elektrické energie. Výstupní data z tohoto programu jsou dále využita v souboru *Ekonomika modelu.xlsx*, v tomto souboru je možnost měnit vstupy a pozorovat hodnoty ekonomických ukazatelů, jako je například čistá současná hodnota, vnitřní výnosové procento nebo doba návratnosti investice. Z citlivostní analýzy vyplývá, že cena elektrické energie má největší vliv na celkovou ekonomiku.

Jednoznačně nelze určit přesnou hodnotnou počáteční investice a dalších vstupů do navrhovaného zařízení na výrobu vodíku a kyslíku, proto do závěru nechci uvádět výsledky ekonomických ukazatelů, tyto výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.2. Z pohledu podniku a investora se při těchto výsledcích jedná o velmi lukrativní investici.

Došel jsem k závěru, že tento model bude více efektivnější v podnicích s vyšším rozdílem denního maxima a minima spotřeby elektrické energie. Pokud by byla schválena novela energetického zákona a platily by se regulované poplatky (OTE, OZE, KVET, atd.) také za rezervovanou kapacitu stal by se tento model ještě více rentabilním.

8. Seznam použité literatury

- [1]: ELECTRICAL ENERGY STORAGE – IEC – International Electrotechnical Commission – ISBN 978-2-88912-889-1
- [2] M. NAKHAMKINVG: Novel Compressed Air Energy Storage Concepts Developed by ESPC, EESAT, 2007.
- [3] JANÍK, L - DOUCEK, A - DLOUHÝ,P. Implementační akční plán rozvoje vodíkového hospodářství v ČR, Husinec – Řež 130, 2011
- [4] TUČEK, V. - Dvořáková, L. – Hanzal, J. Vodík, Česká asociace technických plynů, Praha, 2004
- [5] BATERIE METAL-AIR. [Http://oenergetice.cz/](http://oenergetice.cz/) [online]. [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/metal-air-kov-vzduchova-baterie/>
- [6] SODÍKOVÁ BATERIE. [Http://oenergetice.cz/](http://oenergetice.cz/) [online]. [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/sodikove-baterie-konstrukce-princip-cinnosti-a-aplikace/>
- [7] REDOX-FLOW BATERIE. [Http://www.ekobydleni.eu/](http://www.ekobydleni.eu/) [online]. [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/energie/redox-flow-baterie-nova-generace-akumulatoru>
- [8] AKUMULACE TEPLA. [Http://www.tzb-info.cz/](http://www.tzb-info.cz/)[online]. [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1482-akumulace-tepelne-energie-fyzikalni-principy>
- [9] BAČA, Petr, Palivové články a vodíkové hospodářství jako možný způsob akumulace elektrické energie z OZE, VUT v Brně
- [10] HYDROGENICS, shift power, energize your world. Hydrogenics. [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.hydrogenics.com/>
- [11] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD ERU. Energetický regulační věštník ERU. [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/-/energeticky-regulacni-vestnik-1-2016>
- [12] U. F. VOGT. Membranes Development for Alkaline Water Electrolysis. [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: http://www.elygrid.com/wp-content/uploads/2015/09/EFCF-2013_A0704_Gorbar-Vogt_presentation-final.pdf
- [13] LAKVA, Petr. VÝROBA VODÍKU Z OBNOVITELNÉHO ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE. Brno, 2013. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. JAROSLAV JÍCHA, CSc.

[14] ELEKTROLÝZA. [online]. 5. 5. 2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKewiDnfyZhcTMAhWLORQKHXPAdUQFggiMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.gymvod.cz%2Fsoubor%2F937&usg=AFQjCNECyzw7dMPtPqNn6uo_EBnQO0zIbg&sig2=97xe6ZesrwwQoSxjb_eD5w&cad=rja

[15] WATER ELECTROLYSIS, renewable energy systems [online]. 2013. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
www.fuelcelltoday.com

[16] VÁGNER, Ivo. Možnosti využití stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie. Plzeň, 2012. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Ing. Jan Beneš.

