

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Technologie dalšího využití a akumulace elektrické energie  
pro optimalizaci výroby a dodávky elektřiny na teplárně**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch LEGÁT**  
Osobní číslo: **E14N0066P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Technologie dalšího využití a akumulace elektrické energie pro optimalizaci výroby a dodávky elektřiny na teplárně**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte teoretický úvod zaměřený na energetickou bilanci teplárenského provozu.
2. Zpracujte přehled technologií pro možné další využití a akumulaci elektrické energie v teplárně.
3. Proveďte detailnější technickou i ekonomickou analýzu zavedení vybraných technologií do provozu teplárny.
4. Vyhodnoťte technické i ekonomické parametry vybraných technologií.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


- 1. Elektronické informační zdroje a podklady dle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**  
Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na akumulaci elektrické energie a možnosti jejího využití v teplárenském provozu ELÚ III. Poskytuje přehled všech dostupných metod, popisuje a srovnává jednotlivé systémy. Dále se zabývá analýzou trhu se silovou elektřinou a hodnotí současnou situaci v přenosové soustavě. Na základě těchto hodnocení jsou pak v praktické části práce provedeny návrhy vybraných technologií pro možnost jejich aplikace v provozu teplárny. Všechny varianty návrhů jsou posléze hodnoceny po ekonomické i technické stránce a navzájem porovnány. Cílem práce je zpracovat přehled dostupných metod pro akumulaci elektrické energie a posoudit výhodnost nasazení vybraných systémů v teplárenském provozu.

## **Klíčová slova**

Akumulace elektrické energie, akumulátor, přenosová soustava, elektřina, systémová odchylka, protiodchylka, elektrokotel

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on accumulation of electric energy and the possibilities of its application in the heating plant ELÚ III. It gives an overview of available methods moreover it shows a description and comparison of the systems. It also analyses the market of the power electricity and evaluates the current situation in a transmission system. In connection with this analysis there are stated proposals of the chosen technologies for a usage in the heating plant. Every proposal is evaluated in both economic and technical point of view and all of them are compared each other. The aim of the thesis is to make an overview of available methods for accumulation of electric energy and to determine if the chosen technologies are suitable for a usage in the heating plant.

## **Key words**

Accumulation of electric energy, accumulator, transmission system, electricity, electricity imbalances, counter imbalances, electric boiler

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 12.5.2016

Vojtěch Legát

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za ochotu a cenné rady při řešení práce. Dále děkuji společnosti Plzeňská energetika, a.s. za poskytnutí technické dokumentace a potřebných podkladů. Rovněž děkuji Mgr. Jiřímu Legátovi za jazykovou korekturu textu. Na závěr bych rád poděkoval své rodině za podporu a přízeň během celého studia.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>1 KOGENERACE A SILOVÁ ELEKTRINA .....</b>	<b>15</b>
1.1 VÝHODY KVET .....	15
1.2 KOGENERACE V ČR.....	15
1.3 CENA SILOVÉ ELEKTRINY A JEJÍ ODCHYLKY V SÍTI.....	16
<b>2 AKUMULACE ENERGIE.....</b>	<b>18</b>
2.1 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ .....	18
2.2 AKUMULÁTORY .....	20
2.2.1 Pevné akumulátory.....	21
2.2.2 Průtočné akumulátory.....	24
2.3 SETRVAČNÍKY .....	28
2.3.1 Konstrukce.....	28
2.3.2 Využití.....	30
2.4 AKUMULACE DO STLAČENÉHO VZDUCHU (CAES).....	32
2.4.1 Princip funkce .....	32
2.4.2 Diabatická metoda .....	33
2.4.3 Adiabatická metoda.....	34
2.4.4 AA-CAES.....	34
2.5 AKUMULACE DO VODÍKU .....	36
2.5.1 Princip činnosti.....	36
2.5.2 Využití.....	37
2.6 SUPERKAPACITORY .....	38
2.6.1 Princip funkce .....	38
2.6.2 Použití .....	40
2.7 SUPRAVODIVÉ CÍVKY (SMES) .....	41
2.7.1 Princip funkce .....	41
2.7.2 Použití .....	42
2.8 SROVNÁNÍ SYSTÉMŮ .....	42
2.9 AKUMULACE DO ROZTAVENÝCH SOLÍ .....	43
<b>3 DALŠÍ VYUŽITÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE.....</b>	<b>46</b>
3.1 PLAZMATRON.....	46
3.1.1 Princip funkce .....	46
3.1.2 Použití .....	47
3.2 ELEKTROKOTEL.....	49
3.2.1 Elektroodový ohřev .....	49
3.2.2 Použití .....	50
<b>4 CHARAKTERISTIKA TEPLÁRNY ELÚ III .....</b>	<b>52</b>
4.1 PARNÍ KOTEL K3 .....	52
4.2 OKRUH PÁRA-VODA BLOKU K3-TG9 .....	53
4.3 VLASTNÍ SPOTŘEBA TEPLÁRNY .....	54
<b>5 ANALÝZA VYUŽITELNOSTI VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ DO PROVOZU TEPLÁRNY ....</b>	<b>56</b>



5.1	VYUŽITELNOST TECHNOLOGIÍ Z HLEDISKA TRHU SE SILOVOU ELEKTRINOU - ANALÝZA DAT ROKU 2015 .....	56
5.2	METODIKA EKONOMICKÉHO HODNOCENÍ SYSTÉMŮ .....	61
5.3	INTEGRACE TECHNOLOGIÍ DO PROVOZU TEPLÁRNY .....	64
5.4	NA-S AKUMULÁTOR .....	66
5.4.1	Charakteristika systému .....	67
5.4.2	Praktické řešení návrhu .....	67
5.4.3	Ekonomické zhodnocení .....	69
5.5	VRB AKUMULÁTOR.....	71
5.5.1	Charakteristika systému.....	72
5.5.2	Praktické řešení návrhu .....	73
5.5.3	Ekonomické zhodnocení .....	74
5.6	SUPERKAPACITORY .....	76
5.6.1	Charakteristika systému .....	77
5.6.2	Praktické řešení návrhu .....	77
5.6.3	Ekonomické zhodnocení .....	78
5.7	VYUŽITÍ ELEKTROKOTLE .....	80
5.7.1	Princip odběru tepla z teplárny ELÚ III .....	80
5.7.2	Charakteristika systému .....	81
5.7.3	Návrh elektrokotle pro vytápění .....	82
5.7.4	Využití pro ohřev napájecí vody.....	87
<b>6</b>	<b>POROVNÁNÍ NÁVRHŮ.....</b>	<b>90</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>92</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>94</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>97</b>

## Seznam symbolů a zkratek

ČR	Česká republika
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
$P_e$	elektrický výkon [ $W_e$ ]
$P_t$	tepelný výkon [ $W_t$ ]
W	energie [Wh]
ERÚ	Energetický regulační úřad
OTE	OTE, a.s. - operátor trhu s elektřinou
PS	přenosová soustava
U	napětí [V]
$\vartheta$	teplota [ $^{\circ}C$ ]
t	čas [s]
T	termodynamická teplota [K]
VRB	vanadová redoxní baterie
PEM	polopropustná membrána
OZE	obnovitelné zdroje energie
$\omega$	úhlová rychlost (RPM)
UPS	Uninterruptible Power Supply - zdroj nepřerušovaného napájení
$E_k$	kinetická energie [J]
$\vec{I}$	moment setrvačnosti [ $kg \cdot m^2$ ]
m	hmotnost [kg]
r	délka [m]
HTS	High Temperature Superconductor - vysokoteplotní supravodič
PM	permanentní magnet
CAES	Compressed Air Energy Storage - akumulace do stlačeného vzduchu

p	tlak [Pa]
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
AA-CAES	Advanced-adiabatic Compressed Air Energy Storage - moderní metoda akumulace do stlačeného vzduchu
C	kapacita [F]
EDLC	Electric double-layer capacitors - dvojvrstvé superkapacitory
CNT	uhlíkové nanotrubičky
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage - supravodivá cívka
PCM	Phase Changing Materials - materiály uchovávající energii na bázi absorpce latentního tepla
f	frekvence [Hz]
J	proudová hustota [A/m <sup>2</sup> ]
PE	Plzeňská energetika, a.s.
K	kotel
TG	turbogenerátor
VT	vysokotlaký díl turbíny
NT	nízkotlaký díl turbíny
NTO	nízkotlaký ohřívák
STO	středotlaký ohřívák
NT-NN	nízkotlaká napájecí nádrž
VT-NN	vysokotlaká napájecí nádrž
VTR	vysokotlaký rozdělovač
R	parní rozdělovač
W	přípojnice
MZ	minutová záloha
PLC	Programmable Logic controller - programovatelný logický automat
η	účinnost [%]

S	obsah [m <sup>2</sup> ]
ZO	základní ohřívák
ŠO	špičkový ohřívák
TV	tepelný výměník
MZ	minutová záloha
Q	teplo [J]
c <sub>p</sub>	měrná tepelná kapacita [J/kg·K]
M	hmotnostní průtok [kg/h]
Q <sub>t</sub>	výhřevnost [J/kg]
CF	cashflow [Kč]
IN	investiční náklady [Kč]
T <sub>s</sub>	prostá doba návratnosti [roky]
T <sub>ž</sub>	doba životnosti

## Úvod

Akumulace elektrické energie v současné době nabývá na stále větším významu. Poptávka po energiích všeho druhu se neustále zvyšuje a v budoucnu bude velmi obtížné pokrýt obrovskou světovou spotřebu energie. Protože lidstvo těžko sníží své energetické nároky, bude důležité najít nové zdroje energie anebo vylepšit ty stávající. A právě v tom má velký potenciál akumulace elektřiny. Dnes čelíme výrazným nepredikovatelným výkyvům elektrické energie v přenosové soustavě zejména v důsledku rostoucího podílu obnovitelných zdrojů energie. Kdybychom byli schopni přebytečné množství elektřiny ukládat a v době nedostatku ho zpět uvolňovat a využívat, situace by byla daleko příznivější. A právě touto problematikou se zabývám v této diplomové práci. Jejím smyslem je posoudit využitelnost akumulace elektřiny v provozu teplárny ELÚ III (Plzeňská energetika, a.s.).

Hlavním důvodem pro zkoumání systémů akumulace energie je optimalizace provozu na teplárně. Teplárna dodává do sítě určité základní množství elektřiny dle obchodního kontraktu. Při využití vhodného akumulačního zařízení by dispečer na velínu teplárny mohl reagovat na odchylky v PS a tak spekulovat s elektřinou. Protože chování systému nelze předpovídat s jistotou, je tato spekulace do určité míry náhodná, ale v provozu teplárny by mohla být přínosná.

Na úvod stručně popisuji teplárenství, jeho bilanci v ČR a charakterizuji současnou situaci v přenosové síti. Dále provádím rozbor všech dostupných systémů, jichž je možné použít k akumulaci elektrické energie nebo k jejímu jinému využití. Každou technologii nejprve obecně popisuji a následně uvádím její typické parametry. Snažil jsem se o objektivní přehled všech možných systémů, neopomenul jsem ani ty, které v podmínkách České republiky zatím nenalézají uplatnění. Tato první část práce je poměrně rozsáhlá, ale pro kompletní rozbor nebylo možné ji více zkrátit.

V další části stručně popisuji teplárenský provoz ELÚ III, kterého se celá práce týká a v němž by měly být jednotlivé systémy použity. Detailněji se věnuji jednomu z bloků teplárny. Na něm později uvádím příklady použití vybraných technologií. Dále analyzuji trh se silovou elektřinou, který je rozhodující pro návrhy systémů, a popisuji způsob jejich ekonomického hodnocení.

V poslední části práce vybírám čtyři technologie, které jsou dle mého názoru nejpoužitelnější v daném teplárenském provozu. Navrhuji jejich technické řešení a posuzuji jejich ekonomický přínos. Těmito technologiemi jsou akumulátory Na-S a VRB, superkapacitory a elektrokotel. V případě elektrokotle je mírně odlišné ekonomické hodnocení, neboť se jedná o odlišný způsob využití elektřiny, a není proto možné hodnotit ho zcela stejným způsobem jako ostatní systémy. Tato část práce je nejdůležitější a měla by poskytnout objektivní hodnocení využitelnosti akumulace elektrické energie v provozu teplárny.

## 1 Kogenerace a silová elektřina

Kogenerace neboli kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET), je způsob výroby elektřiny za současného využití tepla, které by bylo jinak odváděno do okolí ve formě ztrát. Klasický způsob výroby elektrické energie v tepelných zdrojích neumožňuje účinnost energetické přeměny o mnoho větší než 40 %. Teplo, které se nevyužije na výrobu elektřiny, je odváděno z kondenzátoru do okolí prostřednictvím chladicích věží či průtočného chlazení a je nenávratně ztraceno. Tyto ztráty snižují využitelnost energie, dodané do systému prostřednictvím primárního zdroje. KVET tento nedostatek odstraňuje tím, že teplo, které by se v případě klasické výroby elektřiny ztratilo, je použito na ohřev vody a následné vytápění. Účinnost KVET se pak může vyšplhat až k 90 %. [23]

### 1.1 Výhody KVET

Jednoznačně největší předností kogenerace je zmíněná vysoká účinnost. Nejedná se o přímé zvýšení účinnosti samotné výroby elektřiny, ale o zlepšení využití energie obsažené v primárním zdroji (palivu) oproti případu, kdy jsou teplo a elektřina vyráběny odděleně. Zvýšení účinnosti energetické přeměny s sebou nese úsporu paliva a s tím související snížení emisí skleníkových plynů a oxidů dusíku. V konečném důsledku KVET snižuje náklady na výrobu tepla a elektřiny. Jako primární zdroj je možné použít téměř všechna dostupná paliva, jako jsou fosilní a jaderná paliva, biomasa či odpady.

Kogenerační jednotky je možné vyrábět pro široký rozsah výkonů, od jednotek kW<sub>e</sub> až po desítky, někdy stovky MW<sub>e</sub>. Mohou tak zásobovat nejen města či jeho části, ale i průmyslové podniky a bytové domy. To přináší možnost decentralizované výroby elektřiny a tepla, což může snížit ztráty způsobené přenosem a rozvodem. Kromě toho se též zvyšuje bezpečnost dodávky energií v dané lokalitě.

### 1.2 Kogenerace v ČR

KVET je v České republice provozována po několik desetiletí prostřednictvím tepláren. V současnosti pokrývá dle Teplárenského sdružení ČR asi 2/3 dodávek tepla a téměř 14 % netto spotřeby elektřiny. V posledních pěti letech navíc vzrůstá podíl výroby v malých kogeneračních zdrojích do výkonu 5 MW<sub>e</sub>. Právě tyto zdroje jsou využívány pro decentralizovanou výrobu elektřiny a tepla, tj. přímo v místě spotřeby energií.

K rostoucímu využívání těchto zdrojů přispívá skutečnost, že malé zdroje jsou státem podporovány mnohem více než velké zdroje (výkon nad 5 MW<sub>e</sub>). Podpora je realizována formou “zelených bonusů“ a jejich výši stanovuje ERÚ pro každý konkrétní rok. Bonusy sestávají z tzv. základních a doplňkových sazeb. V roce 2015 se základní cena zeleného bonusu pro zdroje do 5 MW<sub>e</sub> pohybovala od 75 do 1 640 Kč/MWh, zatímco pro zdroje nad 5 MW<sub>e</sub> pouze od 45 do 200 Kč/MWh. Z výše uvedeného vyplývá, že v ČR v současné době nabývá na významu decentralizovaná výroba v malých zdrojích, to však nic nemění na dominanci velkých zdrojů – tepláren. [23]

### **1.3 Cena silové elektřiny a její odchylky v síti**

Kromě znalosti dostupných technologií pro akumulaci elektřiny bylo pro účely této práce nutno znát údaje o cenách silové elektřiny, její vývoj na trhu a zejména pak její denní odchylky během roku. Bližší analýza záležitostí spojených s cenami elektřiny a odchylek je provedena v praktické části práce, tato kapitola je omezena na úvod a stručný popis daného problému.

Elektrická energie vyrobená v teplárnách je zobchodována na trhu s elektřinou. Jeho organizací se zabývá Operátor trhu s elektřinou (OTE). Jeho prostřednictvím je možné dodávat silovou elektřinu do přenosové soustavy (PS) na základě krátkodobého trhu (blokový, denní, vnitrodenní a vyrovnávací trh) anebo formou poskytování tzv. protiodchylek. To je energie potřebná na dorovnání odchylky v PS, která vzniká neustále a jejíž hodnota se v čase mění. V ideálním případě by mělo být v rovnováze množství nabízené a poptávané elektřiny, tj. výroba by se měla rovnat spotřebě. To se však reálně neděje, neboť v některých chvílích je množství elektrické energie v PS větší, než je požadováno a vzniká tak přebytek. V jiných okamžicích se situace obrátí a nastává nedostatek. Tím vznikají kladné nebo záporné odchylky elektřiny v síti, které je nutno dorovnat příslušnými protiodchylkami. Protiodchylky tak pomáhají vyrovnat stav v PS a působí proti jejím odchylkám. Je-li tedy odchylka v PS kladná, jedná se o přebytek, který je možné vyrovnat zápornou protiodchylkou stejné velikosti, tedy spotřebou elektřiny. Cena za poskytované protiodchylky je větší než cena elektrické energie na krátkodobých trzích a její hodnota je fixně dána. Oproti tomu cena silové elektřiny na krátkodobém trhu je proměnná a její hodnotu stanovuje OTE na základě nabídky a poptávky. Právě zmíněné



odchyly jsou nejdůležitější pro tuto práci a představují rozhodující faktor při volbě a návrhu zařízení pro akumulaci elektřiny v teplárně. [27]

## 2 Akumulace energie

Akumulace elektrické energie ve velkém množství je problematickou záležitostí. V současné době je známa spousta způsobů, jak akumulaci provádět. Některé způsoby jsou účinné více, některé méně. Jiné jsou již dobře vyzkoušené a hojně využívané, ostatní jsou ve fázi vývoje a výzkumu. Ne všechny se hodí pro účel akumulace elektrické energie v teplárnách a elektrárnách, proto je na následujících stránkách proveden výčet dostupných technologií použitelných zejména v energetice.

Akumulaci elektrické energie je možné provádět na základě několika fyzikálních principů. Tím nejběžnějším a pro účely energetiky zřejmě nejpoužívanějším je elektrochemická forma ukládání energie. Tento princip využívají baterie (akumulátory). Další perspektivní formou akumulace je ukládání energie ve formě tepla, které může být následně dále využito (akumulace do roztavených solí). Další způsoby jsou buď ve fázi vývoje, nebo ještě nedosáhly většího rozšíření v komerčním využití. [5]

*Principy ukládání elektrické energie: [5]*

- Mechanické,
- Elektromagnetické,
- Elektrochemické,
- Chemické,
- Tepelné.

Každý z uvedených fyzikálních principů akumulace má své výhody i nevýhody. Z tohoto důvodu jsou v této práci nejprve popsány všechny dostupné technologie a teprve po jejich následném porovnání a zhodnocení jsou vybrány ty, které se svými vlastnostmi nejvíce hodí pro využití v teplárenském provozu.

### 2.1 Přehled technologií

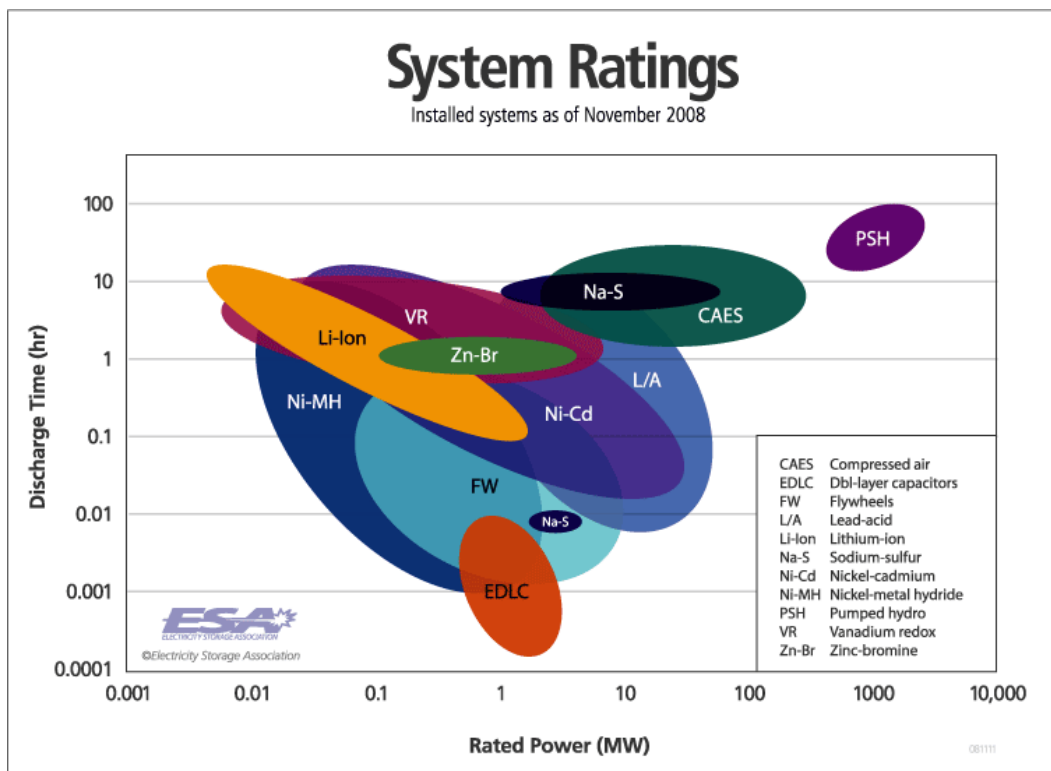
- Akumulátory (Accumulators),
- Superkapacitory (Supercapacitors),
- Akumulace do vodíku (Hydrogen Energy Storage System - HESS),
- Setrvačníky (Flywheel energy storage system - FESS),

- Akumulace do roztavených solí (Molten Salt Energy Storage - MSES),
- Supravodivé cívky (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES),
- Akumulace do stlačeného vzduchu (Compressed Air Energy Storage – CAES).

Všechny zmíněné technologie umožňují akumulaci elektřiny s větší či menší účinností. Rozdíl je v jejich fyzikálních vlastnostech a v neposlední řadě také v ceně. Na tyto systémy je kladena řada požadavků, z nichž ne všechny jsou splnitelné. Ty nejdůležitější z nich jsou: [17]

- Velikost a kapacita, respektive hustota energie (tj. kolik kWh energie může daný systém uchovat na kilogram hmotnosti),
- Maximální výkon, jaký může technologie poskytnout, a jak rychle dokáže uloženou energii uvolnit,
- Doba, po jakou může energii uchovat, a kolik energie se při tom ztratí,
- Účinnost a její případný pokles s časem,
- Počet cyklů, životnost,
- Investiční náklady a cena za akumulovanou kWh,
- Bezpečnost provozu, vliv na životní prostředí.

Výše uvedené požadavky nelze splnit beze zbytku a už vůbec ne všechny současně. Navíc jdou často proti sobě, takže při výběru technologie je nutno vybrat tu vlastnost nebo požadavek, který je v dané situaci nejdůležitější, a podle toho se rozhodnout. Na následujícím obrázku (Obr. 1) je znázorněn rozsah výkonů a doby vybíjení systémů.