[17] DRUCKELEKTROLYSE. ELB Elektrolysetechnik GmbH. [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z:
http://elektrolyse.de/wordpress/?page_id=38&lang=de

[18] KLADIVA, Jakub. Problematika instalace a provozu střešní fotovoltaické elektrárny na bytovém domě. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Miroslav Vítek, CSc.

[19] KOČÍ-VALÁŠEK. Transformátory. [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z:
<http://transformatory.cz>

[20] SIEMENS: Řízený usměrňovač SINAMICS DC Master . [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z:
http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=4254a3bf0f&ctxp=doc_prospekty

[21] SALAVEC Jiří, O energetice. [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z:
<http://oenergetice.cz/elektrina/trh-s-elektinou/trh-s-elektinou/>

[22] CHOCHOLKA Karol. Kompresory – důchadla – ventilátory. Bratislava: Slovenskej vydavateľstvo technickej literatúry, 1961

[23] GOOGLE EARTH. Google. [online]. 16. 5. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z:
<http://www.google.cz/intl/cs/earth/explore/products/desktop.html>

[24] TZB info. [online]. 16. 5. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z:
<http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektřiny>

[25] JURMAN Jiří, Pneu kvalitně. [online]. 16. 5. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z:
<http://www.pneu-kvalitne.cz/novinky/klasicke-olovene-autobaterie-varta-technologie-agm>

[26] TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.

9. Seznam použitých zkratek a symbolů

Značka	Název - význam zkratky, symbolu	Jednotka
OZE	Obnovitelný zdroj energie	
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna	
SNG	Synthetic natural gas <i>Syntetický zemní plyn</i>	
NiMH	Nikl metal hydrid	
NiCd	Nikl kadmium	
NaS	Sodíkovo – sírová baterie	
NaNiCl	Sodík-Nikl-Chlor baterie	
Li-ion	Lithium iont	
Li-pol	Lithium polymer	
KOH	Hydroxid draselný	
PEM	Polymer Electrolyte membrane	
E_p	Potenciální energie	[J]
m	Hmotnost	[kg]
g	Gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
Δh	Výškový rozdíl	[m]
E_k	Kinetická energie	[J]
J	moment setrvačnosti	[kg·m ²]
ω	Úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
UPS	Uninterruptible Power Supply <i>Nepřerušovaný zdroj napájení</i>	
CA	Násobek vybíjecího proudu baterie	
E_c	Energie uložená v kondenzátoru	[J]
C	Kapacita kondenzátoru	[F]
U	Elektrické napětí	[V]
E_L	Indukovaná energie v mag. poli cívky	[J]
L	Indukčnost	[H]
I	Elektrický proud	[A]
H ₂ O	Voda	
H ₂	Vodík	

Značka	Název - význam zkratky, symbolu	Jednotka
O ₂	Kyslík	
OH	Hydroxid	
e ⁻	Elektron	
Al ₂ O ₃	Baoxit	
Al	Hliník	
S	Entropie	[kJ/mol·K]
h	Entalpie	[kJ/mol]
U _R	Reverzibilní napětí	[V]
T	Termodynamická teplota	[K]
U _T	Termoneutrální napětí	[V]
n	Množství přenesených elektronů n=2 [-]	
F	Faradayova konstanta	[C/mol]
$\eta_{A,K}$	Přepětí na anodě, katodě [V]	[V]
R	Elektrický odpor	[Ω]
I	Elektrický proud	[A]
U	Elektrické napětí	[V]
P	Elektrický výkon	[W]
E	Elektrická energie	[Wh]
Bar	Jednotka tlaku	
CD	Compact Disc, <i>kompaktní disk</i>	
ČEZ	Distributor energie	
E. ON	Distributor energie	
PRE	Distributor energie	
OZE	Obnovitelné zdroje energie	
OTE	Operátor trhu s elektřinou	
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla	
V _s	Objem	[m ³]
p _s	Tlak	[kg/cm ²]
not	Otáčky motoru	[ot/min]
η_m	Účinnost pohonu	[%]
V	Stlačené množství	[m ³]
p ₁	Vstupní tlak kompresoru 30 bar	[bar]