Obr. 1: Rozsah parametrů systémů pro akumulaci energie [11]

## 2.2 Akumulátory

Jedná se o články, využívající elektrochemický princip akumulace elektrické energie. V dřívější době byly akumulátory chápány jako zařízení, umožňující opětovné nabití, zatímco jako baterie byly označovány články, které není možné po jejich vybití znovu nabít. Dnes se ovšem tento rozdíl v terminologii příliš nedodrhuje (zejména v zahraničí) a jako baterie jsou často označována zařízení, která jsou v principu akumulátory. Stejně tak je tomu v této práci, v níž termíny akumulátor i baterie označují zařízení pro akumulaci elektrické energie a mohou být zaměňovány.

V akumulátorech je energie uchována v chemické sloučenině. Procházející proud v režimu nabíjení vyvolává vratné chemické změny projevující se buď rozdílným potenciálem na elektrodách, nebo změnou vlastností elektrolytů, případně obojím dohromady. Při vybíjení se pak dá uložená energie čerpat zpět. Na následujících stránkách jsou blíže rozebrány hlavní typy baterií.

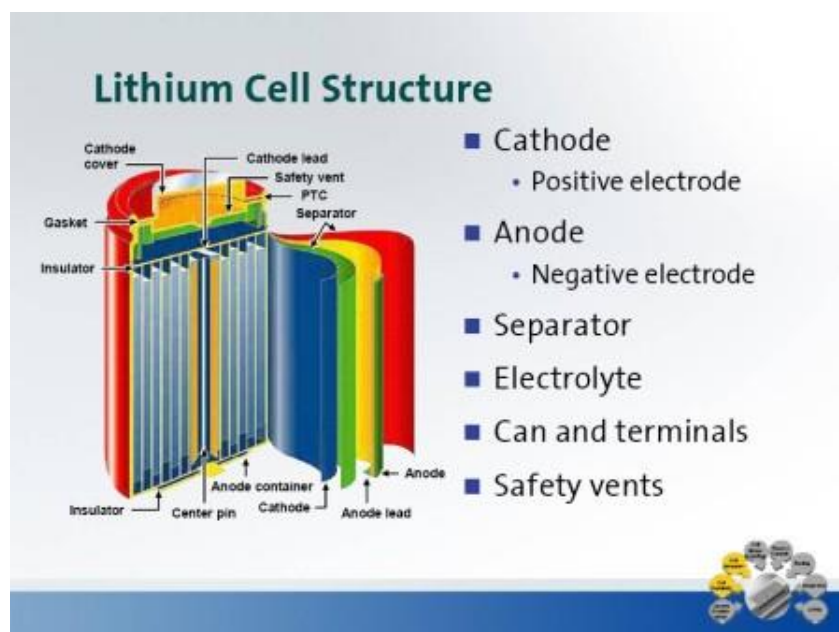
### 2.2.1 Pevné akumulátory

Vynález prvního klasického pevného článku (baterie) je datován do roku 1800 a zasloužil se o něj Alessandro Volta. Od té doby prošly tyto baterie obrovským vývojem a nesčetnými zlepšeními, takže v současné době je dostupná široká škála typů, které mohou sloužit nejrůznějším účelům.

V této práci je proveden výběr těch nejpodstatnějších druhů, kterých je možno nejvíce využít v energetice. Starší typy klasických akumulátorů zde proto nejsou rozebírány, jejich uplatnění v teplárnách a elektrárnách není výhodné a pozornost je tak soustředěna na novější, lépe využitelné druhy. Některé z nich se již v energetice používají, jiné zatím na masivnější komerční využití stále čekají. [25]

#### *Li-Ion akumulátor*

První Li-Ion baterie pro komerční použití byla vyvinuta roku 1991 firmou Sony. Výhodou tohoto druhu článků je jejich velká energetická hustota (někdy i více než 300 Wh/kg). Katoda je tvořena sloučeninami lithia, anoda uhlíkem (speciální druh grafitu) a elektrolyt lithiovými solemi rozpuštěnými v organickém rozpouštědle. Na obrázku (Obr. 2) je vyobrazena lithiová baterie používaná například v počítačích.



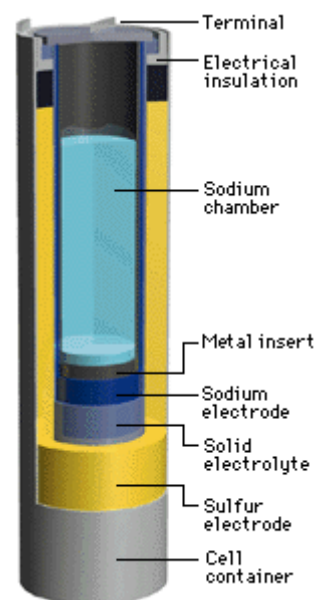
Obr. 2: Schéma Li-ion baterie [18]

Výhodou tohoto typu akumulátorů je skutečnost, že technologie má malý efekt samovybíjení (do 5 %) a vysoké napětí (3,7 V). Fakt, že lithium nepředstavuje žádnou potenciální zátěž pro životní prostředí, je také pozitivní. Výraznou předností baterií je také to, že nemají paměťový efekt. Navzdory těmto výhodám mají ale také několik nedostatků. Baterie vyžaduje ochranný obvod, který limituje velikost napětí článku během nabíjení a při vybíjení brání tomu, aby napětí kleslo pod přípustnou úroveň 2,8 V (pokud by se tak stalo, mohlo by dojít ke zničení baterie). Dalšími nevýhodami systému jsou vysoká cena a nižší životnost. Článek běžně selhává po 3 letech, životnost je možné prodloužit skladováním za nižší teploty, výrobci doporučují 15 °C. Dále se životnost dá prodloužit, pokud se baterie nenabíjí na plných 100 % (optimální je nabíjet baterii na 40 %). V případě velkých kapacit mohou také baterie představovat riziko požáru nebo výbuchu. V současnosti se využívají zejména v elektronice, uvažuje se o jejich instalaci v elektromobilech a ostatních elektrických dopravních prostředcích. Použití v energetice se zatím příliš nerozšířilo. [11], [18], [22]

### Na-S akumulátor

Tento typ akumulátorů (Obr. 3) je pro energetiku výhodnější než Li-ion baterie. Má dobrou energetickou hustotu (srovnatelnou s Li-ion akumulátory) a poměrně vysokou účinnost (až 90 %). Dobře snáší větší počet cyklů a nepodléhá efektu samovybíjení. Anoda je tvořena sodíkem a katoda sírou, což jsou dobře dostupné prvky, které navíc nejsou jedovaté ani toxické, takže nepředstavují potenciální nebezpečí pro životní prostředí.

Jedinou nevýhodou nebo spíše omezením článků je, že elektrody musejí být v kapalně formě, tj. potřebují vysokou pracovní teplotu (mezi 300 °C a 350°C). Ve velkých stacionárních jednotkách, jako jsou teplárny, to ale nepředstavuje zásadní problém. Potřeba vysoké teploty ovšem představuje riziko požáru nebo i výbuchu, neboť kapalný sodík při reakci se vzduchem okamžitě hoří. Při použití těchto baterií je tak nutné zabezpečit, aby nedošlo k úniku sodíku do vzduchu.



Obr. 3: Schéma Na-S baterie [25]

Uvedený typ akumulátorů se v současnosti jeví jako perspektivní. Zejména v Japonsku zaznamenala Na-S technologie poměrně velký rozmach. V součtu je zde v těchto bateriích k dispozici přes 270 MW výkonu po dobu 6 hodin. Největší instalací je jednotka 34 MW v severním Japonsku. Poskytuje výkon pro stabilizaci energie z větrných elektráren. Dále je technologie Na-S baterií využívána ve státech USA, celkem je tam v těchto zařízeních 20 MW instalovaného výkonu a několik dalších instalací je v plánu. [25]

#### *Ni-Cd akumulátor*

Tradiční Ni-Cd článek byl zkonstruován už v roce 1910. Využívá katodu z oxid-hydroxidu niklitého a anodu z kadmia. Elektrolytem je vodný roztok hydroxidu draselného (KOH). Pro účely energetiky ve velkých staničních bateriích se užívá zaplavených elektrod a kapalného elektrolytu. Nevýhodou je v porovnání s předchozími dvěma typy menší energetická hustota (50 Wh/kg), nižší jmenovité napětí (1,2 V) a vyšší efekt samovybití. V neposlední řadě je nedostatkem i skutečnost, že kadmium je jedovatý a toxický prvek, a proto akumulátor představuje potenciální nebezpečí pro životní prostředí. Největší předností je naopak to, že bateriím nevádí hluboké vybití a je tak možné je skladovat za vybitého stavu. Dále mají relativně vysokou životnost a spolehlivost.

Velkou instalaci těchto baterií provedla společnost GVEA v USA. Její projekt BESS (Battery Energy Storage System) může v případě výpadku některých zdrojů poskytnout výkon 27 MW po dobu 15 minut (nebo 40 MW po kratší dobu). Projekt BESS funguje od roku 2003 a představuje největší systém Ni-Cd baterií pro akumulaci elektrické energie na světě. Velkou instalací je také systém Ni-Cd baterií na ostrově Bonairo v Karibiku, který poskytuje výkon 3 MW. [25], [26]

#### *Ni-MH akumulátor*

Vývoj Nikl-Metalhydridových baterií započal kolem roku 1980. Důvodem byla snaha odstranit kadmium z Ni-Cd akumulátorů a nahradit ho vhodnějším prvkem. Praktického využití se články dočkaly až v devadesátých letech minulého století a dnes patří k nejhodněji používaným bateriím.

Katoda Ni-MH akumulátorů má stejnou konstrukci a složení jako předchozí typ, tj. oxid-hydroxid niklitý. Anoda je tvořena kovovou slitinou (M), vytvářející s vodíkem směs

hydridů (H). Na anodě se tak setkává několik různých kovů, jako je nikl, kobalt, mangan, hliník, případně vzácné kovy. Elektrolytem je vodný roztok hydroxidu draselného.

Hlavními výhodami oproti nikl-kadmiovým článkům je ekologická nezávadnost, větší energetická hustota (až 120 Wh/kg), absence paměťového efektu a nižší cena. Omezení představuje nízké jmenovité napětí (1,2 V) a velký efekt samovybíjení při pokojových teplotách. Ten je ale možné omezit snížením provozní teploty.

Ni-MH baterie se používají jako náhrada Ni-Cd baterií, zejména v elektronice. V energetice zatím větší uplatnění nenašly, uvažuje se o jejich nasazení v souvislosti se sítěmi „smart grid“. [20]

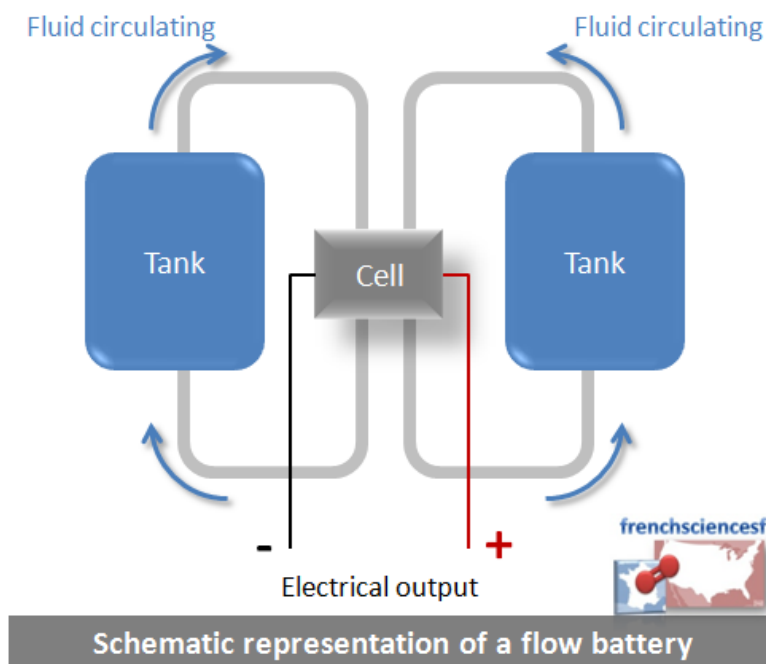
### 2.2.2 Průtočné akumulátory

Tato skupina baterií je označována podle anglického výrazu *flow (plout)* a je principiálně podobná palivovým článkům. Pracuje na odlišném principu než předchozí typy. Zde je elektrolyt obsahující jednu nebo více elektroaktivních látek vháněn mezi elektrody, které jsou od sebe obvykle navzájem odděleny iontoměničovou membránou. Elektrolyt je ve dvou nádržích a je čerpán skrz článek přes elektrody (Obr. 4). Při nabíjení a vybíjení se mění jeho charakter a dochází tak k akumulaci energie. Zásadní rozdíl oproti klasickým pevným akumulátorům je ten, že v průtočných bateriích je energie uložena v roztoku elektrolytu, zatímco v pevných bateriích je uskladněna v materiálu elektrod.

Nesporná výhoda této technologie je, že články je možno úplně vybit bez rizika jejich zničení. Díky zanedbatelnému efektu samovybíjení je možné je využít jako záložní zdroj energie s velice rychlým najetím na plný výkon. Naopak slabou stránkou je membrána, podléhající degradaci a má proto nižší životnost. Její výměna ale není nijak složitou záležitostí. Existují tři základní druhy průtočných baterií: [11], [25]

- Redoxní
- Hybridní
- Bezmembránové





Obr. 4: Schéma flow baterie [25]

#### Vanadový akumulátor

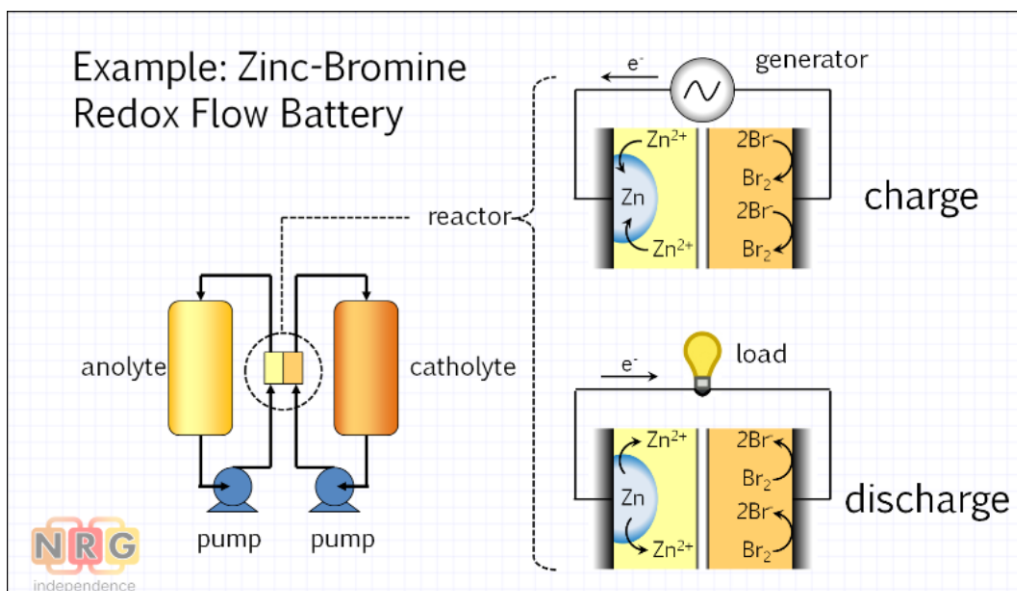
Vanadové baterie (VRB) patří mezi redoxní průtočné články. Poprvé byly použity v Austrálii roku 1986. Jako každá průtočná baterie se skládá ze dvou oddělených nádrží, které obsahují vanadovou sůl a kyselinu sírovou. Odtud jsou elektrolyty čerpány a proudí přes články. Ty obsahují membránu (PEM), na které se jeden z elektrolytů redukuje, druhý oxiduje. Hlavní chemické reakce probíhají na uhlíkových elektrodách, jejichž vlastnosti se během probíhajících dějů nemění, což umožňuje velký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů.

Výhodami této technologie je tedy velká životnost (přes 10 000 cyklů), dobrá účinnost (85 %) a teoreticky nekonečná kapacita. Ta je totiž určena pouze koncentrací a množstvím elektrolytu, takže její omezení představuje jen velikost nádrží. Přes všechny výhody má tento systém i některé nedostatky, z nichž největším je malá energetická hustota (15 - 25 Wh/kg). Další nevýhodou je poměrně úzký rozsah pracovních teplot (10 – 40 °C). Vanadové baterie se v energetice používají zejména pro uskladnění energie z OZE, neboť je možné okamžitě přecházet z režimu nabíjení do režimu vybíjení. To umožňuje dobře vyrovnávat výkyvy výkonu, charakteristické právě pro obnovitelné zdroje. [25], [19]

### Zn-Br akumulátor

První akumulátory tohoto druhu byly vyrobeny firmou Exxon v 70. letech dvacátého století. Spadají do skupiny hybridních průtočných článků. Část energie se totiž během nabíjení akumuluje usazováním zinku v pevném skupenství na záporné elektrodě. Zbytek energie je uložen v elektrolytu. Celková uložená energie tak závisí jak na ploše elektrod (jako u klasických baterií), tak i na velikosti nádrží s elektrolytem (průtočná baterie).

Konstrukčně je baterie provedena jako klasický průtočný akumulátor. Skládá se ze dvou elektrod z uhlíkového kompozitu, oddělených membránou, a dvou nádrží, ve kterých je elektrolyt s rozdílnými vlastnostmi (Obr. 5). V nádrži na straně anody je čistě vodný roztok bromidu zinečnatého a na straně katody jsou v roztoku organické přísady. Během nabíjení je vylučován zinek na anodě v pevné formě a redukuje se. Bróm prochází membránou, oxiduje se a v kapalně formě je odváděn do druhé nádrže. Jelikož má omezenou rozpustnost ve vodě, pomáhají jeho rozpouštění zmíněné organické látky. Při vybíjení dojde k obrácenému procesu, kdy se roztok brómu načerpá zpět do první nádrže, na katodě se redukuje a na anodě reaguje se zinkem. Tím se regeneruje roztok bromidu zinečnatého za vzniku elektrického proudu. [25], [11]



Obr. 5: Schéma Zn-Br baterie [26]

Výraznou výhodou zinkobromových baterií je to, že je možno je bez rizika zcela vybit a že snesou velký počet cyklů. Ze všech průtočných článků mají nejvyšší energetickou hustotu

(asi 50 Wh/kg). Nevýhodou je vysoká cena použitých materiálů a také fakt, že bróm je vysoce toxický prvek. Je také žádoucí, aby baterie měla vlastní aktivní systém chlazení pro udržení stability bromidového roztoku. Chlazení by se mělo uvádět do chodu v případě, že okolní teplota přesahuje 35 °C. Většina výrobců dodává své produkty i s potřebným chladicím systémem. V současnosti jsou baterie testovány pro použití v jednotkách nad 1 MW, ale k rozsáhlejšímu využití zatím nedošlo. [25]

Pro přehlednost jsou v následující tabulce (Tab. 1) shrnuty technické parametry všech uvedených akumulátorů:

Tab. 1: Parametry akumulátorů [25], [19], [10]

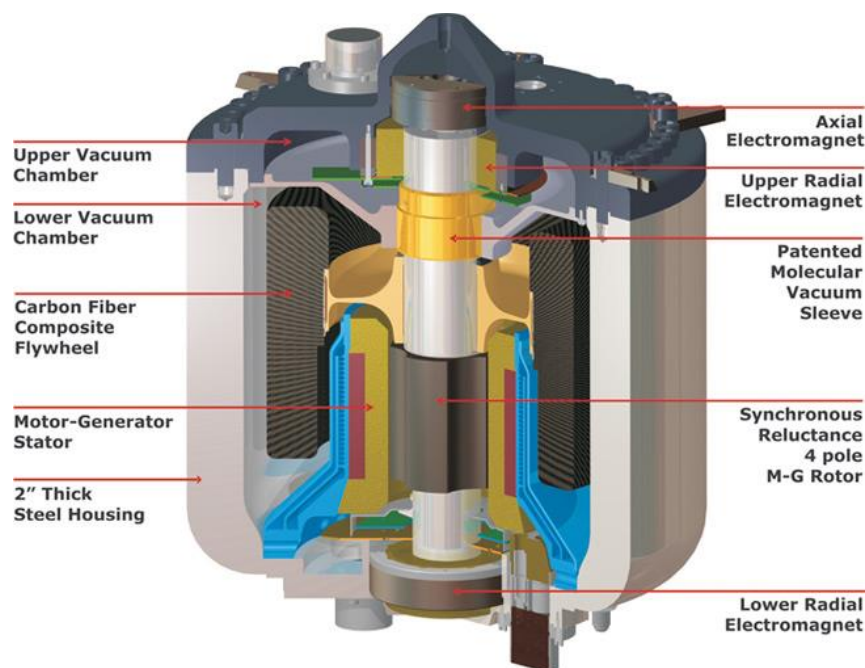
Baterie	Li-Ion	Na-S	Ni-Cd	Ni-MH	VRB	Zn-Br
Energetická hustota [Wh/kg]	100-300	150-240	40-60	60-120	15-25	50
Životnost (počet cyklů)	400-1200	2500-4000	2000	500-2000	>10000	>2000
Samovybití/měsíc	5%	<1%	10%	30%	<1%	<1%
Jmenovité napětí [V]	3,7	2	1,2	1,2	1,2 - 1,6	1,8
Cena [USD/Wh]	0,4	0,35	0,32	0,37	0,47	0,4
Účinnost	80-90%	90%	70-90%	66%	80%	76%

## 2.3 Setrvačníky

Setrvačnick je rotační přístroj, pracující na mechanickém principu akumulace energie. Systém ukládá přivedenou elektrickou energii ve formě energie kinetické. Ta může být v případě potřeby uvolněna a převedena zpět na elektrickou. Setrvačnick je vhodné používat pro stabilizaci sítě, neboť jsou schopny uvolnit energii téměř okamžitě a dodávat ji plynule. Původně se setrvačnick vyráběly z oceli, což ovšem limitovalo počet otáček, a proto se přistoupilo ke kompozitním materiálům, které jsou lehčí a umožňují otáčky až přes 60 000 RPM.

### 2.3.1 Konstrukce

Základem systému je rotor (nejčastěji válcového tvaru) připojený na hřídel. Celá konstrukce je uzavřena ve skříni, uvnitř které je vakuum. To téměř odstraňuje tření rotoru, systém tak může dosáhnout vyšších otáček a má lepší účinnost. Na společné hřídeli s rotorem setrvačnicku je umístěn motor-generátor, který převádí mechanickou energii na elektrickou (nebo opačně). Ten spolupracuje se sítí pomocí výkonové elektroniky (stabilizace frekvence, ...). Na obrázku (Obr. 6) je uvedeno schéma setrvačnicku, používaného pro UPS. [25]



Obr. 6: Schéma setrvačnicku [25]

Kinetická energie uložená v setrvačnicku je úměrná momentu setrvačnosti a kvadrátu jeho úhlové rychlosti podle rovnice (1):

$$E_K = \frac{1}{2} \vec{I} \omega^2, \quad (1)$$

kde  $E_k$  je kinetická energie rotoru,  $\vec{I}$  je moment setrvačnosti a  $\omega$  je úhlová rychlost. V naprosté většině případů má rotor setrvačnicku válcový tvar, a proto lze moment setrvačnosti vyjádřit rovnicí (2):

$$\vec{I} = \frac{1}{2} r^2 m, \quad (2)$$

kde  $r$  je poloměr rotoru a  $m$  jeho hmotnost. Z rovnice (2) je zřejmé, že energie setrvačnicku závisí více na jeho úhlové rychlosti než na hmotnosti. Protože vyšší úhlové rychlosti dosahují materiály s nižší hustotou, mohou tyto materiály akumulovat větší množství energie. A to je důvod, proč je při konstruování setrvačnicků výhodnější užití kompozitů s nižší hustotou namísto oceli s větší hustotou. Neznamená to však, že by se setrvačnický s ocelovými rotory nevyrobily vůbec, pouze dosahují menších otáček a jsou proto označovány jako *nízkorychlostní*. Dosahují otáček do 10 000 RPM. Akumulují méně energie, ale zato jsou levnější a v některých aplikacích proto výhodnější. Setrvačnický s kompozitními rotory se nazývají *vysokorychlostní* a užívají se zejména v letectví, kosmonautice a UPS. Jsou dražší, ale mohou dosáhnout rychlosti přes 60 000 RPM. [1], [25]

### Ložiska

V minulosti se používala klasická mechanická ložiska. Ta však byla nevyhovující pro moderní setrvačnický kvůli velkým třecím silám. Proto se přistoupilo k použití ložiskových systémů z permanentních magnetů a elektromagnetů. Elektro-permanentní magnetická ložiska mají tu výhodu, že nevyžadují kontakt s hřídelí, neobsahují pohyblivé části a tím podstatně snižují tření rotoru. Skládají se z permanentních magnetů, které drží hmotu setrvačnicku díky odpudivým magnetickým silám (efekt magnetické levitace), a elektromagnetů, stabilizujících otáčející se masu.

Vrcholem v konstrukci ložisek setrvačnicků jsou vysokoteplotní supravodivá magnetická ložiska (HTS), která drží setrvačnick bez potřeby elektřiny a stabilizačního systému. Naproti tomu ale vyžadují kryogenní chlazení kapalným dusíkem.

### *Motor-generátor*

Motor-generátor je zařízení, které umožňuje převod kinetické energie setrvačnicku na energii elektrickou nebo naopak. Jedná se o elektrický stroj, který může pracovat jako motor (při nabíjení) nebo jako generátor (při vybíjení). V současnosti jsou používány motor-generátory z permanentních magnetů (PM stroje). Tyto stroje se dělí na dvě hlavní skupiny, a to axiální (AFPM stroje) a radiální (RFPM stroje). Kromě těchto zařízení, kterých se používá v drtivé většině případů, je možné použít i *synchronních reluktančních* motor-generátorů. Ty jsou například součástí setrvačnicků pro UPS (Obr. 8).

### *Napětí*

Navzdory mnoha výhodám setrvačnicků je jedním z jejich nedostatků nízké napětí při vybíjení. To vedlo výrobce ke konstruování *vysokonapěťových* setrvačnicků. Největším napětím, jaké se podařilo z těchto setrvačnicků získat, bylo napětí 10 kV. To je ovšem pouze maximální hodnota, dlouhodobě tyto setrvačnický poskytují napětí 6,7 kV. [1]

### **2.3.2 Využití**

Jak bylo řečeno výše, typickým rysem setrvačnicků je schopnost okamžitého najezení a plynulá dodávka energie. Z toho důvodu jsou mimořádně vhodné jako záložní zdroje u OZE. Mohou totiž ihned vyrovnat kolísání výkonu, typické právě pro obnovitelné zdroje. Ze stejného důvodu jsou také používány v UPS (zdroje nepřerušovaného napájení), neboť jsou schopny pokrýt velkou spotřebu během krátké doby. Protože při výpadku elektřiny je často nejkritičtější doba prvních 5 sekund, jsou setrvačnický užitečné právě pro tyto krátkodobé výpadky napájení. V energetice jsou dále užívány pro udržení kvality elektřiny, zejména pro regulaci frekvence.

V současné době je největší instalací setrvačnicků na světě farma poblíž města Stephentown v USA, kterou vybudovala firma Beacon Power. Ta má instalovaný výkon 20 MW a slouží ke stabilizaci frekvence v síti v oblasti New Yorku.

Další oblastí využití je elektrická trakce. Setrvačnický jsou používány v trolejbusích, tramvajích, vlakových soupravách i elektromobilech. Ve Švýcarsku se dokonce zkoušelo využití tzv. gyrobusů, speciálně upravených trolejbusů, využívajících velké setrvačnický.

Dalšími obory jsou letectví a také kosmonautika, kde setrvačníky kromě akumulace energie ze Slunce obstarávají i funkci prostorové stabilizace těles ve stavu beztíže.

Oproti bateriím má technologie setrvačnicků větší rychlost nabíjení a vybíjení, může tak poskytnout větší výkon, ale po kratší dobu. Dále má delší životnost (vydrží větší počet cyklů), je minimálně citlivá na pracovní podmínky a nepředstavuje zátěž pro životní prostředí. Nevýhodou je vysoká cena, která ale může být v budoucnu snížena vlivem rostoucí produkce. [1], [12], [25]

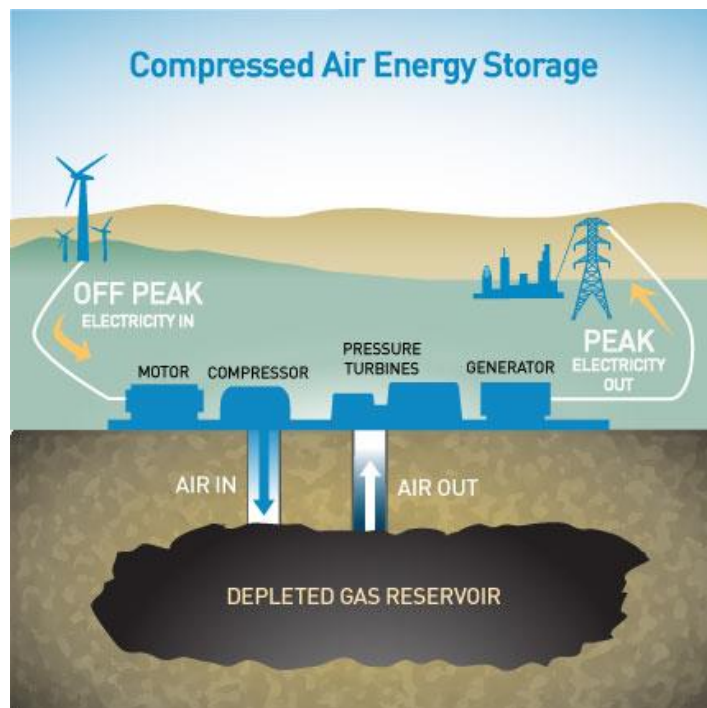
## 2.4 Akumulace do stlačeného vzduchu (CAES)

Technologie stlačeného vzduchu využívá, podobně jako setrvačnický, mechanický princip akumulace energie. Pracuje podobným způsobem jako přečerpávací vodní elektrárny, místo vody však využívá vzduch, který je stlačován a ukládán. V případě potřeby elektrické energie se opět uvolní a expanduje v turbíně. První velká instalace využívající tento princip, byla vybudována roku 1970, i když už předtím existovalo několik menších jednotek.

### 2.4.1 Princip funkce

Jednotky CAES pracují s okolním vzduchem, který je nasáván a pomocí kompresoru stlačován až na hodnotu 7 MPa. Kompresor je poháněn elektřinou a v tomto režimu se tedy zařízení chová jako spotřebič. Stlačený vzduch je ukládán do podzemní kaverny (často solný důl). Pokud vzroste potřeba elektrické energie v síti, vzduch je uvolněn z kaverny a expanduje na turbíně, která roztáčí generátor (Obr. 7). Problémem technologie je skutečnost, že plyn se při kompresi zahřívá (až na 670 °C), a naopak při dekompresi se ochlazuje. Plyn o tak vysoké teplotě není možné akumulovat, respektive je to velice drahé, během stlačování tak musí být zajištěno chlazení, které odvede přebytečné teplo. Do kaverny se pak ukládá vzduch o teplotě blízké okolní (43 – 49 °C). Při obráceném procesu (expanze) ale plyn teplo ztrácí, a proto je nutno ho dodat. K tomu se užívá zemního plynu, ale uvažuje se i o využití rekuperátorů, jež by využily teplo odvedené při kompresi a následně ho znovu využily při expanzi. [25]





Obr. 7: Systém CAES [25]

#### 2.4.2 Diabatická metoda

Výše popsaná metoda je proces, během kterého si pracovní látka vyměňuje teplo s okolím, proto je označována jako diabatická. Všechny jednotky CAES, které jsou nyní v provozu, využívají právě tento způsob akumulace. V současnosti jsou v provozu pouze dvě velké elektrárny, kde je tento systém nainstalován, a to v Huntorfu v Německu a ve městě McIntosh v USA ve státě Alabama. V obou elektrárnách jsou nainstalovány plynové turbíny. Technologie má pro elektrárny dvě hlavní výhody.

V normálním případě bez CAES je pro plynovou turbínu nutné přivádět do spalovací komory stlačený vzduch. K tomu se běžně využívá kompresoru na společné hřídeli, který spotřebovává téměř 2/3 výkonu turbíny. Při použití CAES je stlačený vzduch již k dispozici v kaverně a stačí ho odtud pouze uvolnit a ohřát. Tím odpadá potřeba kompresní práce, veškerá energie, kterou je nutné dodat, je energie zemního plynu, jež ohřívá plyn. Elektrárna pak pracuje s vyšší účinností, která přesahuje 42 %, za použití rekuperátoru tepla pak může dosáhnout až 55%. Druhá výhoda spočívá ve snížení emisí CO<sub>2</sub> na 40 – 60 % (opět závisí na použití rekuperátoru).

Obě zmíněné elektrárny mají kompresor, motor-generátor i turbínu na společné hřídeli. V budoucích CAES elektrárnách se uvažuje o mechanickém oddělení dvojic motor-kompresor a turbína-generátor. Všechny plánované elektrárny s CAES by měly využívat diabatické metody. [25]

### 2.4.3 Adiabatická metoda

Vyšší účinnosti by bylo možné dosáhnout, kdyby teplo odvedené při kompresi plynu mohlo být znovuobnoveno a použito pro ohřátí vzduchu při expanzi. Tím by odpadla nutnost používat zemní plyn a účinnost by vzrostla až na 70 %. Mezinárodní konsorcium vedené německou firmou RWE pracuje na vývoji takového zařízení. Pilotní projekt elektrárny využívající adiabatickou metodu je naplánován na rok 2018.

#### *System akumulace*

Nezávisle na vybrané metodě jsou pro akumulaci stlačeného vzduchu nezbytné velké jednotky. Zařízení má totiž nízkou energetickou hustotu a pro její zvýšení je nutné zvětšit celé akumulační zařízení. Nejlepší lokality pro umístění systému jsou uměle vytvořené solné kaverny v hlubokých solných ložiscích. Ty mají řadu výhod, jako jsou nízké tlakové ztráty během akumulace nebo fakt, že kyslík obsažený ve stlačeném vzduchu nijak nereaguje se solí v kaverně. V případě, že není využitelné žádné solné ložisko, je možné použít přírodní zvodeň (souvislá akumulace gravitačních podzemních vod v hornině, kde může docházet k přenosu hmot). Pak je ale nutné vyloučit riziko reakce vzdušného kyslíku s horninou nebo s mikroorganismy v ní obsažených. Pokud by totiž k reakci docházelo, kyslík by se spotřebovával, což by mohlo vyústit až k jeho vyčerpání. Dále se uvažuje o umístění kaverny do vyčerpaných ložisek zemního plynu, kde se však k riziku reakce kyslíku přidává možnost smíšení vzduchu se zbytkovými uhlovodíky. [25]

### 2.4.4 AA-CAES

Výraz Advanced-adiabatic CAES (AA-CAES) označuje vyšší „evoluční“ stupeň systémů, kde je podstatně navýšena účinnost. Zařízení pracují obdobně jako klasické CAES, rozdíl spočívá pouze ve způsobu využití tepla komprese. V klasické technologii stlačeného vzduchu musí být teplo odstraněno ještě před akumulací vzduchu, neboť je nemožné uchovávat stlačený vzduch za vysoké teploty. Teplo získané kompresí je v podstatě vypouštěno do atmosféry, což představuje nevratnou ztrátu energie. AA-CAES se snaží

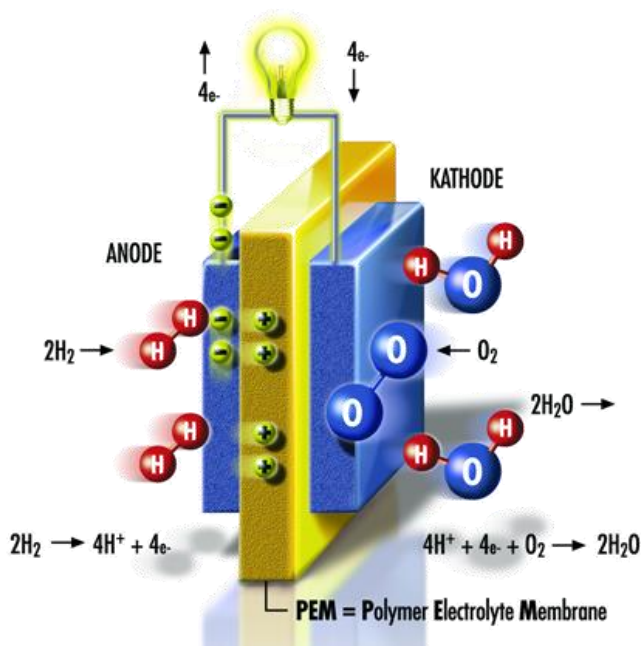
odebrat plynu teplo po kompresi, akumulovat ho zvláště a během expanzní fáze ho plynu opět vrátit. To může zvýšit účinnost technologie až na zmiňovaných 70 %. Jednou z možných cest je akumulace tepla do oleje, který může být skladován v izolovaných nadzemních nádržích. Pokud proces stlačení probíhá v několika oddělených fázích (nutnost vícenásobné komprese), je možno postupně akumulovat teplo do oleje po každé fázi. Olej tak získá bezpečnou teplotu pro akumulaci (méně než 330 °C). [25]

### *Využití*

Metoda AA-CAES prozatím existuje jen ve fázi návrhů, žádný z nich se doposud nepodařilo v praxi zrealizovat. V oblasti akumulace do stlačeného vzduchu se tak v praxi využívá pouze klasické metody CAES, a to ještě poměrně zřídka (pouze 2 elektrárny na světě). V této technologii ale nepochybně stále tkví velký potenciál, a pokud se podaří odstranit některé nedostatky, může se v blízké budoucnosti stát velmi efektivní. [25]

## 2.5 Akumulace do vodíku

Tyto systémy využívají přeměnu elektřiny na vodík pomocí elektrolýzy. Vzniklý vodík je pak akumulován a v případě potřeby může být opět převeden na elektrickou energii nebo rovnou využit v některých aplikacích. Metoda má poměrně nízkou účinnost, mezi 30 a 40 %, avšak oproti bateriím nebo CAES má vysokou kapacitu, a proto je neustále předmětem zájmu a vývoje.



Obr. 8: Schéma PEM elektrolyzéro [2]

### 2.5.1 Princip činnosti

Technologii je možno přirovnat k bateriím s oddělenými elektrolyty (flow baterie). Elektrická energie je využita k elektrolýze vody, při níž se odděluje vodík a kyslík. Vodík je následně uskladněn v zásobníku a je-li třeba, je využit v palivových článcích nebo jako palivo v plynových turbínách. Konverze vodíku probíhá v elektrolyzéroch. V současnosti se používá PEM elektrolyzéro (Obr. 8), obsahujících dvě elektrody, mezi kterými je vnořena PEM membrána (Proton Exchange Membrane). Membrána obsahuje elektrolyt a způsobuje vodivost iontů  $\text{H}^+$ . Zároveň též odděluje vodík od kyslíku. Výhodou PEM elektrolyzéro je skutečnost, že mohou pracovat při zvýšeném tlaku, čímž odpadá následná potřeba doplňkové komprese vodíku. Účinnost systému s PEM elektrolyzéro je necelých 40 %. Pro zvýšení účinnosti se vyvíjí vysokoteplotní elektrolyzéro. Tyto nejmodernější

systemy jsou zatím pouze ve fázi výzkumu, ale při jejich komerčním použití by se mohla celková účinnost akumulace do vodíku přehoupnout přes 50 %. [2]

### **2.5.2 Využití**

Akumulovaný vodík může být využit přímo v chemickém a petrochemickém průmyslu, v palivových člancích, pro veřejnost v budoucnu jako palivo do automobilů a dopravních prostředků nebo v mikrosítích ve formě stlačených vodíkových lahví. Dále může být vodík využit v kombinovaném cyklu s plynovou turbínou. Celkově se o vodíku jako alternativním zdroji energie uvažuje už poměrně dlouho, jeho použití ovšem výrazně komplikuje fakt, že vodík tvoří se vzduchem i při malých množstvích výbušnou směs, čímž jsou kladeny zvýšené nároky na bezpečnost. [2]

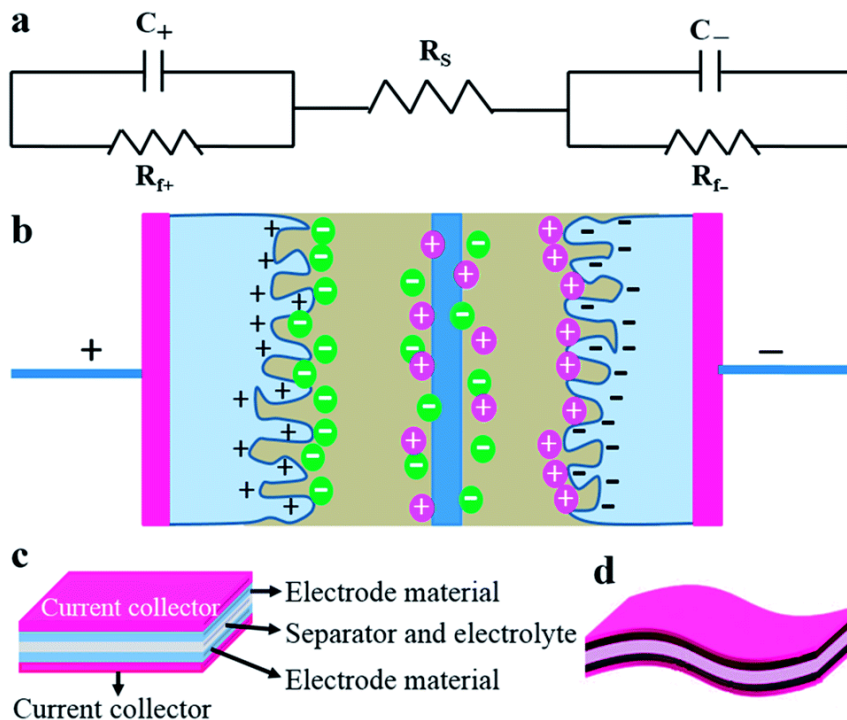
## **2.6 Superkapacitory**

Superkapacitory, jinak též nazývané ultrakapacitory či elektrochemické kondenzátory, jsou speciální elektrolytické kondenzátory mající obrovskou kapacitu (řádově 1000 F). Dle principu akumulace rozlišujeme dvojvrstvé kapacitory, pseudokapacitory a hybridní kapacitory.

### **2.6.1 Princip funkce**

Superkondenzátor sestává ze dvou elektrod, které mohou být z identického materiálu (symetrické kondenzátory) nebo se materiály elektrod liší a pak mluvíme o nesymetrických kondenzátorech. Mezi elektrodami je separátor, který je ponořen do elektrolytu. Separátor zabraňuje vzájemnému elektrickému kontaktu elektrod. Musí být propustný pro ionty, aby umožňoval přenos iontů v elektrolytu. Dále by měl mít vysoký elektrický odpor a velmi malou tloušťku. Elektrolyt může být buď organický (v tom případě se spolu s ním nejčastěji užívá polymerních nebo papírových separátorů), nebo může být ve formě vodného roztoku (pak se většinou používá separátorů ze skleněných nebo keramických vláken). Napětí článku je limitováno rizikem zhroucení elektrolytu, u elektrolytů na bázi vodných roztoků je tak maximální napětí 1 V, u organických elektrolytů je napětí výrazně vyšší, kolem 3 V.

Dvojvrstvé kondenzátory EDLC (Electric Double Layer Capacitor) pracují na elektrostatickém principu ukládání energie. V nenabitém stavu jsou ionty v elektrolytu rozmístěny rovnoměrně, po přivedení napětí na elektrody začnou být záporné ionty přitahovány na anodu, zatímco kladné ionty na katodu. Tím se vytvoří dvě rozhraní elektroda/elektrolyt, což je nazýváno jako elektrická dvojvrstva. Dvojvrstvý superkondenzátor se tak jeví jako dva samostatné kondenzátory spojené do série, vzájemně oddělené separátorem (Obr. 9). Vysoké kapacity EDLC kondenzátorů je dosaženo díky obrovské ploše elektrod, která přesahuje 1000 m<sup>2</sup>/g. Elektrody jsou vyrobeny nejčastěji z nanoporézních uhlíkových materiálů, jež jsou relativně dobře dostupné. Nejrozšířenějším materiálem užívaným pro elektrody je aktivní uhlík, ale někdy se volí i uhlíkové nanotrubičky (CNT), nanovlákná či grafen. [3]



Obr. 9: Schéma EDLC kondenzátoru [3]

Pseudokapacity fungují na základě vratných redoxních reakcí, které probíhají na elektrodách. Materiály elektrod jsou v tomto případě uhlík a oxidy kovů. Při redoxních reakcích však dochází k degradaci elektrod, čímž se snižuje celková životnost kondenzátoru. Výhodou tohoto typu je ale vyšší kapacita (až stokrát) oproti EDLC kondenzátorům.

Hybridní superkondenzátory jsou kombinací obou předcházejících typů a spojují v sobě vlastnosti EDLC a pseudokondenzátorů. Příkladem takového kondenzátoru je Lithium-Ion kapacitor (LiCs).