Značka	Název - význam zkratky, symbolu	Jednotka
p_2	Výstupní tlak kompresoru 200 bar	[bar]
n	Počet stupňů kompresoru	[-]
κ	Počet stupňů volnosti pro H ₂ a O ₂	[-]
e	Nestlačitelný objem	[-]
S	Zdánlivý výkon	[VA]
TP	Prostá doba návratnosti	[roky]
TD	Diskontovaná doba návratnosti	[roky]
NPV	Net present value <i>Čistá současná hodnota</i>	[Kč]
IRR	Internal rate of return <i>Vnitřní výnosové procento</i>	[%]
T	Doba životnosti	[roky]
ROI	Return on investment Návratnost investice	[-]
R	Diskont	[%]
IN	Investice	[Kč]
CF	Cash Flow <i>Peněžní tok</i>	[Kč]
EBITDA	Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization <i>Zisk před odečtením úroků, daní, odpisů a amortizace.</i>	[Kč]
EBT	Earnings before Taxes <i>Zisk před zdaněním</i>	[Kč]
EAT	Earnings after Taxes, <i>Zisk po zdanění</i>	[Kč]

10. Seznam obrázků

Obr 1.	Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně [23]	13
Obr 2.	Akumulace energie ve stlačeném vzduchu [24].....	15
Obr 3.	Řez olověnou baterií [25]	17
Obr 4.	Schéma NaS článku [16].....	18
Obr 5.	Graf energetické hustoty v závislosti na výkonové hustotě.....	23
Obr 6.	Výměna energií při elektrolýze H ₂ O [12].....	27
Obr 7.	Schéma alkalického článku [13]	31
Obr 8.	Průběh PEM elektrolýzy, energie z FV panelu [13]	32
Obr 9.	Elektrolýza za vysoké teploty [13].....	33
Obr 10.	Vodíkové hospodářství [15]	34
Obr 11.	Blokové schéma technickoekonomického modelu.....	35
Obr 12.	Příklad týdenního diagramu zatížení.....	38
Obr 13.	Roční spotřeba elektrické energie	38
Obr 14.	Graf spotřeby a využití elektrolyzérů	39
Obr 15.	Spotřeba elektrické energie v elektrolyzáru.....	41
Obr 16.	Blokové schéma zařízení	42
Obr 17.	Alkalický tlakový elektrolyzátor [17]	43
Obr 18.	Nízkoztrátový olejový transformátor [19].....	46
Obr 19.	SINAMICS DC Master [20]	46
Obr 20.	Průběh peněžního toku.....	51
Obr 21.	Graf závislosti diskontu na NPV	52
Obr 22.	Graf závislosti diskontu na NPV pro různé hodnoty investic	52
Obr 23.	Graf závislosti ceny elektrické energie na NPV	53
Obr 24.	Graf závislosti ceny elektrické energie na ročním peněžním toku.....	53
Obr 25.	Schéma kogenerační jednotky a elektrolyzáru	55

11. Seznam tabulek

Tab. 1.	Tabulka pro entalpii a entropii ideálních plynů [12].....	27
Tab. 2.	Přehled elektrolyzérů a jejich vlastnosti [12]	30
Tab. 3.	Cena za rezervovanou kapacitu provozovatele distribuční soustavy.....	37
Tab. 4.	Cenové položky elektrické energie	37
Tab. 5.	Investiční náklady elektrolyzéro	49
Tab. 6.	Tabulka vstupů a výstupů z excelu <i>Ekonomika modelu</i>	50
Tab. 7.	Tabulka ročních zisků	51
Tab. 8.	Ekonomické vyhodnocení investice	51