Protože jeden článek má sám o sobě nízké pracovní napětí, jsou jednotlivé kondenzátory spojovány do bloků (modulů) o napětí až 125 V. Jednoznačnou výhodou superkapacitorů je rychlost nabíjení či vybíjení (řádově sekundy), která je mnohem vyšší než je tomu u baterií. Další hlavní předností je dlouhá životnost systémů. Důvodem je mechanismus akumulace energie, který nevyužívá chemických reakcí (EDLC), a tudíž nedochází k opotřebení elektrod. Superkapacity tak jsou schopné vydržet i milion cyklů. To je výrazně více než v případě baterií. V neposlední řadě je výhodou i účinnost, která se pohybuje kolem 90%, což rovněž převyšuje baterie. Nevýhodou je nízká energetická hustota, jež nepřevyšuje 10 Wh/kg a je tak ze všech systémů pro akumulaci nejnižší. Pro

srovnání jsou shrnuty v tabulce (Tab. 2) důležité parametry klasických kondenzátorů, superkapacitorů a baterií: [3]

Tab. 2: Srovnání technologií [3]

Charakteristika	Kondenzátor	Superkapacitor	Baterie
Energetická hustota [Wh/kg]	<0,1	1 – 10	100
Vybíjecí čas	$10^{-6}$ - $10^{-3}$	s - min	0,3 – 5 h
Nabíjecí čas	$10^{-6}$ - $10^{-3}$	s - min	1 – 6 h
Účinnost [%]	téměř 100	85 – 98	65 – 90
Počet cyklů	téměř neomezeno	<500 000	500 – 2000

## 2.6.2 Použití

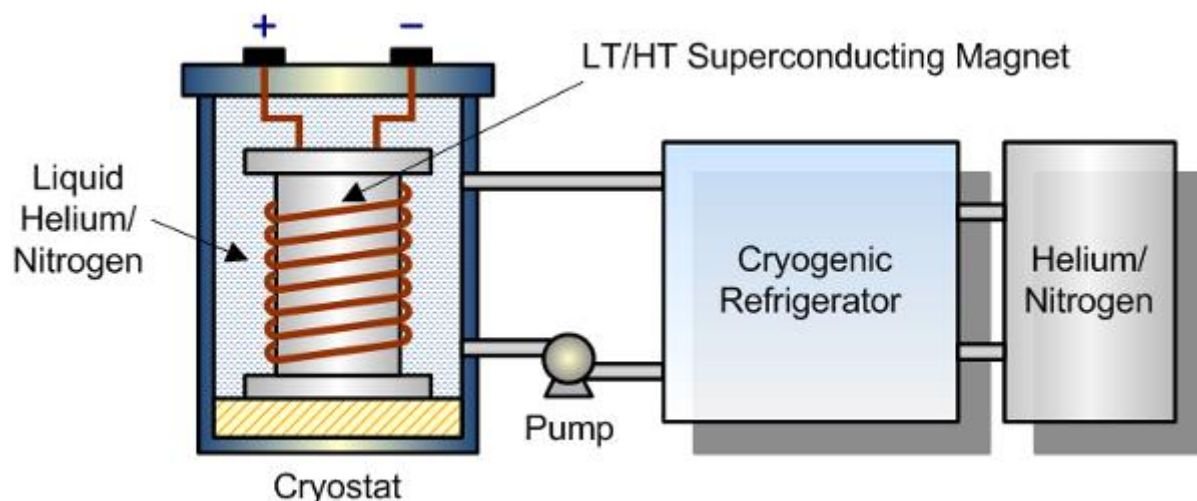
Použití superkapacitorů se neustále vyvíjí a rozšiřuje. V současné době se tyto systémy užívají v elektronice, lékařských přístrojích a v neposlední řadě i v dopravních prostředcích. Uplatnění našly zejména u tramvají a lokomotiv, kde je do nich akumulována brzdná energie. U elektromobilů pak mohou superkapacitory zajistit zrychlení z nuly na 100 km/h již za 4 sekundy. V současné době se rozšiřuje jejich použití v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie, zejména se solárními, fotovoltaickými a větrnými elektrárnami. V této oblasti jsou užitečné pro svoji vysokou spolehlivost, dlouhou životnost a schopnost rychlého nabití a vybití. Avšak pro velké energetické projekty, jako je akumulace v teplárnách a elektrárnách, se nehodí kvůli své nízké energetické hustotě. Pro dosažení vysoké kapacity (jednotky MWh) jsou potřebné obrovské jednotky a to je z prostorového hlediska nevýhodné. [3], [25]



## 2.7 Supravodivé cívky (SMES)

### 2.7.1 Princip funkce

Technologie využívá akumulaci elektrické energie do magnetického pole, vytvořeného průchodem stejnosměrného proudu supravodivou cívkou. Tu je nutno chladit pod hodnotu kritické teploty daného materiálu, a to po celou dobu uchovávání energie. Systém SMES se skládá ze čtyř hlavních součástí: supravodivé cívky, kryogenní jednotky, stabilizátoru napětí a řídicí jednotky (Obr. 10). Technologie je odlišná od všech ostatních systémů pro akumulaci v tom, že zde nedochází k přeměně jednoho druhu energie v jiný. Jediná přeměna, která probíhá, je konverze střídavého proudu na stejnosměrný a zpět. Umožňuje ji stabilizátor, jehož součástí je usměrňovač a střídač. Ty způsobují ztráty energie 2-3 % při každém průchodu proudu a jsou to jediné ztráty, které vznikají. Účinnost SMES tak přesahuje 95 %, což je zdaleka nejvíce ze všech systémů pro akumulaci energie. [21]



Obr. 10: Schéma SMES [21]

#### Cívka

Supravodivá cívka je srdce celého systému. Maximální energie, kterou je možno akumulovat, je dána dvěma faktory. V první řadě je to velikost a geometrie vlastní cívky, ze které pak plyne její indukčnost. Platí, že čím je větší cívka, tím větší má akumulační schopnost. Z hlediska geometrie může být cívka toroid nebo solenoid. Druhým faktorem je typ použitého supravodiče, který určuje maximální průchozí proud. Všechny dodnes instalované systémy SMES využívají supravodivé slitiny niobu a titanu, které pracují za teplot blízkých bodu varu kapalného hélia, tedy kolem 4,2 K. Ve fázi výzkumu je použití

vysokoteplotních supravodičů (HTS), nicméně tato možnost se prozatím jeví jako ekonomicky neefektivní. V současné době jsou vyvíjeny tzv. mikro-SMES jednotky, používající solenoidů. [21]

### Kryogenní jednotka

Pro správnou činnost SMES je nutno udržovat teplotu supravodiče pod kritickou teplotou. Jak bylo zmíněno, tato teplota je v současnosti 4,2 K. Chlazení zajišťuje kryogenní jednotka, pracující s heliem jako chladicím médiem. Helium je totiž jediný prvek, který za těchto teplot není v pevném skupenství. Jednotka se skládá z jednoho nebo více kompresorů, stlačujících plynné helium, a chladicího boxu. Ten přijímá stlačené helium, to je zkapalněno a vháněno do kryostatu, ve kterém je uložena supravodivá cívka.

#### 2.7.2 Použití

Použití SMES je přes jejich vysokou účinnost a spolehlivost dnes minimální. Důvodem jsou zejména vysoké náklady - drahým zařízením je jak vlastní supravodivá cívka, tak i chladicí systém. Proto se v praxi využívají SMES pouze zřídka. Ve světě je nainstalováno několik jedno až tří megawattových jednotek, i když testována jsou i zařízení s výkonem 40 MW. Pro větší množství akumulované energie by bylo potřeba zvětšit rozměry celého systému, jenže to nelze provádět do nekonečna. [21]

## 2.8 Srovnání systémů

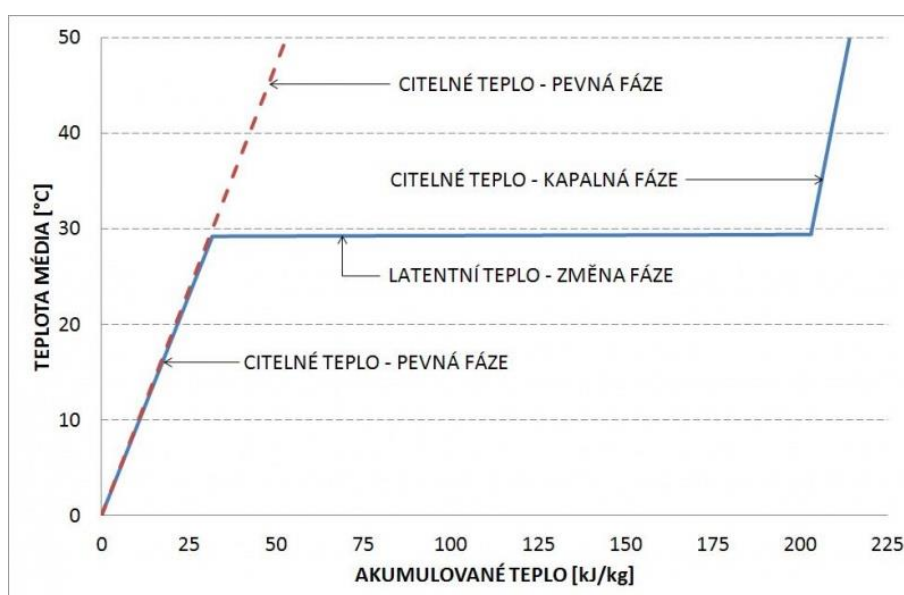
Pro přehlednost jsou v následující tabulce (Tab. 3) shrnuty vlastnosti a důležité parametry popsaných systémů pro akumulaci elektrické energie:

Tab. 3: Srovnání popsaných systémů pro akumulaci elektřiny [2]

Technologie	Cena [USD/kWh]	Životnost [roky]	hustota energie [Wh/kg]	Účinnost [%]
Baterie	320 – 500	5 – 20	15 – 300	65 – 90
Superkapacitory	300 – 2000	>20	1 – 10	85 – 98
Setrvačníky	1000 – 5000	15 – 20	5 – 130	80 – 99
CAES	2 – 50	20 – 100	30 – 60	40 – 80
Vodík	2 – 20	30	400 – 1000	40
SMES	1000 – 10000	>20	1 – 10	>95

## 2.9 Akumulace do roztavených solí

Tento typ technologie využívá latentní teplo. Jde o teplo, které je nutno dodat nebo odebrat látce, aby přešla do jiného skupenství. Při akumulaci je tak využívána nejen tepelná kapacita dané látky, ale též skupenské teplo. Děj probíhá za konstantní teploty média, proto je toto teplo označováno jako latentní (skryté). Při přechodu látky z pevného do kapalného skupenství je nutno tuto energii dodat. Přísun energie se však neprojeví nárůstem teploty, ale rozpadem krystalické mřížky a látka se mění na kapalinu téže teploty (Obr. 11).



Obr. 11: Latentní teplo [13]

Při tuhnutí dané látky je děj přesně opačný. Médium uvolňuje energii, jeho teplota se nemění až do okamžiku, kdy přejde do pevné fáze. Tímto způsobem je možné akumulovat mnohem větší množství energie, než klasickou cestou využívající pouze tepelnou kapacitu látky. Teoreticky by bylo možné využít i přechod mezi kapalnou a plynnou fází, avšak při této přeměně dochází k výrazné změně objemu látky, což by pro akumulaci energie bylo nevhodné.

### PCM Materiály

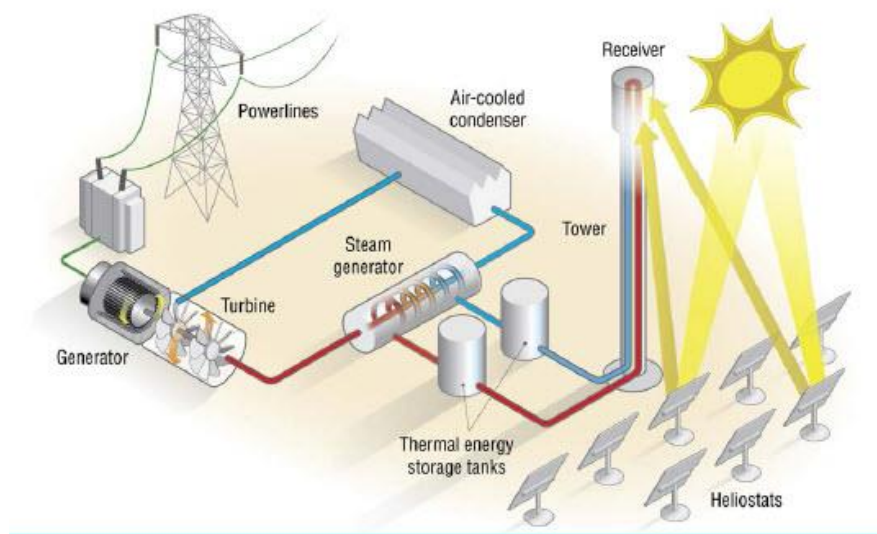
Materiály, použitelné pro akumulaci tepla výše uvedeným způsobem, se nazývají PCM (Phase Change Materials). Všechny nedosahují stejných kvalit, ale měly by co nejlépe splnit následující požadavky:

- dobrá tepelná jímavost, tedy vysoké měrné skupenské teplo tání,
- bod tání ve vhodném intervalu teplot pro danou aplikaci,
- velká tepelná vodivost,
- co nejmenší tlakové a objemové změny při změně skupenství,
- dlouhá životnost bez změny akumulačních vlastností,
- netoxičita, nehořlavost,
- nezpůsobovat korozi.

Tyto požadavky nespĺňuje mnoho látek, v praxi vyzkoušené jsou zejména Glauberova sůl, octany, eutektické směsi a některé alkany (parafiny), vyrobené při rafinaci ropy. Obecně lze PCM rozdělit na anorganické a organické. Výhodou anorganik je především vysoké měrné skupenské teplo tání (asi 236 kJ/kg), dobrá tepelná vodivost, nehořlavost a relativně nízká cena. Naopak nedostatkem je skutečnost, že u většiny kovů způsobují korozi. Mezi anorganické PCM je možno zahrnout již zmíněnou Glauberovu sůl ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) a hydratované soli (chlorid vápenatý, síran sodný,...). Předností organických PCM je chemická stabilita a fakt, že nepůsobí korozivně. Nevýhodou je pak nízká tepelná vodivost i měrné skupenské teplo tání a rovněž značné změny objemu při změnách fáze. Do této skupiny jsou zahrnovány parafinové vosky a některé mastné kyseliny.

### *Použití*

Uvedená technologie je v současnosti využívána zejména v kombinaci s termálními elektrárnami, a to za účelem zvýšení jejich účinnosti. Nejčastěji se používá eutektická směs dusičnanu sodného a draselného. Teplota tání této sloučeniny je 238 °C. Směs je uložena ve dvou izolovaných nádobách – teplé a studené. Ve studené nádobě je udržována teplota kapalně směsi 290 °C. Ta odtud proudí přes solární kolektor. Ten ji ohřeje na 550 °C a následně se ukládá v teplé nádobě. Zde je energie uchována s minimálními ztrátami. V případě potřeby jsou tyto ohřáté roztavené soli uvolněny do výměníku nebo parogenerátoru. Tam předají svou energii, jejich teplota klesne a jsou vedeny zpět do studené nádoby (Obr. 12).



Obr. 12: Schéma systému s roztavenými solemi [13]

Kromě solárních elektráren je systém používán v řadě aplikací v chemickém průmyslu, a proto je již dobře vyzkoušen. Pracuje za teplot kolem 550 °C, což znamená, že v kombinaci s parní turbínou zajišťuje dobrou termodynamickou účinnost turbíny (až 40 %). Proto je účinnost solárních elektráren pracujících s roztavenými solemi vyšší (až o 6 %), než je tomu u klasických termálních elektráren. Ve světě existuje několik projektů pracujících na tomto principu, například dvě elektrárny v Kalifornii v USA nebo jedna ve Španělsku. [4], [7], [13]

### 3 Další využití elektrické energie

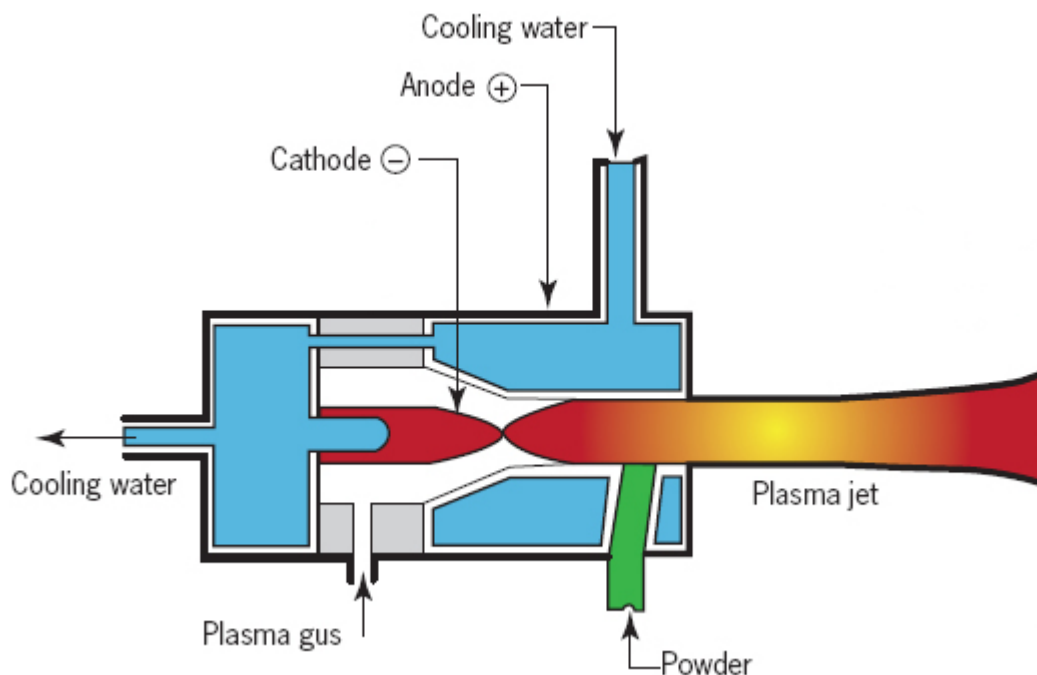
Přebytečnou elektrickou energii je v teplárenském provozu možné, kromě akumulace popsané výše, přímo využít některým jiným způsobem. V případě uvedeného provozu přicházejí v úvahu zejména dvě alternativy – plazmatron a elektrokotel. V následujících odstavcích jsou tyto dvě technologie blíže rozebrány.

#### 3.1 Plazmatron

Kromě tří všeobecně známých skupenství hmoty – pevného, kapalného a plynného existuje ještě čtvrtý stav, jímž je plazma. Jde o vysoce žhavý ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů, případně excitovaných a neutrálních atomů a molekul. Na Zemi se přirozeně téměř nevyskytuje, avšak ve vesmíru tvoří přes 99 % hmoty – mlhoviny, hvězdy, mezi nimi i Slunce. V pozemských podmínkách je možno se s ním setkat ve formě blesků či polární záře. Dle teploty může být plazma nízkoteplotní (zářivky, výbojky, elektrický oblouk,  $t = 10^4$  K) a vysokoteplotní (hvězdy,  $t = 10^6$  K). Podle stupně ionizace může být dále slabě nebo silně ionizované. [14]

##### 3.1.1 Princip funkce

Plazmatron (plazmový hořák) je obloukový generátor plazmatu. Dochází v něm k přeměně elektrické energie na tepelnou energii usměrněného proudu plazmatu. Plazma je možné vybudit střídavým či stejnosměrným proudem, vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem nebo též mikrovlnným polem. Plazmatron obsahuje katodu (wolframovou nebo uhlíkovou) a anodu (měď a její slitiny), mezi nimiž hoří elektrický oblouk. Ten je nutno stabilizovat, což se provádí buď pomocí plynu, nebo vody. Pro svou funkci využívají plazmatrony tzv. plazmové plyny. To jsou plyny, přiváděné do obloukové komory, které se ionizují a v nichž vzniká elektrický oblouk. Jako plazmový plyn je možné užít argon, vodík, dusík, kyslík nebo vzduch. Teplota plazmatu na výstupu z trysky je 3000 – 29 000 K a rychlost jeho proudu je až  $10^4$  m/s. Na obrázku (Obr. 13) je příklad vodou stabilizovaného plazmatronu. [14], [15]



Obr. 13: Schéma plazmatronu [6]

### 3.1.2 Použití

Plazmatrony se běžně využívají pro řezání, svařování, obrábění a tavení materiálů. Pro potřeby energetiky je možno jich využít pro spalování odpadů (i nebezpečných) a při najíždění uhelných elektrárenských kotlů. Potenciálně možné je i použití v souvislosti s fúzními reaktory, to však stále zůstává hudbou budoucnosti. Obecně je plazmový hořák v energetice využitelný v těchto základních směrech: [15]

- najíždění práškových kotlů,
- stabilizace plamene při spalování uhlého prášku,
- stabilizace výtoku strusky z výtavných ohnišť,
- snížení ztrát tuhým nedopalem (vede k úspoře paliva),
- snížení emisí oxidů dusíku,
- možnost spalování více druhů paliv.

Zvláštní význam má plazmová technologie právě při najíždění uhelných elektrárenských kotlů. Stávající kotle s práškovým ohništěm je totiž nutno zapálit přídavným palivem, zpravidla mazutem nebo zemním plynem. Jejich aplikace však zdražuje výrobu a zvyšuje emise, čímž zhoršuje provoz celého zařízení. Tato negativa může vyřešit nasazení plazmových hořáků. Při kontaktu proudu plazmatu s primární směsí (hnědé či černé uhlí)

dochází k současnému rychlému nahřívání uhelných částic a okolního vzduchu. Částice uhlí jsou tak vystaveny silnému tepelnému šoku, při němž se rozpadají až na desetinu své původní velikosti. Při reakci se mimo atomární formy (dusík, síra, kyslík,...) vytvoří dále elektronový plyn, který je mnohem reaktivnější než uvolněný atomární dusík. Kyslík tudíž potom nereaguje s dusíkem, ale s reaktivnějšími složkami, čímž se snižují emise oxidů dusíku. Kromě toho plazmový hořák startuje okamžitě a najíždění kotlů je tak provozně levnější. K zajištění bezpečného provozu uvedené technologie je nezbytná automatizace řízení plazmatronů.

Aplikace plazmových hořáků v našich podmínkách je vhodná a perspektivní, nicméně je nutno optimalizovat provoz zařízení tak, aby docházelo k co nejmenšímu opotřebení elektrod hořáku a tím k jejich dlouhé životnosti a dále aby k najetí kotle došlo v co nejkratším čase. Pak může plazmová technologie zapalování kotlů zajistit výrazně nižší náklady než klasické mazutové či plynové hořáky. [6]

Vedle aplikace plazmatronu pro najíždění kotle, tj. pouze dočasné provozní využití, bylo zvažováno i jeho uplatnění pro stabilizaci provozu vlastního kotle v minimálních provozních stavech. S ohledem na výkonové parametry a zjištěné provozní nároky plazmatronu ale nebyla tato varianta již dále rozpracována.



## 3.2 Elektrokotel

Elektrokotel je zařízení, pracující na odlišném principu než klasický parní kotel na fosilní paliva. Pára nebo horká voda je vyráběna prostřednictvím procházejícího elektrického proudu. Obecně je možné vodu ohřívat buď přímým odporovým způsobem, nebo pomocí elektrod. V prvním případě prochází elektrický proud přes rezistor, který je zahříván a předává své teplo vodě. Proud tak neprochází vodou, ale pouze topným tělesem. V případě elektrodového ohřevu je situace odlišná. Voda je ohřívána přímým průchodem elektrického proudu pomocí elektrod. Tento princip elektrického ohřevu vody je nejjednodušším a používá se právě pro účely elektrokotlů. [16]

### 3.2.1 Elektroodový ohřev

Elektrický proud je přiváděn pomocí elektrod, buď grafitových pro menší příkony, nebo kovových pro velké příkony. Tyto elektrody jsou ponořeny ve vodě, jež plní funkci elektrolytu. Pokud je do elektrod zaveden stejnosměrný proud, pak dochází na katodě k vylučování vodíku a na anodě kyslíku. Dochází tak k elektrochemickému rozkladu vody, který je v tomto případě nežádoucí. Z toho důvodu se užívá proud střídavého, který zabezpečí ohřátí vody bez jejího rozkladu. Střídáním kladných a záporných půlperiod totiž dochází ke změně polarity elektrod, čímž se rozklad neustále ruší. Vzniká-li v jedné půlperiodě na katodě vodík a na anodě kyslík, ve druhé půlperiodě se situace obrátí. Na elektrodě, kde se vyvíjel vodík, se nyní vyvíjí kyslík, mající velkou reaktivitu. Ihned se tedy sváže s vodíkem zpět na vodu a rozkladná energie, dodaná pomocí elektrického proudu, se vrátí do vody prostřednictvím tepla. Tím je voda ohřívána a jako celek se jeví celistvě. V blízkosti elektrod je však v důsledku neustálého rychlého vzniku vodíku a kyslíku určitá koncentrace těchto plynů. Pokud by uvedený vývin plynů byl příliš pomalý, mohlo by dojít k tomu, že by se vodík s kyslíkem nestačily potkat a sloučit zpět na vodu. Pak by unikaly od elektrod dále do vody, což by bylo nežádoucí. Je tedy nutné, aby frekvence procházejícího elektrického proudu byla dostatečně vysoká, čímž se zajistí rychlé sloučení obou plynů na vodu. Popsaný problém by též mohl vzniknout při příliš velké proudové hustotě na povrchu elektrod, kdy by docházelo k rozsáhlejší tvorbě plynů. Experimentálně bylo ověřeno, že frekvence elektrického proudu by neměla být nižší než 25 Hz a proudová hustota na povrchu elektrod by neměla přesáhnout hodnotu 1,5 A/cm<sup>2</sup>.

Ve světě jsou využívány horkovodní elektrokotle o příkonu desítek MW. V Evropě jsou instalovány především ve Skandinávii. Tyto kotle jsou plynule regulovatelné pomocí nevodivých stínících válců, které více či méně překrývají elektrody podle toho, jaký výkon kotle je v danou chvíli požadován. Regulační rozsah takto regulovaných kotlů je 4 - 100 %. Obecně je možné regulovat výkon kotle následujícími způsoby: [16]

- Úpravou vodivosti vody,
- Plochou elektrod (zmíněné izolační válce),
- Přiblížením nebo oddálením elektrod (případně užitím izolačních přepážek),
- Rozdělením elektrod na skupiny,
- Zanořováním a vynořováním elektrod do vody,
- Změnou výšky hladiny vody v kotli.

Elektrokotle je možné připojit obvykle na hladinu napětí 6 – 22 kV, přestože ve světě jsou stavěny i kotle připojitelné na hladinu 35 kV. Kotle s vyššími výkony mohou být připojovány na generátorový vývod, kotle menších výkonů na vlastní spotřebu teplárny. V žádném případě by však nemělo docházet k napájení elektrokotle z distribuční soustavy. [8]

### 3.2.2 Použití

Elektrokotle mají řadu výhod. V první řadě nemají tak velké prostorové nároky jako běžné kotle užívající fosilních paliv, čímž se hodí pro instalaci v menších systémech. Dále nevyžadují tolik doplňujícího vybavení jako klasické kotle (trubkový labyrint, odlučovače popílku, systém odsíření,...) a jsou méně náročné na údržbu. Vlastní účinnost přeměny elektřiny v tepelnou energii se blíží 100 %, což je též nepochybně výhodou. Další přednost tkví v tom, že elektrokotle jsou vnímány jako „zelená energie“ nezatěžující životní prostředí tak jako konvenční kotle, tudíž jejich instalace je často chápána jako snaha o zlepšení životního prostředí v daném místě. Tato vlastnost už ale není tak jednoznačná, je-li vzata v úvahu i související výroba elektřiny, nezbytná pro fungování elektrokotle. Elektrická energie totiž nepřichází sama od sebe, ale musí být též někde vyrobena, nejčastěji pomocí fosilních paliv, při jejichž spalování už k uvolňování emisí dochází. Takže zmíněná ekologie elektrokotlů je sporná a je potřeba ji vnímat ve všech souvislostech. S výše uvedenou skutečností je spojena i celková účinnost technologie. Jak bylo řečeno, elektrokotel sám má vysokou účinnost, blížící se 100 %, ovšem je-li vzata

v úvahu účinnost prvotní výroby elektřiny, která je u tepelných elektráren přes 30 %, celková účinnost systému se rapidně sníží. V podstatě se dá říci, že elektrokotel přidává další přeměnu energie – konverzi elektrické energie na tepelnou. Z těchto důvodů je výhodné elektrokotle instalovat tam, kde je v určitých denních či ročních dobách nízká cena elektřiny, nebo tam, kde se z prostorových důvodů nevyplatí použití jiného zdroje. [8]

## 4 Charakteristika teplárny ELÚ III

Práce je zaměřena na teplárenský provoz v teplárně ELÚ III, proto je v této kapitole nejprve proveden její stručný popis, zejména jejího vybraného bloku. Teplárna je vlastněna společností Plzeňská energetika, a.s. (PE). Skládá se ze tří hlavních bloků, kterými jsou okruhy K1-TG8, K3-TG9 a K4-TG10. V minulosti byl provozován ještě špičkový záložní olejový kotel, který sloužil pro dodávku tepla a páry. V současné době je tento kotel nahrazen jedním plynovým kotlem pro vlastní spotřebu (najíždění bloku a stabilizace) a třemi dieselgenerátory. Protože jednotlivé bloky nejsou konstrukčně stejně řešeny, byl vybrán jako příklad okruh K3-TG9, který je níže stručně popsán a na němž jsou uvedeny některé příklady použitých technologií. Nejprve je stručně popsán parní kotel a s ním související systémy, dále navazuje zjednodušený popis okruhu pára-voda a vlastní spotřeby teplárny.

### 4.1 Parní kotel K3

Kotel v bloku K3-TG9 je bubnový, vhodný pro spalování sokolovského uhlí nižší kvality, ohniště je práškové. Spalovací komora je dvoutahová, první tah je tvořen topeništěm, vychlazeným trubkovými stěnami a stropem výparníku. V rozích spalovací komory se nacházejí hořáky na uhelný prášek, orientované téměř do středu komory. Do těchto hořáků je veden uhelný prášek z mlýnů. Každý hořák je vybaven doplňkovým plynovým hořákem, uzpůsobeným pro spalování plynného paliva. Slouží k zapalování a stabilizování spalování při najíždění a nízkých výkonech kotle. Výparník kotle má přirozenou cirkulaci. Kotel má jeden buben. Jelikož ve vodní části bubnu dochází k zahušťování vody solemi, je nutno ji odpouštět. To je zajištěno odluhem těsně pod hladinou vody.

Spaliny proudí ve spodní části spalovací komory do druhého tahu, který je rovněž vychlazen trubkovými stěnami i stropem. Dále vstupují do Ljungströmu (regenerativní ohřívák vzduchu). Ten je přistaven k zadní stěně kotelní. Z Ljungströmu jsou spaliny vedeny do elektroodlučovače a dále spalínovým ventilátorem do odsířovací jednotky. Odsíření je realizováno mokrou vápencovou vypírkou, kde jsou spaliny sprchovány vápenným mlékem – směsí  $\text{CaCO}_3$  za vzniku energosádrovce. Odtud spaliny proudí do dalšího elektroodlučovače, jenž má za úkol odloučit částičky sádrovce vzniklé během odsíření. Poté jsou již spaliny hnány do komína. Spalovací vzduch je nasáván

vzduchovými ventilátory z prostoru kotelny. Proudí do Ljungströmu, kde je ohříván a následně veden odbočkami do jednotlivých hořáků.

Uhlí je drceno ve čtyřech tlukadlových mlýnech (na rozdíl od kotle K1 – tam je použito ventilátorových mlýnů), přičemž počet mlýnů, které jsou současně v provozu, závisí na požadovaném výkonu kotle. Vzniklý uhelný prášek je spolu s ohřátým vzduchem unášen k hořákům. Z každého mlýna je uhelná směs vedena ke všem hořákům. Ze spalovací komory je odváděna škvára z granulační výsypky do vynašeče, odkud padá do kanálu odškvárování. Spalovací režim kotle výrazně omezuje tvorbu oxidů dusíku – umožňuje tzv. denoxikaci.

## **4.2 Okruh pára-voda bloku K3-TG9**

Tepelný oběh K3-TG9 je znázorněn níže (Obr. 14). Kotel K3 má jmenovitý výkon 170 t/h. Z kotle je vedena přehřátá pára k turbosoustrojí TG9 a do vysokotlakého rozdělovače (VTR) K3, K4. Pára, vedená k turbosoustrojí, vstupuje do VT dílu turbíny a tam expanduje. Následně je určité množství páry odebráno ve 3. odběru a potrubím vedeno na parní rozdělovač R3. Zbytek páry vstupuje do nízkotlakého dílu turbíny, kde pokračuje expanze. Z NT dílu je pára též částečně odebírána ve dvou odběrech. Pára z druhého odběru je využita na regenerativní ohřev napájecí vody ve středotlakém ohříváku STO1 a částečně je rovněž odváděna do výměníku. Pára z prvního odběru napájí parní rozdělovač R1 a stejně jako v případě předchozího odběru je též použita na vytápění.

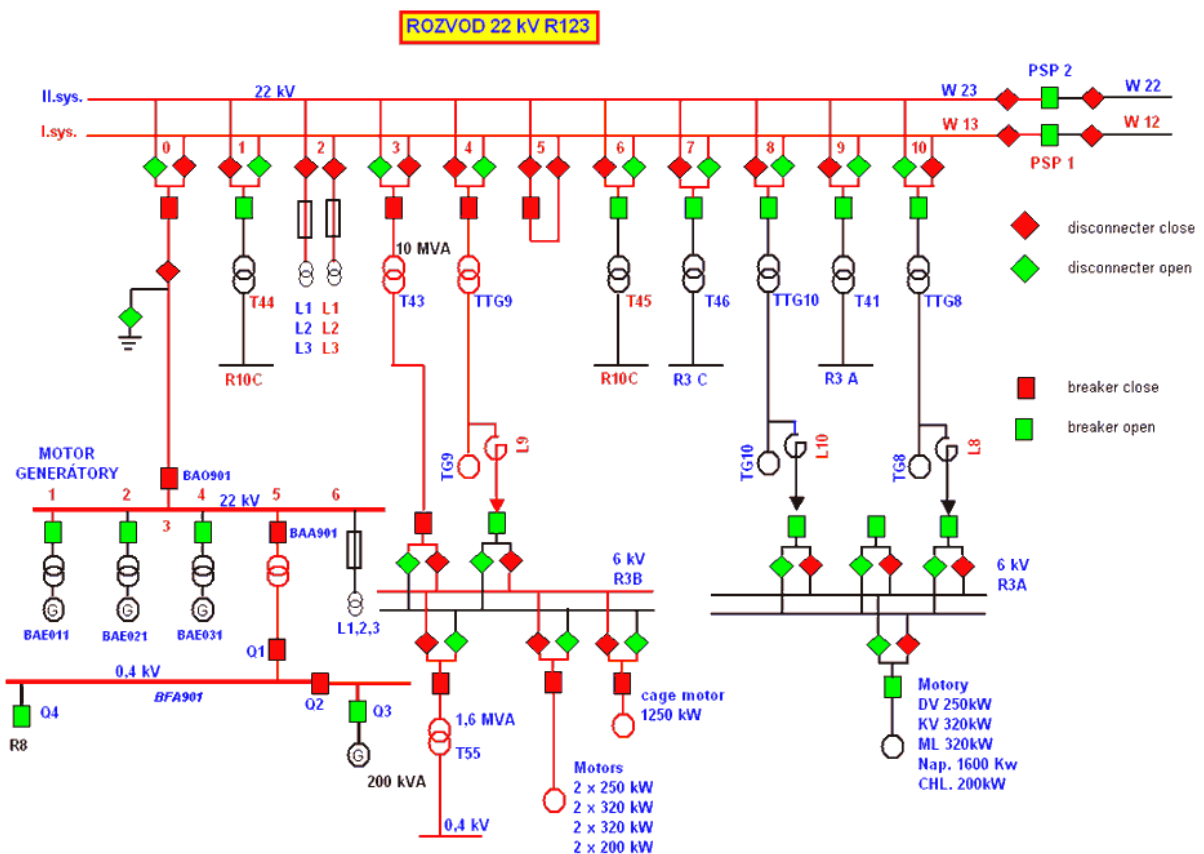
Po expanzi v NT dílu turbíny je pára vedena do kondenzátoru a v něm předává své teplo chladicí vodě. Ještě před vstupem do kondenzátoru je část páry odebrána a použita na regenerativní ohřev v nízkotlakém ohříváku NTO. Z kondenzátoru je odváděn kondenzát přes NTO do nízkotlaké napájecí nádrže a do odplynováku NT-NN. V odplynováku je voda odplynována parou z rozdělovače R1. Do NT-NN je také zaveden kondenzát z STO1 a STO2. Kromě toho je sem přiváděna demi-voda z chemické úpravní vody, napájené z vodárny Radčice.

Z NT-NN je voda čerpána podávacím čerpadlem do středotlakých ohříváků. V STO1 je voda ohřívána parou ze sběrný 2. odběru, v STO2 je ohřívána parou z rozdělovače R3. Následně je voda odváděna do vysokotlaké napájecí nádrže VT-NN, která je rovněž vyhřívána parou z rozdělovače R3. Teplota vody ve VT-NN je 185 °C. Z vysokotlaké



připojeny dieselgenerátory, jež jsou používány zejména pro podpůrné služby. Jelikož jsou schopny velmi rychlého naježení, hodí se jako minutová záloha MZ5. Dalším významem těchto dieselgenerátorů je to, že umožňují teplárně tzv. start ze tmy. Teplárna je tak schopna samostatného rozběhu po black-outu, čímž se řadí mezi významné zdroje elektřiny.

Hlavní přípojnice jsou propojeny s distribuční soustavou a rovněž jsou z nich přes transformátory 22/6 kV napájeny dva hlavní rozvaděče 6 kV, na které je připojena většina důležitých pohonů (mlýny, ventilátory, chlazení). Největším z nich je elektronapaječka, která má v případě kotle K3 příkon 1,25 MW. Hlavní rozvaděče 6 kV využívají dvojitý systém přípojníc. Ve vlastní spotřebě jsou rovněž dva rozvaděče 0,4 kV, jež napájejí spotřebiče menších příkonů.



Obr. 15: Vlastní spotřeba ELÚ III

## 5 Analýza využitelnosti vybraných technologií do provozu teplárny

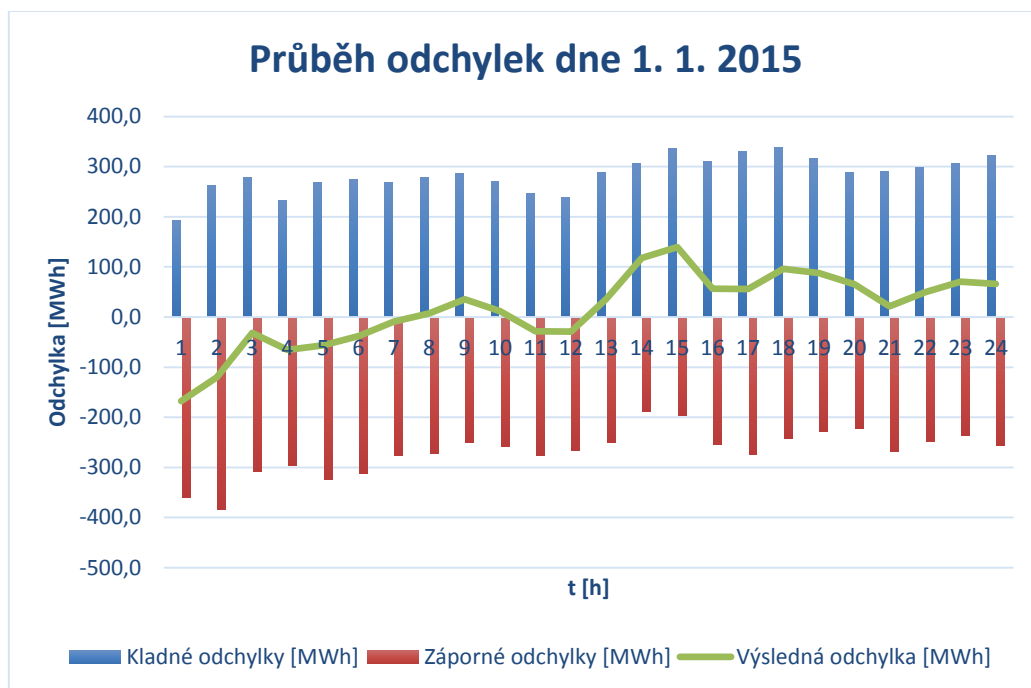
Jak bylo zmíněno v úvodu, teplárna dodává do sítě stálé množství elektrické energie, které se dle potřeby PS může měnit. Dle obchodního kontraktu je stálá hodnota dodávané elektřiny 20 MW<sub>e</sub>, dle aktuální situace v PS je možné dodávat více nebo méně. Zúčtování odchylek probíhá pro každou hodinu zvlášť dle cen OTE. Pro teplárnu by bylo výhodné akumulovat elektřinu v době přebytku v síti, neboť v takovém případě by PE utřžila určitou finanční sumu za odlehčení sítě. V době nedostatku elektřiny v síti by pak byla akumulovaná energie uvolněna do PS, čímž by rovněž PE vznikl zisk. Výběr a návrh systémů pro akumulaci se tedy řídí odchylkami v PS (kapitola 1.3).

Vyhodnocování a cenění odchylek provádí OTE, jejich zveřejnění probíhá následující den po 12. hodině. Vždy osmý pracovní den měsíce je na internetovém serveru OTE vydána závěrečná souhrnná verze odchylek za předchozí měsíc. Pro návrh technologií je nejprve potřeba určit, jak velkou jednotku by bylo možno instalovat a kolikrát v roce by byla využívána, respektive jaký by byl počet nabíjecích a vybíjecích cyklů. K tomu byly využity hodnoty stažené ze severu OTE a data poskytnutá Plzeňskou energetikou za rok 2015. [27]

### 5.1 Využitelnost technologií z hlediska trhu se silovou elektřinou - analýza dat roku 2015

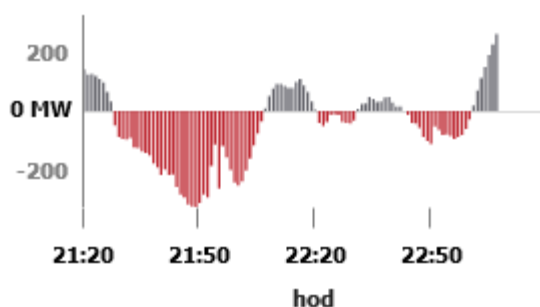
Pro vyhodnocení trhu s elektřinou byla využita denní data roku 2015. Byly analyzovány hodnoty všech dní roku 2015, přičemž bylo zjištěno, že jednotlivé denní průběhy se od sebe ve svých typických rysech až na občasné výjimky vzájemně příliš neliší. S přihlédnutím k této skutečnosti, byly denní odchylky statisticky zpracovány po 5 dnech, tj. vždy 1., 6., 11., 16., 21., 26. a 30. (31.) den v měsíci. Důvodem byla zejména časová náročnost pro zpracování velkého množství dat. Tím bylo získáno 7 průběhů denních odchylek pro každý měsíc (v únoru pouze 6), což je celkem 83 denních průběhů. Tento statistický vzorek je zcela vypovídající a lze ho považovat za odraz reálného chování systému. Zhodnocení dat je plně průkazné. Pro ilustraci je zde uveden příklad průběhu odchylek během 1. 1. 2015 (Obr. 16).





Obr. 16: Hodinový průběh celkových odchylek v síti dne 1. 1. 2015 [27]

V grafu je zobrazen průběh celkové odchylky v síti (zelená křivka) během vybraného dne. Celková odchylka představuje sumu dílčích kladných a záporných odchylek během každé hodiny. Kladné odchylky jsou znázorněny modrou barvou a představují přebytek elektrické energie v systému, záporné odchylky reprezentují nedostatek a jsou znázorněny červeně. Po sečtení kladné a záporné odchylky pro každou hodinu vznikne celková systémová odchylka buď kladná, nebo záporná podle toho, zda převažoval přebytek elektřiny nad nedostatkem nebo naopak. Kromě toho, že se záporné a kladné odchylky mění během dne a jsou každou hodinu jiné, mění se zároveň i v rámci každé jedné hodiny. Hodinové odchylky zachycené na (Obr. 16) jsou pak sumou všech odchylek během 60 minut dané hodiny. Pro příklad je graficky minutový průběh odchylek znázorněn na (Obr. 17), jedná se o část dne 28. 4. 2016. Jak je patrné, trh s elektřinou je velice proměnlivý, záporné odchylky se mohou v podstatě kdykoliv změnit na kladné během několika minut. Předpovědět chování takto dynamického systému je tak velice obtížné, není nemožné. Je pouze možno na základě předchozích dat s určitou pravděpodobností odhadnout, jak se systém v budoucnu zachová, ale i v tom případě je situace nejistá. V následující analýze bude věnována pozornost výhradně hodinovým systémovým odchylkám.



Obr. 17: Minutový průběh odchylek v síti [29]

Celkovou systémovou odchylku v síti vyvažuje protiodchylka, která působí proti ní a snaží se vyrovnat energetickou bilanci v systému. Protiodchylka tak může být rovněž kladná nebo záporná a její cena je fixně dána. Za kladnou protiodchylku, tj. dodání elektřiny do systému v době jejího nedostatku, utrží poskytovatel protiodchylky 2 350 Kč/MWh. Za zápornou protiodchylku, tj. odebrání energie v době přebytku, obdrží poskytovatel 1 Kč/1 MWh. Celkem je tak možné za akumulaci a následné uvolnění 1 MWh elektrické energie inkasovat 2 351 Kč. Cena protiodchylky byla v roce 2015 stabilní, měnila se pouze v ojedinělých případech. Proto je dále uvažována cena 2 351 Kč/MWh. Cena se stanovuje dle celkové odchylky v systému, tudíž pro návrhy jednotlivých systémů je podstatná tato systémová odchylka.

Jak je patrné z grafu na (Obr. 16), množství energie v kladných odchylkách je větší, než množství energie v záporných odchylkách (tedy převažují přebytky nad nedostatky). Tento trend je možné vysledovat po většinu roku 2015 (pro přiblížení jsou na obrázcích v Příloze 1 – 12 uvedeny denní systémové odchylky ve zkoumaném statistickém vzorku). Celkově by tak bylo možné akumulovat větší množství elektřiny, než by pak bylo uvolněno zpět do sítě, a to by nebylo vhodné. Pro správné dimenzování akumulčních zařízení je tedy nutné stanovit odpovídající kapacitu a s ní související počet cyklů nabíjení a vybíjení za rok. K tomu účelu byla pro každý den v měsíci vypracována statistika, která zkoumala, jaká je četnost kladných a záporných systémových odchylek a jaké je množství elektrické energie v těchto odchylkách. Pro příklad je zde uvedena statistika dne 21. 1. 2015 (Tab. 4), pro ostatní dny bylo postupováno stejným způsobem. Z uvedených statistických dat vyplývají následující závěry.