12. Seznam příloh

Příloha 1.	Program v prostředí Wolfram Mathematica 1/2	65
Příloha 2.	Program v prostředí Wolfram Mathematica 2/2	66
Příloha 3.	Porovnání jednotlivých typů akumulací [1]	12-67
Příloha 4.	Tabulka příjmů, výdajů a peněžních toků	12-68

Program elektrolýza

Načítání vstupních hodnot z excelu

```

SetDirectory[NotebookDirectory[]];
loadDiagram = Import["data.xlsx"][[1]];

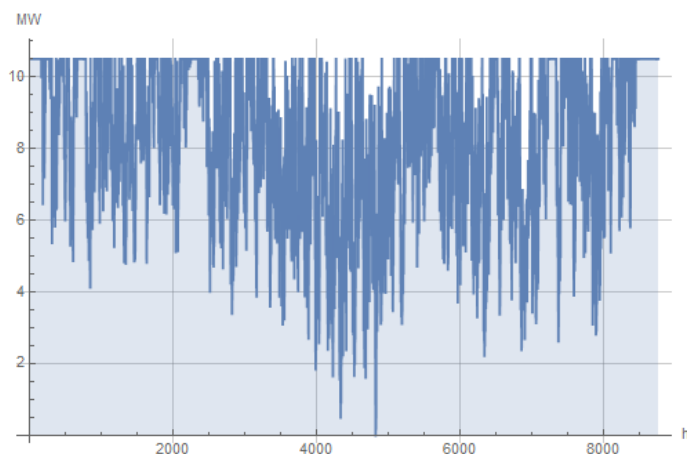
vykony = (Last /@ loadDiagram);
uroven = Max[vykony]; (*max hodnota v dennim diagramu v MWh*)
vyroba = ConstantArray[0, Length[vykony]]; (*nove pole*)
maximalniVyroba = 10.5; (*maximalni vyroba elektrolyzeru, kazdy elektrolyzer 3,5 MW (3*3,5MW)*)

(*Vytupem for cyklu je diagram vyroby elektrolyzeru*)
For[i = 1, i < 8760, i++, aktualniVyroba = uroven - vykony[[i]];
  If[aktualniVyroba >= maximalniVyroba, vyroba[[i]] = maximalniVyroba, vyroba[[i]] = aktualniVyroba
  ]
]

ListStepPlot[vykony];
ListStepPlot[vyroba, Filling -> Axis, AxesLabel -> {"h", "MW"}, GridLines -> Automatic]
vyrobaCelkem = Total[vyroba];

cenaMWh = 1300; (*naklady na elektrinu v CZK za 1 MWh*)
cenaH2 = 12; (*vykupni cena vodiku v CZK za 1Nm3 H2*)
cenaO2 = 6; (*vykupni cena kysliku v CZK za 1Nm3 O2*)
cenaH2O = 0.1; (*cena H2O v CZK za 1 liter*)
spotrebaH2O = 0.85; (* minimum je 0,8 l + ztraty; spotreba H2O na vyrobu 1Nm3 H2*)
vyrobaH2 = 4.6; (*spotreba kWh na vyrobu 1Nm3 H2*)
mnozstviH2 = vyrobaCelkem / (vyrobaH2 * 0.001); (*vyrobene mnozstvi H2 v Nm3*)
mnozstviO2 = mnozstviH2 / 2; (*vyrobene mnozstvi O2 v Nm3*)
vydajeElektrina = vyrobaCelkem * cenaMWh; (*celkove vydaje za elektrinu na elektrolyzu*)
vydajeH2O = mnozstviH2 * spotrebaH2O * cenaH2O; (*vydaje za destilovanou vodu*)
prijemVodik = mnozstviH2 * cenaH2; (*prijemy z vyrobeneho vodiku*)
prijemKyslik = mnozstviO2 * cenaO2; (*prijemy z vyrobeneho kysliku*)
vodik1MWh = mnozstviH2 / vyrobaCelkem;
a = vodik1MWh * maximalniVyroba;