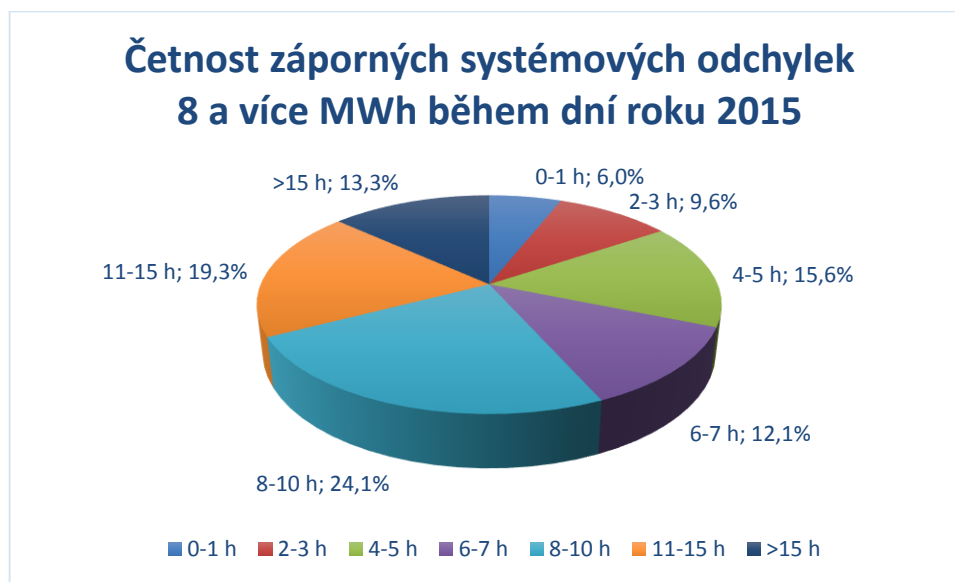
Tab. 4: Statistika systémových odchylek dne 21. 1. 2015

Kladné systémové odchylky 21.1.2015		Záporné systémové odchylky 21.1.2015	
Celková doba trvání [h]	11	Celková doba trvání [h]	13
<1 MWh	0%	<1 MWh	7,7%
1-2 MWh	0%	1-2 MWh	7,7%
3-5 MWh	9,1%	3-5 MWh	7,7%
6-10 MWh	45,4%	6-10 MWh	0,0%
11-20 MWh	9,1%	11-20 MWh	7,7%
>20 MWh	36,4%	>20 MWh	69,2%

Během dní ve zkoumaném vzorku pouze dvakrát nastala situace, kdy byl v průběhu celého dne přebytek elektřiny v systému a ani jednou nedostatek. V těchto případech by tak akumulace vůbec neprobíhala, neboť uloženou energii by nebylo kam uvolnit. V ostatních dnech vždy alespoň na jednu hodinu nastal nedostatek elektrické energie ve výši minimálně 1 MWh. Pro návrh zařízení tak je možné uvažovat o kapacitě zařízení 1 MWh a jejím použití každý den (při zanedbání zmíněných dvou dní, kdy by zařízení nebylo v chodu). V rámci jednoho dne by pak bylo možné provádět více cyklů, neboť během většiny dní dochází k přebytkům i nedostatkům elektřiny na několik hodin. Z denních průběhů odchylek ve zkoumaných dnech byl vypočten průměrný počet hodin, během kterých nastává záporná, respektive kladná odchylka v systému větší nebo rovna 1 MWh. Pro záporné odchylky je to průměrně 8,7 hodin denně, pro kladné odchylky 15,2 hodiny denně. Denní počet cyklů závisí na nabíjecím/vybíjecím čase jednotlivých zařízení. U akumulátorů jsou to například řádově hodiny, a proto přichází v úvahu 1 – 4 cykly denně. U superkapacitorů je doba nabíjení i vybíjení podstatně kratší a zařízení by tak umožňovalo vyšší počet cyklů.

Kapacita zařízení 1 MWh není příliš vysoká, proto se dále zvažuje možnost instalace zařízení o kapacitě jednotek MWh. Vyšší kapacita ale také znamená delší nabíjecí/vybíjecí čas, proto je potřeba stanovit vhodnou kombinaci kapacity a počtu cyklů daného zařízení. Dle analýzy statistického vzorku dat se zdá vhodné pro tuto možnost uvažovat kapacitu 8 MWh, neboť takového množství energie se dosahuje ve většině systémových odchylek. Vybítí takto velkého zařízení ovšem trvá podstatně déle než v případě 1 MWh, proto byl zkoumán počet hodin denně, během nichž je dosaženo záporné systémové odchylky větší nebo rovné 8 MWh. Pokud totiž během dne taková odchylka nastane například pouze na 1 hodinu, zařízení by nestihlo uvolnit všechnu akumulovanou energii a tím by nebylo plně

využito. S kladnou odchylkou problém není, neboť přebytky energie v síti převažují nad nedostatky a není proto problém tuto energii akumulovat. Na obrázku níže (Obr. 18) je znázorněna četnost záporných systémových odchylek 8 a více MWh během dne, trvajících různý počet hodin.



Obr. 18: Četnost záporných odchylek 8 a více MWh během dní roku 2015

Jak je vidět, dnů, kdy by záporná odchylka 8 a více MWh nenastala v síti vůbec nebo trvala jen 1 hodinu, bylo ve zkoumaných dnech velmi málo (6 %), tudíž uvolnění akumulované energie 8 MWh do sítě je možné téměř každý den. [27], [29]

## 5.2 Metodika ekonomického hodnocení systémů

Smyslem ekonomického hodnocení je určit ekonomickou efektivnost investic, tj. rozhodnout, zda se vyplatí dané zařízení pořídit za určený finanční obnos, či ne. K tomu účelu existuje několik postupů výpočtu (ekonomických modelů), z nichž se jen některé hodí pro hodnocení systémů popsaných v této práci. V tomto případě je podstatné zjistit, za jak dlouhou dobu se zařízení splatí, tj. kdy dojde k navrácení finančních prostředků vynaložených na pořízení zařízení. To nejlépe vystihuje prostá doba návratnosti. Tato metoda zohledňuje investiční náklady daného zařízení a roční peněžní tok (cashflow). Z jejich poměru je pak získána doba návratnosti zařízení. Investiční náklady není třeba počítat, ty jsou jasně dány. V případě cashflow hraje roli několik parametrů, z nichž jsou v tomto případě uvažovány pouze některé. Níže jsou uvedeny všechny ekonomické parametry, se kterými je v hodnocení počítáno:

- Doba životnosti – doba, po kterou je zařízení provozováno, tzn. doba, po kterou je hodnocena jeho ekonomická efektivnost,
- Investiční náklady – celková částka investovaná na začátku projektu (v prvním roce), může být využito buď vlastního, nebo zapůjčeného kapitálu (úvěru),
- Roční výnosy – výnos za jeden rok, který plyne z provozování zařízení,
- Daň – předpokládá se, že každý rok je odváděna daň z příjmu, plynoucího z provozu zařízení – provozovatelem je v tomto případě PE, takže daňová sazba bude dle zákona 19 %,
- Čistý zisk – celkový zisk po splacení investičních nákladů (uplynutí doby návratnosti) plynoucí z provozu zařízení během jeho životnosti, ponížený o daň z příjmu.

Dále jsou uvedeny ekonomické parametry, se kterými by se správně mělo také počítat, ale z různých důvodů jsou v tomto případě zanedbány:

- Úvěr – částka zapůjčená investorem na pořízení zařízení, splácena je pravidelnými splátkami – pro velké investice, jaké jsou zde uvažovány, by pravděpodobně byl úvěr nutný, nicméně pro zjednodušení není zahrnut,
- Inflace – opakovaný růst cen v ekonomice, průměrná inflace v roce 2015 byla 0,3 %, za posledních 10 let však fluktovala mezi 0 % a 7 %. Není možné korektně

předpovědět její míru v příštích 10 nebo 20 letech. Inflace není ve výpočtu uvažována,

- Provozní náklady – každé zařízení by vyžadovalo určité finanční náklady na svůj provoz, pro správné porovnání systémů by tyto náklady měly být zahrnuty v ekonomickém hodnocení každého návrhu. Bohužel se nepodařilo získat provozní náklady pro všechny zkoumané technologie, proto nejsou tyto náklady uvažovány v žádném z návrhů,
- Stavební úpravy – některé technologie vyžadují umístění do vnitřních prostor, jiné mohou být provozovány ve venkovním prostředí. Případná stavba hal nebo jiné stavební úpravy nejsou v hodnocení návrhů zahrnuty.
- Ostatní vícenáklady – realizace jednotlivých návrhů by vyžadovala investice do dalších zařízení, nutných pro provoz technologií (trafostanice, apod.). Tyto vícenáklady rovněž v hodnocení nejsou zahrnuty

Pro výpočet doby návratnosti byl sestaven jednoduchý kalkulátor v prostředí MATLAB, který po zadání vstupních hodnot vypočte roční čistý zisk, čistý zisk za dobu životnosti a dobu návratnosti. Vstupní hodnoty jsou získány z návrhů jednotlivých zařízení. Jsou to:

- Investiční náklady v Kč/kWh,
- Kapacita zařízení v MWh,
- Životnost zařízení v letech,
- Účinnost v %,
- Počet cyklů denně,
- Počet dní v roce, během kterých bude zařízení v provozu.

#### *Postup výpočtu doby návratnosti*

Nejprve je potřeba znát investiční náklady IN každého zařízení. Výrobci většinou udávají přibližnou cenu za 1 kWh. Celkové IN jsou pak jednoduše určeny jako součin ceny za 1 kWh a požadované kapacity zařízení. Dále je nutno určit CF, tj. roční čistý zisk. Ten je vypočítán pomocí rovnice (3):

$$CF = 2\,351 \cdot W_C \cdot \frac{\eta}{100} \cdot \text{cykly} \cdot \text{dny} \cdot 0,81, \quad (3)$$

kde  $W_C$  je kapacita zařízení,  $\eta$  je jeho účinnost,  $\text{cykly}$  je denní počet cyklů a  $\text{dny}$  počet provozních dní v roce. Konstanta 2 351 je zisk plynoucí z akumulace a následného uvolnění 1 MWh elektřiny a konstanta 0,81 představuje daň z příjmu 90 %. Potom je možné určit prostou dobu návratnosti  $T_S$  jako podíl  $IN$  a  $CF$ :

$$T_S = \frac{IN}{CF}, \quad (4)$$

Na závěr je spočítán čistý zisk  $Z$  za dobu životnosti zařízení:

$$Z = CF \cdot (T_{\dot{z}} - T_S), \quad (5)$$

kde  $Z$  je čistý zisk za dobu životnosti,  $T_{\dot{z}}$  je doba životnosti a  $T_S$  doba návratnosti. Pokud je doba návratnosti kratší než doba životnosti, zařízení vykazuje ztrátu, tj. záporný čistý zisk.

Po zadání vstupních hodnot kalkulátor ověří, zda jsou v povolených mezích (např. není-li účinnost větší než 100 %). Následně kalkulátor vypočte investiční náklady dle kapacity zařízení, roční čistý zisk, čistý zisk za dobu životnosti a dobu návratnosti. Ve výpočtu je zahrnuta zmíněná daň z příjmu 19 % a výnos z akumulace 1 MWh elektřiny 2 351 Kč. Tato cena by se během doby životnosti mohla měnit, ale protože z dostupných dat není možné předpovědět její vývoj, je počítáno s touto fixní hodnotou. Vypočtené výsledky kalkulátor vypíše uživateli na obrazovku. Skript tohoto kalkulátoru je uveden v Příloze 18. Skript je použitelný pro všechny typy akumulačních zařízení a je proto univerzálním nástrojem pro výpočet doby návratnosti.

Jelikož v tomto ekonomickém hodnocení nejsou zahrnuty všechny ekonomické parametry a jsou provedena některá zjednodušení, není tento postup zcela přesný, ale pro zhodnocení a porovnání systémů je naprosto postačující.

### 5.3 Integrace technologií do provozu teplárny

Řešení problému je možné provést ve dvou rovinách. Tou první je akumulace elektřiny ve vhodném zařízení a její následné uvolnění do sítě. Druhou možností je transformace elektrické energie na tepelnou a následnou akumulaci a využití této tepelné energie. Nejprve je zhodnocena první varianta, tj. akumulace elektřiny pomocí Na-S baterie, VRB baterie a superkapacitorů. Tyto systémy se dle teorie v první části práce nejvíce hodí pro použití v tomto konkrétním případě. Ve všech návrzích bude nejprve uvažována akumulace 8 MWh elektrické energie, poté akumulace 1 MWh.

#### *Připojení do systému vlastní spotřeby*

Všechny řešené varianty by byly zapojeny v systému vlastní spotřeby. Jak bylo řečeno v kapitole 4.3, jde o systém vnitřní elektrické sítě teplárenského provozu včetně napojení na distribuční síť. S ohledem na to, že v případě vybraných akumulátorů se jedná o zapojení stejnosměrného zdroje do střídavé soustavy, je nezbytné použití vhodného měniče. Ten již bývá součástí technologie, jeho cena se dle výstupní napěťové hladiny přitom může lišit. Pro technologii PE lze uvažovat výstupní napětí v rozmezí 0,4 až 6 kV. Jeden ze stávajících rozvaděčů 6 kV umožňuje připojení jednotek o výkonu do 1 MW, pro větší zařízení nejsou rozvaděče dimenzovány. Proto je nezbytné uvažovat výstavbu samostatné odbočky z hlavní přípojnice 22 kV a zařízení na ni připojit přes vhodný transformátor. To vede ke zvýšení investičních nákladů, které by správně měly být zohledněny v ekonomickém zhodnocení technologií.

S ohledem na stejný technologický požadavek i u dalších analyzovaných technologií a absenci detailních technických informací (nabídek pro konkrétní parametry) u některých z těchto technologií, nebyly tyto vícenáklady ve vzájemném porovnání uvažovány. Zároveň by na transformátoru byly při provozu ztráty, čímž by se snížila celková účinnost zařízení. Jelikož je tato práce dle zadání řešena především v rovině srovnání vlastních technologií, tyto ztráty a snížení účinnosti jsou v ekonomickém hodnocení rovněž zanedbány. To platí pro obě varianty návrhů (8,64 MWh i 1,2 MWh).



### *Umístění systémů v areálu teplárny*

Umístění jednotlivých technologií v prostoru teplárny by v praxi bylo obtížnou záležitostí. V areálu je málo místa a jeho případné rozšíření či dokoupení pozemků není možné, protože teplárna je téměř ze všech stran obklopena ostatními průmyslovými podniky. Rozhodujícím faktorem při hodnocení jednotlivých variant jsou proto spolu s ekonomickými parametry také jejich prostorové nároky.

## 5.4 Na-S akumulátor

Dle (Tab. 1) v kapitole 2.2 se jako nejvýhodnější z baterií jeví technologie Na-S. Díky své vysoké energetické hustotě klade nejmenší prostorové nároky a to je pro aplikaci v teplárně velmi důležité. Zároveň spolu s VRB akumulátory dosahuje nejvyšší životnosti. Důležitým faktorem je rovněž účinnost, která může šplhat až k devadesáti procentům, což je rovněž ze všech zkoumaných baterií nejvíce. Relativně příznivá je i cena technologie, i když ta se může lišit dle jednotlivých výrobců. Jedinou nevýhodou je vysoká operační teplota 300-350 °C, která je nezbytná pro udržení elektrod v kapalném stavu.

Pro instalaci v teplárně ELÚ III byly vybrány Na-S baterie od firmy NGK Insulators Ltd. Tato japonská společnost dodává baterie do Asie, Evropy, Severní Ameriky a je předním světovým výrobcem Na-S baterií. Dle dostupných informací vyrábí pro velké projekty dva typy zařízení. Prvním typem jsou unifikované moduly o kapacitě 300 kWh, které se standardně skládají po dvaceti kusech do velkých jednotek o kapacitě 6 MWh. Druhým typem jsou jednotky 8,64 MWh, sestávající ze 40 modulů o kapacitě 216 kWh. V tomto konkrétním případě je žádaná kapacita v první variantě 8 MWh (dle analýzy v předchozí kapitole), pro její naplnění by tak bylo nutné použít jednu jednotku 8,64 MWh. Kapacita by tak byla lehce vyšší, ale dle průběhu denních systémových odchylek by byla využita. Pro variantu s 1 MWh je též nutné udělat lehkou korekci žádané kapacity, neboť složením modulů o kapacitě 300 kWh, ani 216 kWh se nikdy nedosáhne celkové kapacity přesně 1 MWh. Proto bude pro druhou variantu řešení uvažováno použití 4 modulů 300 kWh, celková kapacita jednotky tak bude 1,2 MWh.



Obr. 19: Sestavení Na-S akumulátoru [28]

### 5.4.1 Charakteristika systému

Jak už bylo uvedeno, pro tento případ byly vybrány baterie od firmy NGK Insulators Ltd. Tato společnost byla požádána o spolupráci a poskytnutí informací o parametrech a ceně technologie. Bohužel ani na opakované žádosti nepřišla žádná reakce, a tak byly informace dohledány na internetových stránkách společnosti. Cena technologie byla stanovena ze zveřejněných nákladů na realizaci jednoho ze zařízení od této firmy. Níže uvedené parametry jsou proto zčásti obecné, avšak pro teoretický návrh postačují.

Každá jednotka se skládá z menších modulů. Ty jsou složeny z jednotlivých Na-S článků, pospojovaných v sério-paralelní kombinaci (Obr. 19). Každý modul je tepelně izolován a ohříván interním ohříváčem, jenž udržuje pracovní teplotu v daném rozmezí. Součástí zařízení je řídicí jednotka, obsahující důležité komponenty (PLC,...). Rozměry jednotlivých modulů se liší v závislosti na jejich kapacitě. Hlavní parametry zařízení jsou následující: [28]

- Životnost 4 500 cyklů – je garantována životnost 15 let při 300 cyklech/rok, v případě vyššího počtu cyklů by se snížila,
- Účinnost 85 % při práci do stejnosměrné sítě, přes 75 % při práci do střídavé sítě,
- Cena 408 EURO/kWh (11 016 Kč/kWh při kurzu EURO/Kč = 1/27),
- Necitlivost vůči okolním teplotám v rozsahu od -20 do +40 °C,
- Doba vybíjení do 7,2 hodiny, je však závislá na výkonu a kapacitě,
- Přejechod z režimu nabíjení do režimu vybíjení do 2 ms,
- Absence hluku, vibrací, emisí – možnost vnitřního i venkovního použití,
- Vysoká reaktivita kapalného sodíku s kyslíkem – nebezpečí výbuchu,
- Minimální údržba.

### 5.4.2 Praktické řešení návrhu

#### *Velikost a umístění*

V případě první varianty by byla instalována jedna jednotka o kapacitě 8,64 MWh a výkonu 1,2 MW. V ní je uspořádáno 40 modulů, každý o kapacitě 216 kWh a výkonu 30 kW. Udávané rozměry takto složené jednotky jsou: 10,2/4,4/4,8 m. Jednotka by tak zabrala plochu minimálně 44,9 m<sup>2</sup> při výšce téměř 5 m. Hmotnost jednotky je 132 t. Výhodou

technologie je to, že není nutné ji umisťovat do vnitřních prostor, neboť jednotlivé moduly i celé jednotky jsou dobře izolovány od vnějšího prostředí a mohou být instalované ve venkovním prostranství. V naprosté většině stávajících instalací (v USA, v Japonsku) jsou tyto systémy také skutečně provozovány jako venkovní varianta. Tím odpadá nutnost zastřešeného objektu (haly) a technologie se stává levnější.

Pro případ varianty 1,2 MWh neudává společnost standardní rozměry jednotky, lze je ale odvodit ze základních rozměrů modulu. Pro tento případ by byla zvolena sestava 4 modulů o kapacitě 300 MWh a výkonu 50 kW ve dvou řadách po dvou kusech. Rozměry tohoto modulu jsou 2196/1678/610 mm, což znamená plochu jednotky minimálně 7,4 m<sup>2</sup> při výšce 1,2 m.

### *Účinnost*

Výrobce uvádí hodnotu účinnosti 85 % při práci do stejnosměrné sítě a minimálně 75 % při práci do střídavé sítě. Maximální účinnost pro střídavé napětí není uvedena, a proto je v modelu počítáno se 75 %, jakožto nejhorším možným případem. Účinnost je přirozeně rovněž stejná pro obě varianty.

### *Počet cyklů*

Doba vybíjení jednotky 8,64 MWh je standardně 7,2 h, pokud zařízení pracuje s výkonem 1,2 MW. Ten se ale dá téměř libovolně zvýšit, a tím se urychlí uvolnění energie. V případě velkého navýšení výkonu ale stoupá pracovní teplota zařízení, zvyšuje se zatěžování ohřívače a to je spojeno se snižováním životnosti zařízení. Dle průběhu systémových odchylek je zřejmé, že jednotku by bylo možné nabíjet a vybíjet téměř každý den v roce s výjimkou dní, kdy vůbec nenastává záporná systémová odchylka v síti anebo kdy trvá pouze 1 hodinu. Za tak krátkou dobu by totiž nebylo možné zařízení zcela vybit (za normální provozní teploty), tudíž jeho použití v těchto dnech není výhodné. Tato situace nastává zhruba v 6 % dní v roce, což představuje asi 22 dní. Po tyto dny by zařízení nebylo v provozu, ve zbylých 343 dnech by bylo možné provést 1 cyklus denně. Pro dosažení garantované životnosti 15 let by zřejmě byl nejvýhodnější počet cyklů 300/rok, nicméně pro porovnání je uvažován počet cyklů 343 i 300 za rok.

Pro variantu 1,2 MWh je doba vybíjení kolem 1 hodiny při výkonu 1,2 MW. Záporné odchylky ve výši 1,2 MWh nastávají dle statistického vzorku v 97,6 % případů a to představuje 356 dní. Během těchto dní by zařízení bylo v provozu. Kratší vybíjecí doba by umožňovala vyšší počet cyklů za den, dle průběhu systémových odchylek průměrně více než 8. Takové množství cyklů by ale velmi výrazně zkracovalo životnost zařízení, již při 2 cyklech denně by se životnost snížila na 6 let. Proto jsou v ekonomickém hodnocení opět uvažovány varianty s jedním a dvěma cykly denně při provozu 356 dní v roce a jeden cyklus denně při provozu 300 dní v roce. Všechny možnosti jsou porovnány. Při více než 2 cyklech denně už by se životnost zařízení snížila natolik, že takový režim nemá smysl uvažovat. Přehledně jsou jednotlivé varianty a jejich stanovené parametry uvedeny v následující tabulce (Tab. 5). [28]

Tab. 5: Parametry variant Na-S akumulátorů

Kapacita [MWh]	8,64		1,2		
Standardní doba vybíjení [h]	7,2		1		
Účinnost [%]	75		75		
Cena [Kč/kWh]	11016		11016		
Plocha/výška [m <sup>2</sup> /m]	44,9/4,8		7,4/1,2		
Denní počet cyklů	1	1	2	1	1
Počet provozních dní	343	300	356	356	300
Životnost [roky]	13,2	15	6,3	12,6	15
Číslo varianty	1	2	3	4	5

### 5.4.3 Ekonomické zhodnocení

Parametry z (Tab. 5) byly využity jako vstupní hodnoty pro vypočtení ekonomické efektivnosti ve zmíněné kalkulačce. Po jejich zadání program vypočetl všechny určené ekonomické ukazatele. V tabulce níže (Tab. 6) jsou shrnuty vypočtené ekonomické parametry pro všechny varianty návrhu:

Tab. 6: Ekonomické parametry variant Na-S akumulátoru

Číslo varianty	1	2	3	4	5
Investiční náklady [mil. Kč]	95,18	88,13	13,22	13,22	13,22
Roční čistý zisk [mil. Kč]	4,23	3,7	1,22	0,61	0,51
Doba návratnosti [roky]	22,5	25,7	10,8	21,7	25,7
Životnost [roky]	13,2	15	6,3	12,6	15
Čistý zisk za dobu životnosti [mil. Kč]	-39,34	-39,65	-5,53	-5,53	-5,51

Jak je vidět z tabulky, ani jedna z uvažovaných variant nevykazuje kladný čistý zisk za dobu životnosti technologie. Je to způsobeno tím, že doba životnosti je kratší než doba návratnosti, a tudíž nemůže dojít ke splacení investičních nákladů a přechodu do zisku. Nejlépe vychází z ekonomického pohledu varianta číslo 3, což je zařízení s kapacitou 1,2 MWh, umožňující 2 cykly denně 356 dní v roce. Doba návratnosti je v tomto případě ze všech návrhů nejkratší. Lze říci, že pořizovací cena technologie Na-S je v současnosti tak vysoká, že při použití pro regulaci systémových odchylek je ekonomicky nevýhodná a v tomto provozu se nevyplatí. Je ale možné předpokládat, že v budoucnu dojde k poklesu ceny, neboť v současné době je tato technologie poměrně nová a po jejím rozšíření by mohlo dojít ke zlevnění.

## 5.5 VRB akumulátor

Jako druhá možnost využití baterií byly vybrány vanadové redoxní průtočné akumulátory, které se po Na-S bateriích jeví jako druhá nejvýhodnější alternativa. Jak je uvedeno v kapitole 2.2.2, hlavní předností technologie je vysoká životnost, která může překročit až 10 000 cyklů, a rovněž poměrně dobrá účinnost, jež může dosáhnout až 80 %. Oproti technologii Na-S je zde ale podstatná nevýhoda, kterou je nejnižší energetická hustota ze všech zkoumaných akumulátorů (15 – 25 Wh/kg), ale naopak nejvyšší cena. Důvodem výběru VRB baterie byla rovněž skutečnost, že v roce 2015 byla v teplárně ELÚ III vypracována studie využitelnosti těchto systémů. Tato studie se zabývala využitím baterií od společnosti Nixin Energy, a může být proto rovněž zajímavé její srovnání se systémem popsaným níže.

Pro tuto práci byly pro použití v teplárně ELÚ III vybrány VRB akumulátory od firmy Gildemeister. Zároveň byla z důvodu možného porovnání oslovena společnost Nixin, avšak ze strany firmy nedošlo k žádné reakci. Firma Gildemeister dodává baterie do Asie, Ameriky, Evropy i Austrálie a již dosáhla počtu 8 000 instalací. Podobně jako v předchozím případě, má i tato společnost své standardizované jednotky, které nabízí. Jednotky se rovněž sestavují z jednotlivých modulů, nazývaných CellCube (Obr. 19).

Pro větší energetické projekty společnost vyrábí jednotky o celkové kapacitě 6,4 MWh, 8 MWh a 16 MWh. Požadované kapacitě 8 MWh pro první variantu odpovídá prostřední zařízení, což je vhodné i pro porovnání s technologií Na-S. Proto je vybrána jednotka 8 MWh. Pro variantu 1 MWh společnost nabízí jednotku 1,2 MWh, což je rovněž ideální pro porovnání.



Obr. 19: Modul CellCube FB 200-400 [31]

### 5.5.1 Charakteristika systému

Obdobně jako u technologie Na-S i zde se jednotky skládají z menších modulů, zvaných CellCube FB 200-400. Ty mají kapacitu 400 kWh a výkon 200 kW. Moduly jsou rozdělené na dvě části; v jedné se nachází obě nádrže s vanadovým elektrolytem (pozitivní a negativní) a čerpací systém, který pumpuje elektrolyt. Ve druhé části je řídicí systém, výkonová elektronika, apod. Uvnitř modulu je řídicím systémem udržována teplota mezi 20 - 30 °C nezávisle na okolní teplotě. Moduly jsou dobře izolovány, takže jsou použitelné v rozličných klimatických podmínkách. Důležité parametry zařízení dle katalogu poskytnutým společností Gildemeister (Příloha 13, 14) jsou: [31]

- Téměř neomezený počet cyklů – výrobce udává životnost minimálně 20 let
- Účinnost přes 80 %
- Cena 800 EURO/kWh (21 600 Kč/kWh při kurzu EURO/Kč = 1/27)
- Necitlivost vůči okolním teplotám v rozsahu od -40 do +50 °C
- Doba vybíjení do 6,5 hodiny, je však závislá na výkonu a kapacitě
- Doba při přepnutí z režimu nabíjení do režimu vybíjení je řádově ms
- Hloubka vybití 100 %
- Bezpečnost – nehořlavost a nevýbušnost (výhoda oproti Na-S bateriím)



## 5.5.2 Praktické řešení návrhu

### *Velikost a umístění*

Jak již bylo uvedeno, pro první variantu by byla zvolena jednotka o kapacitě 8 MWh a nominálním výkonu 1 MW. Standardně se skládá tak, že ze 4 modulů CellCube FB 200-400 se sestaví jakási prvojednotka CellCube FB 400-1600 a teprve složením těchto 5 prvojednotek vznikne finální jednotka s kapacitou 8 MWh. Rozměry modulu jsou 6 060/2 440/5 800 mm. Rozměr celé jednotky není výrobcem udáván, avšak vzhledem k tomu, že moduly se pouze skládají do prvojednotek ve 2 řadách po 2 kusech, lze dopočítat, že bude asi 12,1/24,4/5,8 m. Celkově by pro zařízení byla nutná plocha minimálně 295,2 m<sup>2</sup> a výška necelých 6 m.

Pro druhý případ byla vybrána jednotka o kapacitě 1,2 MWh a jmenovitém výkonu 600 kW. Byla by složena ze tří modulů CellCube FB 200-400 a s rozměry 6,1/7,3/5,8 m by tak byla výrazně menší, vyžadovala by plochu 44,5 m<sup>2</sup>. Z toho plyne, že jednotka VRB baterií o kapacitě 1,2 MWh by zabrala téměř stejnou plochu jako jednotka Na-S baterií o kapacitě 8 MWh.

### *Počet cyklů*

Doba vybíjení celé jednotky je 4 – 10 hodin dle výkonu zařízení (Příloha 14). Jednotka je tedy schopna uvolnit energii nejdříve za 4 h. K tomu je potřeba záporná systémová odchylka v síti alespoň na 4 h denně. Dle grafu na (Obr. 18) toto nastává v 84,4 % dní v roce. To představuje více než 300 dní. Pro možnost 2 cyklů denně je potřeba záporná odchylka trvající 8 h. Ta nastává přibližně v polovině dní v roce, tj. asi 180 dní. Ve 180 dnech by tak zařízení prodělalo 2 cykly denně, během 120 dní pouze 1 cyklus a ve zbylých dnech by nepracovalo vůbec, neboť doba trvání příslušné záporné odchylky je příliš krátká. Počet cyklů za rok by tak byl asi 480 a to je průměrně 1,6 cyklu/den. Výhodou je, že počet cyklů není u této technologie omezen, takže častější používání nevede ke snižování životnosti.

V případě druhé varianty je doba vybíjení jednotky 1 hodina. To by znamenalo, že během dne by teoreticky akumulátor mohl dle průběhu systémových odchylek projít v průměru až 8 cykly. Takové množství cyklů by se už ale projevilo na degradaci částí zařízení

(čerpadla, membrány), což by snížilo jeho životnost. Výrobce doporučený počet cyklů je 1-4, proto by zařízení nemělo být používáno vícekrát než 4 cykly/den. Zohlední-li se dny, ve kterých vůbec nenastává záporná systémová odchylka (dle statistického vzorku 2,4 %) a zařízení tak nemůže být v chodu, znamená to, že počet provozních dní se 4 cykly/den je asi 356. To by znamenalo výraznou výhodu oproti Na-S bateriím, neboť technologie VRB by celkem mohla projít asi 1 400 cykly za rok.

Výrobce udává účinnost přes 80 %, avšak stejně jako v případě Na-S technologie je počítáno s nejhorsím možným případem, tedy s nejnižší účinností 80 %. V tabulce níže (Tab. 7) jsou shrnuty všechny potřebné parametry obou variant návrhů:

Tab. 7: Parametry variant VRB akumulátorů

Kapacita [MWh]	8	1,2
Standardní doba vybíjení [h]	4	1
Účinnost [%]	80	80
Cena [Kč/kWh]	21600	21600
Plocha/výška [m <sup>2</sup> /m]	295,2/5,8	44,5/5,8
Denní počet cyklů	1,6	4
Počet provozních dní	300	356
Životnost [roky]	20	20

### 5.5.3 Ekonomické zhodnocení

Stejně jako v případě technologie Na-S byly parametry z (Tab. 7) zadány do kalkulátoru jako vstupní hodnoty. Výsledky pro obě varianty jsou uvedeny v (Tab. 8):

Tab. 8: Ekonomické parametry variant VRB akumulátoru

Kapacita [MWh]	8	1,2
Investiční náklady [mil. Kč]	172,8	25,92
Roční zisk [mil. Kč]	5,85	2,6
Doba návratnosti [roky]	29,5	10
Životnost [roky]	20	20
Čistý zisk za dobu životnosti [mil. Kč]	-55,8	26,15

Je tedy zřejmé, že instalace zařízení o kapacitě 8 MWh by se nevyplatila z důvodu dlouhé doby návratnosti. Udávaná doba životnosti 20 let sice může být v praxi delší, avšak potom

už zařízení pracuje s horšími parametry. Není proto jisté, zda by zařízení bylo schopné při delší životnosti dosáhnout splacení a přechodu do zisku.

Pro zařízení s kapacitou 1,2 MWh je situace mnohem příznivější. Kratší doba návratnosti umožňuje splacení investice do 10 let a následně čistý celkový zisk přes 26 miliónů Kč při každoročním zisku 2,6 miliónu Kč za dobu životnosti 20 let. Oproti první variantě a technologii Na-S totiž umožňuje vyšší počet cyklů bez snížení životnosti. Tím se zvyšují výnosy a zkracuje doba návratnosti. Souhrnně lze říci, že akumulátor VRB je ekonomicky daleko výhodnější než technologie Na-S a pro regulaci systémové odchylky je možné ji použít.

Zajímavé je srovnání se zmiňovanou studií, která byla v teplárně vypracována roku 2011. Dle této studie vycházela doba návratnosti zařízení o kapacitě 1 MWh 16 let, přičemž v ročním zisku nebyla uvažována daň z příjmu, tudíž při jejím zahrnutí by ekonomická návratnost vycházela ještě hůře. Tento výrazný rozdíl oproti současnému návrhu je způsoben zejména snížením ceny technologie (v roce 2011 byla cena VRB téměř čtyřikrát větší než dnes) a prodloužením životnosti. Lze předpokládat, že cena bude klesat i v budoucnu a technologie VRB se tak může v příštích letech stát ještě daleko výhodnější.

## 5.6 Superkapacitory

Třetí využitelnou technologií pro akumulaci elektrické energie v teplárně ELÚ III jsou superkapacitory. Dle (Tab. 2) v kapitole 2.6 mají nabíjecí i vybíjecí čas v řádu minut, což z nich dělá v tomto směru nejvýhodnější zařízení ze všech uvažovaných systémů. Lze předpokládat, že oproti Na-S a VRB akumulátorům budou umožňovat superkapacitory podstatně větší denní počet cyklů. Případné omezení bude představovat pouze doba životnosti, která je ale též delší, než v případě baterií. Další výhodou oproti předchozím zařízením je účinnost, která je většinou přes 90 %, což umožňuje efektivnější akumulaci elektřiny.

Na druhou stranu, superkondenzátory mají dle (Tab. 3) v kapitole 2.8, nejnižší energetickou hustotu ze všech systémů. Ta může být až desetkrát menší, než je tomu v případě baterií. To znamená, že pro větší energetické projekty má technologie značné prostorové nároky a v praxi je proto její použití ve velkých jednotkách velmi omezené. Další nevýhodou je vysoká cena, která je rovněž téměř nejvyšší ze všech popsanych technologií a pravděpodobně bude výrazně zhoršovat ekonomickou efektivnost návrhu.

Pro případ použití v teplárně byly vybrány superkapacitory od společnosti Tecate Group. Tato firma z USA dodává pro energetické účely superkapacitory Maxwell. Aplikační oblastí jsou zejména větrné a fotovoltaické elektrárny, ale společnost je schopna sestavit a dodat téměř libovolnou jednotku dle zadání pro jakoukoli aplikaci. Stejně jako v případě baterií i zde jsou jednotky sestavovány z menších modulů a ty zase sestávají z jednotlivých článků. Největším modulem je typ BMOD P125 B08 o kapacitě 140 Wh. Je sestaven ze 48 článků.



Obr. 20: Modul BMOD P125 B08 [32]

### 5.6.1 Charakteristika systému

Po komunikaci s firmou Tecate Group byla získána specifikace produktu (Příloha 15 - 17) včetně přibližné ceny. Vybraný modul o kapacitě 140 Wh má výstupní napětí 128 V DC. Nevýhodou oproti předchozím dvěma návrhům je to, že jeho součástí není měnič, který by tak musel být dodatečně přikoupen. To by zvýšilo investiční náklady a současně snížilo celkovou účinnost. Dodatečné použití měniče zde pro zjednodušení není uvažováno. Modul by s přihlédnutím ke svým rozměrům a ceně byl použitelný pouze pro variantu návrhu 1,2 MWh. Vzhledem k velmi nízké energetické hustotě by jednotka v případě 8 MWh byla tak obrovská, že její realizace by byla nereálná jak ekonomicky, tak technicky, a proto zde není uvažována. Charakteristické parametry modulu BMOD P125 B08 jsou: [32]

- Životnost 10 let (1 000 000 cyklů) při teplotě 25 °C, při vyšších teplotách se může snížit až na 1 500 h
- Účinnost přes 95 %
- Cena 13 440 USD/kWh (322 560 Kč/kWh při kurzu USD/Kč = 1/24)
- Kapacita 140 Wh
- Energetická hustota 2,3 Wh/kg
- Rozsah pracovních teplot od -40 °C do +60 °C, při zvyšování teploty se ale snižuje životnost
- Doba vybíjení 60 s
- Hloubka vybití 100 %

### 5.6.2 Praktické řešení návrhu

#### *Velikost a umístění*

Dle specifikace jsou rozměry modulu: 619/350/313 mm. Pro dosažení celkové kapacity 1,2 MWh je nutný počet modulů 7 143. Moduly by byly uspořádány do 18 dílčích jednotek. Každá jednotka by měla kapacitu 67,2 kWh a skládala by se ze 480 modulů. Ty by byly uspořádány do 3 řad, každá řada by obsahovala 10 sloupců po 16 modulech. Rozměry takové jednotky by byly: 6,2/1,1/5 m. Plocha jednotky by pak vycházela téměř 7 m<sup>2</sup>. Složením 18 takových jednotek by vzniklo zařízení o kapacitě 1,2 MWh vyžadující plochu minimálně 126 m<sup>2</sup> a výšku 5 m. Pokud by bylo uvažováno o návrhu zařízení s kapacitou 8

MWh, lze jednoduše odvodit, že jeho plocha by byla více než 1 km<sup>2</sup>, což je zcela nereálné. Proto, jak již bylo řečeno výše, takové zařízení není uvažováno. Jelikož životnost zařízení závisí na okolní teplotě, bylo by nutné umístit technologii do haly a tím by dále narostly investiční náklady. Případná stavba haly zde není uvažována.

### Počet cyklů

Jelikož denní počet cyklů u této technologie není omezen, je možné k jeho určení využít průměrnou dobu trvání systémové odchylky o velikosti 1 MWh. Dle kapitoly 5.1 je průměrná doba trvání takové odchylky 15,2 h denně pro kladnou odchylku, zatímco pro zápornou odchylku je to 8,7 h denně. Doba vybíjení je dle specifikace kolem 1 min, to znamená, že zařízení by mohlo reagovat ne pouze na hodinové odchylky, jak je tomu u baterií, ale rovněž na minutové odchylky, zobrazené na (Obr. 17) v kapitole 5.1. Dalo by se tudíž rovněž uvažovat o nasazení systému pro podpůrné služby jako minutová záloha (MZ5, MZ10). Dle (Obr. 17) trvají odchylky v síti řádově několik minut až hodinu, nedá se proto uvažovat o využití superkapacitorů častějším, než 2 cykly za hodinu. Během celého dne se tak dá uvažovat maximálně o 20 cyklech. V (Tab. 9) jsou shrnuty všechny parametry systému, nutné pro výpočet ekonomické efektivity.

Tab. 9: Parametry návrhu superkapacitorů

Kapacita [MWh]	1,2
Standardní doba vybíjení [h]	1 min
Účinnost [%]	95
Cena [Kč/kWh]	322560
Plocha/výška [m <sup>2</sup> /m]	126/5
Denní počet cyklů	20
Počet provozních dní	365
Životnost [roky]	10

### 5.6.3 Ekonomické zhodnocení

Hodnoty z předchozí tabulky byly zadány jako vstupní parametry do programu pro výpočet ekonomické efektivity. Vypočtené ekonomické parametry jsou:

Tab. 10: Ekonomické parametry návrhu superkapacitorů

Investiční náklady [mil. Kč]	387,07
Roční zisk [mil. Kč]	15,85
Doba návratnosti [roky]	24,4
Životnost [roky]	10
Čistý zisk [mil. Kč]	-228,57

Je zřejmé, že cena superkapacitorů je podobně jako v případě Na-S baterií v současnosti příliš vysoká na to, aby se vyplatilo jejich nasazení tímto způsobem v provozu teplárny. Roční zisk je příliš nízký, než aby stihl alespoň vyrovnat investiční náklady během doby životnosti technologie. Ta je navíc pouze 10 let, což je v energetickém průmyslu příliš málo. Zařízení by se tak dostalo do velmi výrazné ztráty a zjevně by nebylo možné ho z ekonomického pohledu instalovat. V praxi by na hodnocení měly rovněž vliv použité měniče, které by hodnocení ještě zhoršily.

Ekonomika návrhu by mohla být lepší pouze v případě, že by se životnost řídila nikoli stanoveným počtem let, ale počtem cyklů, jež by zařízení mělo zvládnout, tj. 1 000 000 cyklů. Pak by životnost zařízení mohla trvat téměř 137 let, což je ale také nereálná hodnota. Sám výrobce upozorňuje, že životnost závisí na způsobu použití, a proto je obtížné stanovit přesnou dobu životnosti systému. I kdyby ale životnost zařízení byla dvakrát delší, tj. 20 let, pořád by byla nižší než doba návratnosti a investice by byla stále ztrátová, i když už méně výrazně. Z toho vyplývá, že použití superkapacitorů pro akumulaci elektřiny ve velkých jednotkách není v energetice v současnosti vhodné, což se shoduje s tvrzeními, uvedenými v teoretickém úvodu.

## 5.7 Využití elektrokotle

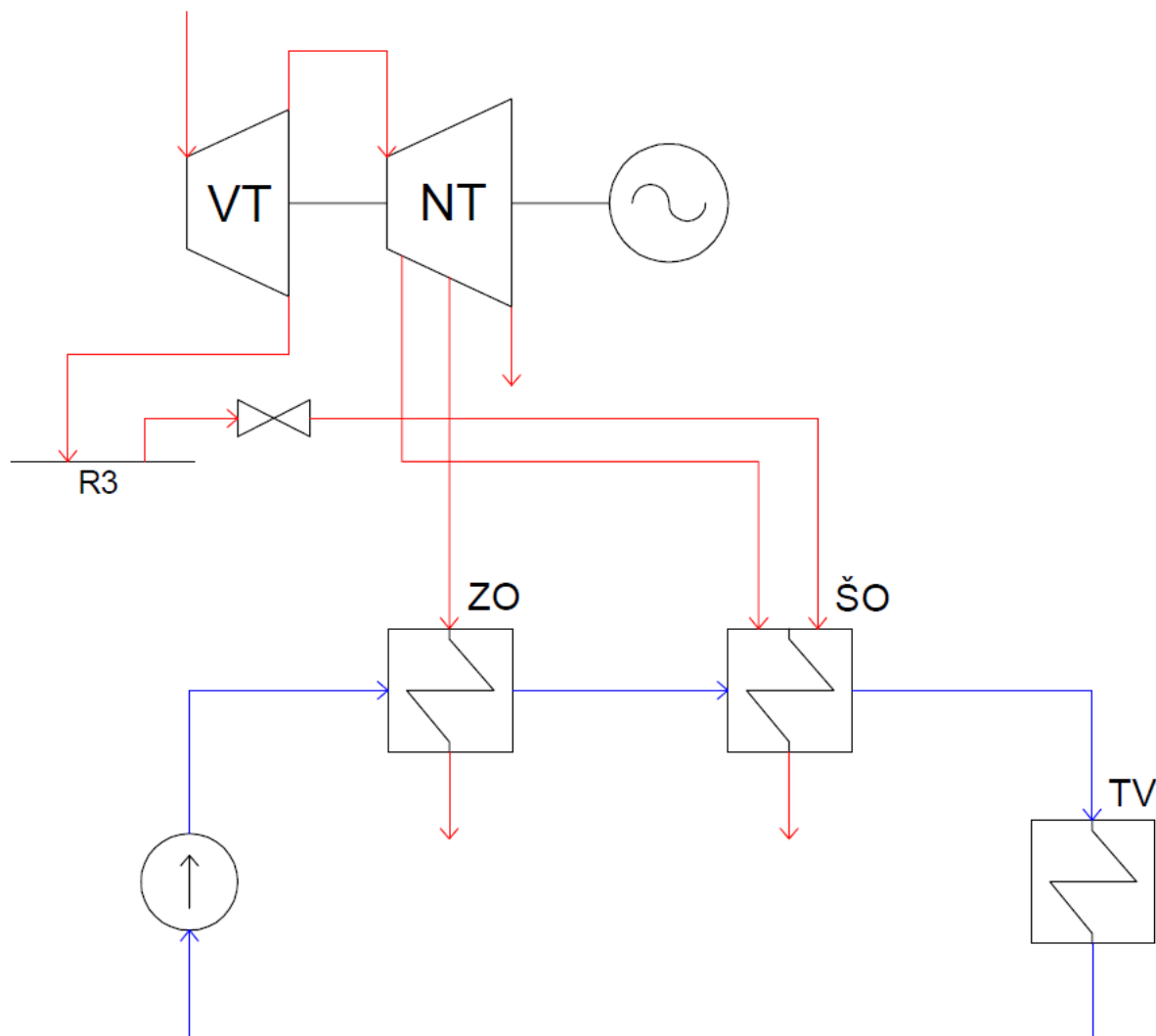
Jako poslední varianta využití přebytečné elektrické energie v síti byl vybrán elektrokotel. Nejedná se o akumulaci elektrické energie, ale její transformaci na energii tepelnou a její následné využití v provozu teplárny. Elektrokotel by tak měl využívat pouze kladné odchylky v přenosové soustavě. S ohledem na cenu kladných odchylek lze i tímto způsobem zlepšit ekonomiku provozu teplárny. Pro tento případ byl zvolen horkovodní elektrokotel s elektrodoovým ohřevem z důvodu vysoké účinnosti blížící se 100 %.

### 5.7.1 Princip odběru tepla z teplárny ELÚ III

Nejprve je potřeba blíže rozebrat způsob, jakým je v teplárně v současnosti ohřívána voda pro vytápění. To znázorňuje obrázek níže (Obr. 21). Jde o detail části okruhu K3-TG9 (Obr. 14). Ohřev vody v horkovodu je zabezpečen dvěma ohříváky, základním (ZO) a špičkovým (ŠO). Voda je hnána čerpadlem skrz tyto ohříváky, kde je ohřáta na žádanou teplotu a následně se rozděluje do tří hlavních horkovodů. Ty ji dále rozvádějí k jednotlivým spotřebitelům. Pro jednoduchost jsou zde všechny tři větve horkovodu reprezentovány jednou jedinou a jednotliví spotřebitelé nahrazeni jedním tepelným výměníkem (TV). Poté, co voda předá své teplo ve výměnících u spotřebitelů, je vedena zpět do teplárny, kde se opět ohřívá.