```



Náklady na stlačení a přepravu H₂, O₂

```

bar = 105;
p1 = 30 bar; (*vystupni tlak z elektrolyzeru 30 baru*)
κ = 1.4; (*pocet stupnu volnosti pro H2 a O2*)
cenaZaKWh = 5;
eps = 0.1;
objem = vodik1MWh * 1.5 / 12; (*mnozství vodiku a kysliku na 1MWh podeleny normovany mnozstvím*)
n = 4; (*pocet stupnu kompresoru*)

kamionCena = 30 000; (*cena prevozu 30 Kč/km vzdálenost (1000 Km)*)
objemPoStlaceníP1 =  $\frac{\text{objem} * \text{bar}}{p1}$ ; (*objem po stlacení*)
prevezenyObjemSkut = 20; (*kamion uveze 20m3*)

Cena[p2_, v1_] :=  $\frac{\frac{p1 * \frac{v1 + \text{bar}}{p1}}{\kappa - 1} * \left( \left( \frac{p2}{p1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right)}{3.6 * 10^6 * 0.5 * \left( 1 - \text{eps} * \left( \left( \frac{p2}{p1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \right)} * \text{cenaZaKWh} + \frac{\text{kamionCena}}{\text{prevezenyObjemSkut} * \frac{p2}{1 \text{ bar}}} * v1$  (*cena stlacení + cena prevozu*)

vydajeDaS = Cena[200 bar, objem]; (*vydaje na stlacení plynu na 200 baru a prevoz plynu, vystupem je cena za 1 MWh*)

```

```

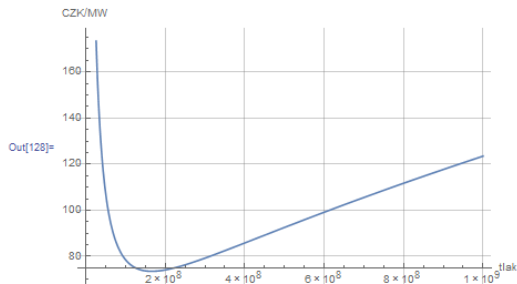
Plot[Cena[p2, objem], {p2, 12 bar, 10 000 bar}, AxesLabel -> {"tlak", "CZK/MW"}, GridLines -> Automatic]

```

```

p2 /. FindMinimum[Cena[p2, objem], {p2, 1000}][[2]]
bar

```



```

cashflow = prijmyKyslik + prijmyVodik - vydajeElektrina - vydajeH2O - vydajeDaS + vyrobaCelkem;

```

```

Print ["Množství vyrobeného H2: ", mnozstvíH2, " Nm3."]
Print ["Množství vyrobeného O2: ", mnozstvíO2, " Nm3."]
Print ["Cena stlačení a dopravy je: ", vydajeDaS, " Kč/MWh."]
Print ["Roční příjmy z prodeje H2 a O2 jsou: ", cashflow / 1000 000, " mil. Kč."]
Print ["Roční spotřeba elektrické energie v elektrolyzáru je: ", vyrobaCelkem / 1000, " GWh."]

```

```

Množství vyrobeného H2: 1.56221 x 107 Nm3.
Množství vyrobeného O2: 7.81103 x 106 Nm3.
Cena stlačení a dopravy je: 218.259 Kč/MWh.
Roční příjmy z prodeje H2 a O2 jsou: 123.899 mil. Kč.
Roční spotřeba elektrické energie v elektrolyzáru je: 71.8615 GWh.

```

Příloha 3. Porovnání jednotlivých typů akumulací [1]

Technologie	Nominální napětí [V]	Kapacita článku [Ah]	Doba odezvy	Energetická hustota [Wh/kg]	Energetická hustota [Wh/l]	Výkonová hustota [W/l]	Čas vybití	Energetická účinnost [%]	Doba životnosti [roky]	Počet cyklů [-]
<i>Přečerpávací vodní elektrárna</i>	-	-	minuty	2	2	0,2	hodiny	80	50	15·10 ³
<i>Stlačený vzduch</i>	-	-	minuty	-	6	0,6	hodiny	75	25	10 ⁴
<i>Setrvačnick</i>	-	1,7 MW	< sekundy	30	80	5 000	sekundy	90	20	10 ⁷
<i>Olovo</i>	2	4 000	< sekundy	45	80	700	hodiny	90	15	1 500
<i>NiCd</i>	1,2	25	< sekundy	45	110	700	hodiny	80	10	800
<i>NiMH</i>	1,2	110	< sekundy	80	200	3 000	hodiny	75	10	1 200
<i>Li-ion</i>	3,7	100	< sekundy	200	400	10 000	hodiny	98	15	10 ⁴
<i>Zinek-vzduch</i>	1	100	< sekundy	200	200	100	hodiny	70	1	1 000
<i>NaS</i>	2,1	30	< sekundy	250	300	160	hodiny	85	15	4 500
<i>NaNiCl</i>	2,6	38	< sekundy	200	200	270	hodiny	90	15	1 000
<i>Redoxní flow baterie</i>	1,6	-	sekundy	50	70	2	hodiny	75	20	10 ⁴
<i>Hybridní flow baterie</i>	1,8	-	sekundy	85	65	25	hodiny	75	10	3 650
<i>Vodík</i>	-	-	sek. - minuta	333 330	600	20	hodiny-týdny	44	30	10 ⁴
<i>Syntetický zemní plyn</i>	-	-	minuty	10 000	1 800	2	hodiny-týdny	38	30	10 ⁴
<i>Superkapacitor</i>	2,5	1 500 F	< sekundy	15	20	120 000	sekundy	98	12	10 ⁵
<i>Supravodivá cívka</i>	-	-	< sekundy	-	6	2 600	sekundy	80	-	-

Příloha 4. Tabulka příjmů, výdajů a peněžních toků

Rok	Odpisy	Základ daně	Daň ze zisku	Peněžní příjem	Peněžní výdaj	Peněžní tok CF	Diskontovaný CF [Kč]	Kumulovaný DCF
0	- Kč	- Kč	- Kč	- Kč	334 425 000,00 Kč	- 334 425 000,00 Kč	- 334 425 000,00 Kč	- 334 425 000,00 Kč
1	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	61 542 131,02 Kč	- 272 882 868,98 Kč
2	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	59 175 125,98 Kč	- 213 707 743,00 Kč
3	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	56 899 159,60 Kč	- 156 808 583,40 Kč
4	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	54 710 730,38 Kč	- 102 097 853,02 Kč
5	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	52 606 471,52 Kč	- 49 491 381,50 Kč
6	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	50 583 145,69 Kč	1 091 764,20 Kč
7	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	48 637 640,09 Kč	49 729 404,29 Kč
8	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	46 766 961,63 Kč	96 496 365,91 Kč
9	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	44 968 232,33 Kč	141 464 598,25 Kč
10	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	43 238 684,93 Kč	184 703 283,18 Kč
11	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	41 575 658,59 Kč	226 278 941,77 Kč
12	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	39 976 594,80 Kč	266 255 536,57 Kč
13	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	38 439 033,46 Kč	304 694 570,03 Kč
14	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	36 960 609,10 Kč	341 655 179,13 Kč
15	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	35 539 047,21 Kč	377 194 226,34 Kč
16	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	34 172 160,78 Kč	411 366 387,11 Kč
17	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	32 857 846,90 Kč	444 224 234,02 Kč
18	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	31 594 083,56 Kč	475 818 317,57 Kč
19	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	30 378 926,50 Kč	506 197 244,07 Kč
20	16 721 250,00 Kč	55 626 548,54 Kč	8 343 982,28 Kč	72 711 355,32 Kč	363 556,78 Kč	64 003 816,26 Kč	29 210 506,25 Kč	535 407 750,32 Kč

Tato tabulka je umístěna na CD v souboru *Ekonomika modelu*.