V základním ohříváku je voda vyhřívána nízkotlakou parou z prvního odběru, ve špičkovém ohříváku je ohřívána zejména vysokotlakou parou z parního rozdělovače R3. Tento ohřev může být zastoupen ještě ohřevem pomocí nízkotlaké páry z druhého odběru, za normálního stavu je ale preferován ohřev vysokotlakou parou. Oba ohříváky (ZO i ŠO) jsou zapojeny sériově. Tyto sériové kombinace jsou ve skutečnosti v teplárně dvě, zapojené navzájem paralelně, tzn. dva ZO a dva ŠO, ale pro jednodušší znázornění a přehlednější návrh je zde uveden pouze jeden ZO a jeden ŠO v sérii, tak jak je to na obrázku. [30]





Obr. 21: Odběr tepla na ohřev vody z bloku K3-TG9

### 5.7.2 Charakteristika systému

Pro využití v teplárně byl vybrán horkovodní elektrokotel od firmy Auxilien a.s. Po komunikaci s touto společností byly poskytnuty některé hlavní parametry těchto zařízení:

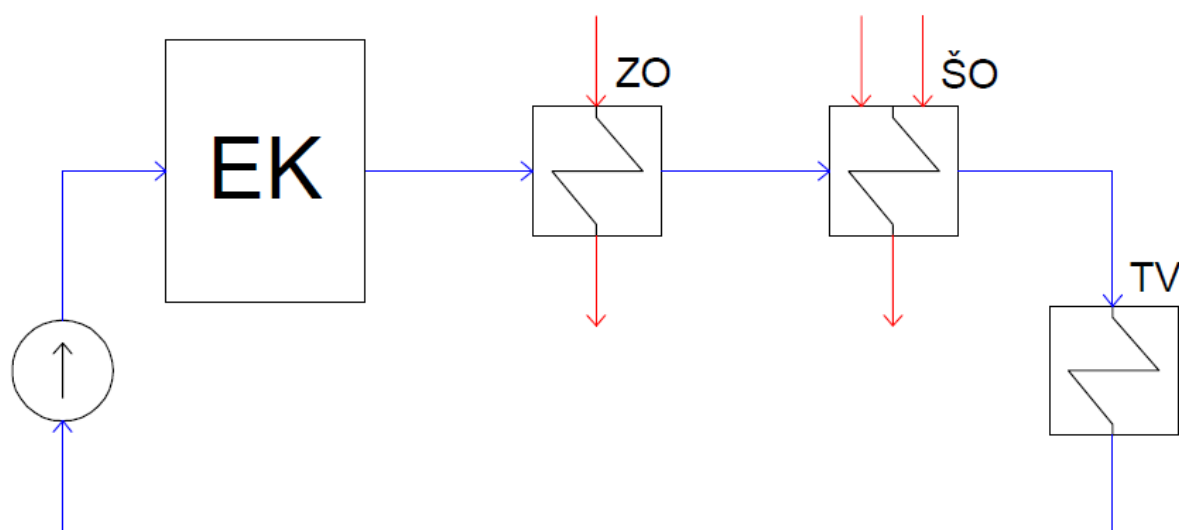
- Neomezená životnost – výrobce neudává limitní dobu,
- Účinnost téměř 100 %,
- Cena přibližně 2 000 Kč/kWh – liší se dle zapojení a parametrů kotle,
- Regulační rozsah od 2 do 100 %,
- Provozní náklady 200 000 Kč/rok,
- Teplota vody na výstupu z kotle maximálně 135 °C,
- Rozměry: 4/4/5,5 m.

### 5.7.3 Návrh elektrokotle pro vytápění

#### *Zapojení*

Elektrokotel by mohl být zapojen do CZT oběhu teplárny dvěma způsoby, a to paralelně nebo sériově ke stávajícím ohřívákům (ZO a ŠO). V prvním případě by byl zapojen mezi vývodovou a vratnou větev horkovodu a mohly by nastat dvě možnosti. Buď by elektrokotel ohříval veškerou vodu, proudící v horkovodu, na žádanou teplotu a plně by tak zastoupil oba ohříváky. To by ale vyžadovalo velmi vysoký výkon kotle, který zde není uvažován a kterého by se v praxi ani nedosáhlo. Nebo by do elektrokotle mohlo být vpouštěno jen takové množství vody, které by kotel byl schopen dle svého výkonu ohřát na požadovanou teplotu. Tento způsob by již byl možný, avšak ne ideální, neboť by bylo nutno neustále regulovat množství vody proudící do elektrokotle v závislosti na jeho okamžitém výkonu. Způsob paralelního zapojení není tedy příliš vhodný a nebude proto dále rozebírán.

Daleko výhodnější se zdá případ sériového zapojení elektrokotle (Obr. 22). Zde by se elektrokotel zapojil do vratné větve horkovodu před stávající výměníky a použil by se pro předehřev vody před jejím vlastním ohřátím v parních ohřívácích. Vzhledem k nižšímu výkonu kotle by tento způsob zapojení byl zřejmě výhodnější než předchozí. Důvodem je i skutečnost, že elektrokotel by nepracoval stále na plný výkon. Ten by se měnil podle toho, kolik elektrické energie by v danou chvíli přebývalo v síti a kolik by tak bylo možné použít pro ohřev vody. Pokud by v síti vznikla kladná odchylka, elektrokotel by najel na plný výkon a předehříval by vodu na určitou teplotu. Následné parní ohříváky by pak vodu pouze doohřály na požadovanou teplotu. Pokud by v síti nastala záporná odchylka a byl by v ní nedostatek elektrické energie, stáhl by se výkon kotle na minimum a ohřev vody by plně obstarávaly parní ohříváky. Skrz elektrokotel by voda pouze protékala bez toho, aby se ohřívala až do doby, kdy by v síti opět nastal přebytek elektřiny.



Obr. 22: Zapojení kotle sériově

### Tepelný výpočet

Pro návrh jsou uvažovány varianty elektrokotle o výkonu 8 a 1 MW. V případě elektrodového ohřevu se účinnost kotle blíží 100 %, a proto je možné uvažovat, že příkon se rovná výkonu. Pro výkony 8 a 1 MW je z průběhu hodinových systémových odchylek (kapitola 5.1) určena průměrná doba, po kterou je možno denně odebírat ze sítě příslušné množství energie. To znamená průměrnou dobu, po kterou je kladná systémová odchylka větší nebo rovna 8, resp. 1 MWh a je tak možné odebírat potřebný výkon. Ze statistické analýzy vzorku dat bylo zjištěno, že kladná systémová odchylka o velikosti větší nebo rovné 8 MWh trvá průměrně 13,1 hodinu denně. Kladná odchylka větší nebo rovna 1 MWh pak trvá průměrně 15,2 hodiny denně. To znamená, že potřebný výkon 8 MW by elektrokotel mohl odebírat ze sítě průměrně 13,1 h denně a teplárna by navíc obdržela finanční bonus ve výši 1 Kč/MWh. Pro druhou variantu by mohl být výkon 1 MWh odebírán průměrně 15,2 hodin denně při stejném finančním bonusu. [27]

Pro zhodnocení je potřeba vypočítat teplotní rozdíl, o který by elektrokotel byl schopen ohřát vodu pro vytápění. K tomu je kromě výkonu nutno znát objem vody, který je nutno ohřát. Tento objem je stanoven z hmotnostních průtoků vody v horkovodu, jejichž průměrné měsíční hodnoty za rok 2015 poskytla PE. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 11) spolu s hodnotami odpovídajícího průměrného tepelného výkonu a průměrného potřebného množství energie. [30]

Tab. 11: Průměrné měsíční hodnoty CZT PE za rok 2015: hmotnostní průtok, tepelný výkon, energie [30]

Měsíc	$M_V$ [t/h]	$P$ [MW <sub>t</sub> ]	$W$ [GJ]
leden	1303	45	120664,2
únor	1316	48	115519,9
březen	1274	38	103080
duben	965	25	64686,9
květen	555	13	34412,1
červen	363	6	15066,5
červenec	290	5	12331,2
srpen	179	4	10146,2
září	335	8	21501,9
říjen	762	24	63541,3
listopad	967	34	87047,9
prosinec	978	35	93431

Příklad výpočtu je proveden pro měsíc leden a variantu 8 MW, pro ostatní případy je výpočet obdobný a výsledky jsou souhrnně uvedeny v tabulce (Tab. 12). Jsou-li známy hodnoty výkonu a hmotnostního průtoku, je možné použít k výpočtu rovnici (6):

$$Q [J] = m [kg] \cdot c_p \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] \cdot \Delta\tau [K]. \quad (6)$$

Měrná tepelná kapacita vody je přibližně:  $c_p = 4\,180 \text{ J/kg} \cdot \text{K} = 1,16 \text{ Wh/ kg} \cdot \text{K}$ . Po dosazení hmotnostního průtoku a výkonu a vyjádření  $\Delta\theta$  je získán vztah (7):

$$\Delta\theta = \frac{P [W]}{M_V \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot c_p \left[ \frac{Wh}{kg \cdot K} \right]} = \frac{8 \cdot 10^6}{1303 \cdot 10^3 \cdot 1,16} = 5,29 \text{ K}. \quad (7)$$

To znamená, že elektrokotel o výkonu 8 MW by byl schopen předeřhát v lednu dané množství vody o  $\Delta\theta = 5,29 \text{ K}$ , zbylý teplotní rozdíl by dorovnaly stávající parní ohříváky (ŠO a ZO). Pro ostatní měsíce v roce byly provedeny výpočty stejným způsobem pro obě varianty návrhu, výsledky jsou shrnuty v tabulce (Tab. 12), kde  $\Delta\theta$  je dosažitelný teplotní rozdíl v daném měsíci. Pro názornost jsou dále uvedeny hodnoty průměrného teplotního rozdílu  $\Delta\theta_p$ , o který je ohřívána voda v jednotlivých měsících.

Tab. 12: Vypočtené hodnoty pro dané měsíce

	P = 8 MW	P = 1 MW	Potřebný rozdíl
Měsíc	$\Delta\vartheta$ [°C]	$\Delta\vartheta$ [°C]	$\Delta\vartheta_p$ [°C]
leden	5,29	0,66	30,3
únor	5,24	0,65	31,6
březen	5,41	0,68	26,4
duben	7,15	0,89	23
květen	12,43	1,55	16,1
červen	19	2,38	13,5
červenec	23,78	2,97	13,6
srpen	38,53	4,82	19,5
září	20,59	2,57	25,2
říjen	9,05	1,13	30,8
listopad	7,13	0,89	30,5
prosinec	7,05	0,88	30,4

Je zjevné, že výkon 1 MW je pro přehřev vody tímto způsobem nevhodný, neboť takový elektrokotel není schopen v topné sezóně ohřát dané množství vody ani o 1 °C. Jeho provoz takovýmto způsobem by byl neefektivní a teplárně by se nevyplatil, tudíž nemá smysl uvažovat o jeho realizaci ani posuzovat ekonomickou výhodnost.

#### Ekonomické zhodnocení

Ekonomická efektivnost je hodnocena mírně odlišně než v případě předchozích systémů a není pro ni proto využit sestavený program. Zisk v tomto případě není možné odvíjet od ceny záporných systémových odchylek, neboť elektřina odebraná ze sítě není do systému vrácena, ale je přeměněna v teplo, kde je akumulována. Z toho důvodu je zisk reprezentován cenou uhlí, které by bylo díky elektrokotli ušetřeno. K tomu je potřeba stanovit energii, kterou technologie ročně ušetří a z ní pak odpovídající množství uhlí a jeho cenu.

Ze známého výkonu elektrokotle je možné vypočítat denní potřebu energie  $W_d$  pro ohřátí daného množství vody o odpovídající teplotní rozdíl  $\Delta\vartheta$  za dobu provozu elektrokotle. Doba provozu pro výkon 8 MW je průměrně 13,1 hodin denně. Lze využít jednoduchého vztahu (8):

$$W_d = P [W] \cdot t [s] = 8 \cdot 10^6 \cdot (13,1 \cdot 60 \cdot 60) = 377,28 \text{ GJ}. \quad (8)$$

Provoz elektrokotle dle tohoto návrhu by tak poskytl v lednu energii  $W_d = 377,28$  GJ denně, což za celý měsíc představuje  $W_m = 11\,695,7$  GJ. Při zohlednění nižší spotřeby tepla v měsících červnu, červenci a srpnu (v těchto měsících bude kotel pracovat na nižší výkon) je to ročně  $W_r = 123\,648$  GJ. Toto množství energie by bylo ušetřeno, kotel K3 by tak mohl pracovat na nižší výkon a ušetřilo by se určité množství uhlí. Cena hnědého uhlí se pro elektrárny a teplárny pohybuje kolem 50 Kč/GJ, je možné ze součinu této ceny a ušetřené energie vypočítat náklady na pořízení uhlí, které by se ušetřily použitím elektrokotle. Tyto náklady představují cashflow (CF) pro výpočet doby návratnosti.

$$CF = W_r \cdot 50 = 123\,648 \cdot 50 = 6\,182\,400 \text{ Kč} \quad (9)$$

Roční zisk by tak byl více než 6 milionů Kč. Cena elektrokotle o výkonu 8 MW je dle informací společnosti Auxilien zhruba 15 milionů Kč, lze tedy jednoduše vypočítat dobu návratnosti:

$$T_S = \frac{IN}{CF} = \frac{15}{6,182} = 2,4 \text{ roku.} \quad (10)$$

Elektrokotel o výkonu 8 MW by se tak splatil za 2,4 roku, poté by každý rok ušetřil teplárně náklady na pořízení uhlí ve výši téměř 6,2 milionů Kč. Jeho nasazení do provozu se tak jeví jako velmi výhodné.

### *Ekologický dopad*

V teplárně ELÚ III je spalováno sokolovské hnědé uhlí s výhřevností  $Q_r = 12,65$  MJ/kg. Je-li známa ušetřená energie a výhřevnost paliva, je možné z podílu těchto veličin určit množství ušetřeného paliva:

$$m_p = \frac{W_r}{Q_r} = \frac{123648 \cdot 10^9}{12,65 \cdot 10^6} = 9\,774\,545,5 \text{ kg} = 9\,774,6 \text{ t.} \quad (11)$$

Použitím elektrokotle o výkonu 8 MW by se tak ročně ušetřilo teoreticky 9 774,6 t hnědého uhlí. Teplo se do CZT dostává prostřednictvím parních ohříváků. Protože účinnost kotle K3 ani přestup tepla v ohřívácích neprobíhá se stoprocentní účinností, není výhřevnost uhlí plně využita a ušetřené množství uhlí by tím bylo v praxi ještě větší, než zde vypočtená hodnota 9 774,6 t. Pro jednoduchost je ale uvažována účinnost procesu 100 %. Jelikož uhlí spalované v kotli K3 má průměrný obsah síry 0,5 % a obsah popelovin asi 19,6 % hmotnosti, ušetřilo by se asi 48,9 t síry a 1915,8 t popela ročně. S tím souvisí

i provozní náklady procesů úpravy spalin, tj. elektrofiltrů a zejména odsiřovací jednotky. Z toho vyplývá, že elektrokotel má rovněž význam i v oblasti ekologie.

#### *Závěrečné hodnocení*

Jak vyplynulo z ekonomického hodnocení, elektrokotel je efektivním nástrojem pro regulaci kladné odchylky v síti. Pro svou krátkou dobu návratnosti by mohl teplárně přinášet významný každoroční zisk. Jak už bylo uvedeno, během letních měsíců (červen až srpen) by nebyl plně využit, neboť požadovaný průměrný rozdíl teplot, o který se má voda ohřát, je nižší než rozdíl, který by elektrokotel umožňoval. Při uvážení tohoto faktu by byla roční úspora energie a tím i paliva a financí téměř 6,2 mil. Kč. V praxi dále není jisté, o kolik by mohl být snížen výkon kotle K3, neboť všechny parní kotle v teplárně pracují v současné době s výkonem, blížícím se minimální hodnotě. Nelze tak zaručit, že po nasazení elektrokotle by bylo možné snižovat výkon stávajících parních kotlů odpovídajícím způsobem a dosáhnout tak vypočtené úspory energie. Minimálně během topné sezóny je ale zaručeno, že určité snížení výkonu parních kotlů možné je. Proto je využití elektrokotle v provozu teplárny reálné, i když by pravděpodobně mělo o něco horší ekonomické parametry.

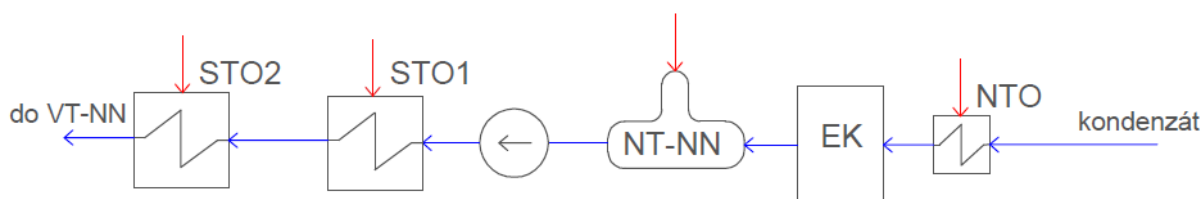
#### **5.7.4 Využití pro ohřev napájecí vody**

Výše popsané využití elektrokotle pro vytápění by připadalo v úvahu zejména v zimních měsících (topné sezóně). Během léta by pak kotel měl velmi nízké využití. Proto bylo uvažováno o dalších variantách, kdy by kotel měl využití po celý rok. Tyto úvahy jsou již spíše v rovině teorie, neboť konstrukčně a technologicky by bylo velmi obtížné je realizovat. Proto nejsou ani ekonomicky hodnoceny, jedná se pouze o akademickou úvahu.

#### *Ohřev kondenzátu*

První takovou variantou bylo použití kotle pro ohřev napájecí vody (kondenzátu). Stávající řešení bloku umožňuje ohřev napájecí vody parou z odběrů turbíny. Pára je vedena do regenerativních ohříváků, kde ohřívá napájecí vodu. Voda je ohřívána na bod varu a vstupuje do kotle. Kdyby se tento ohřev uskutečňoval pomocí elektrokotle, ušetřilo by se množství páry jinak nutné na regeneraci. K tomuto účelu by nebylo možné využít elektrokotel pro ohřev vody ve středotlakých ohřívácích, neboť tam je teplota vyšší než

150 °C. Teplota vody na výstupu z kotle je dle specifikace maximálně 135 °C, proto by kotel bylo možné použít namísto nízkotlakého ohříváku nebo pro ohřívání vody v NT-NN, kde má voda nižší teplotu (Obr. 23). Ve chvíli, kdy by v síti nastal přebytek elektřiny (kladná odchylka), zavřel by se odběr páry pro NTO nebo NT-NN a ohřívání kondenzátu by převzal elektrokotel. Jak již bylo vysvětleno, technologicky by toto řešení bylo velmi komplikované a v praxi by zřejmě ani nebylo reálné, jde pouze o úvahu.

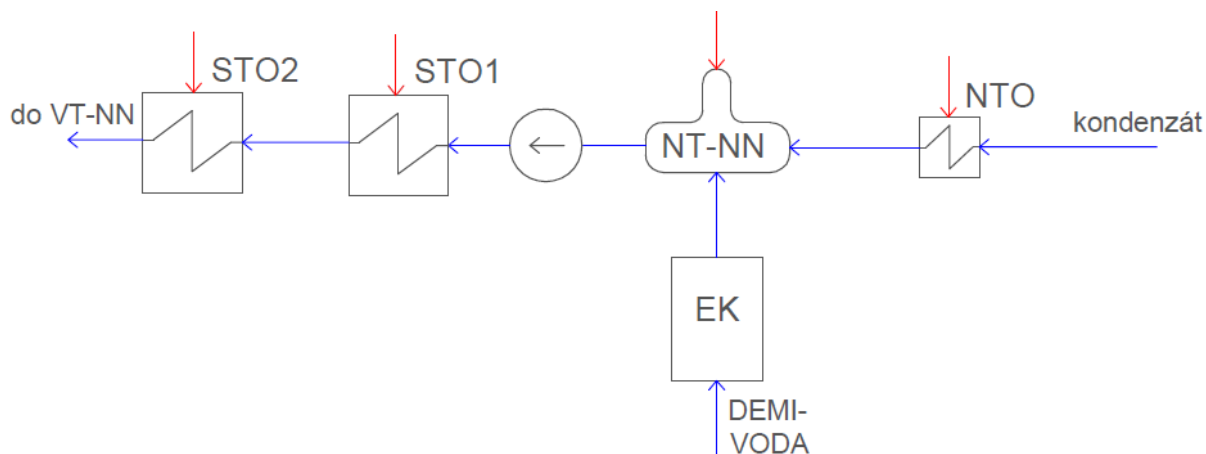


Obr. 23: Využití elektrokotle pro ohřev kondenzátu

#### Ohřev demi-vody

O něco reálněji se jeví druhá možnost a tou je ohřev demi-vody, vstupující do NT-NN společně s kondenzátem. Teplárna ELÚ III totiž kromě elektřiny a tepla dodává i páru. Ta se však vrací zpět jen od některých spotřebitelů. Určité množství páry se tak z oběhu nenávratně ztrácí a je potřeba neustále doplňovat odpovídající množství demi-vody. To se děje v nízkotlaké napájecí nádrži. Tato doplňovaná voda má ale nižší teplotu (dle dat od PE asi 50 °C), než kondenzát, vstupující do této nádrže, čímž ho ochlazuje. Po smísení demi-vody a kondenzátu v NT-NN tak je potřeba tuto směs znovu ohřát, na což se spotřebuje množství páry. Kdyby tedy došlo k ohřátí demi-vody elektrokotlem ještě před jejím vstupem do NT-NN, mohlo by se ušetřit teplo jinak potřebné pro ohřátí směsi v nádrži. Schematicky je zapojení elektrokotle znázorněno na (Obr. 24). [30]





Obr. 24: Využití elektrokotle pro ohřev demi-vody

Dle dat poskytnutých společností PE je průtok přídavné demi-vody v potrubí zhruba 60 t/h. Voda je ohřívána z teploty  $\vartheta_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  na teplotu  $\vartheta_2 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ . Teplotní rozdíl je tak  $\Delta\vartheta = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při uvažování elektrokotle o výkonu 8 MW a jeho využití obdobným způsobem jako v kapitole 5.7.3, je vypočten teplotní rozdíl, o který je schopen elektrokotel ohřát dané množství demi-vody. Výpočet je proveden pomocí stejného vzorce jako v předchozí kapitole:

$$\Delta\vartheta = \frac{P [W]}{M_V \left[\frac{kg}{h}\right] \cdot c_P \left[\frac{Wh}{kg \cdot K}\right]} = \frac{8 \cdot 10^6}{60\,000 \cdot 1,16} = 115 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (12)$$

Jak plyne z rovnice (12), výkon 8 MW by byl pro ohřev demi-vody zbytečně vysoký, neboť teplotní rozdíl 115  $^\circ\text{C}$  je asi třikrát vyšší než žádaný rozdíl. Pro tento účel by stačil výkon kotle 2,5 MW, ten by umožňoval ohřátí vody téměř o 36  $^\circ\text{C}$ , což by bylo ideální. Takový elektrokotel by tedy během svého provozu mohl zcela pokrýt potřebu tepla pro ohřev demi-vody. Jak bylo už ale řečeno, technologicky by realizace takového návrhu byla složitá a zřejmě by pro teplárnu nebylo výhodné je uskutečnit.

## 6 Porovnání návrhů

Pro závěrečné srovnání jednotlivých návrhů byla od každé technologie vybrána ta nejefektivnější varianta. Parametry těchto nejpřínosnějších variant jsou shrnuty v (Tab. 13), v případě elektrokotle je místo denního počtu cyklů uváděna průměrná denní doba provozu a namísto čistého zisku za dobu životnosti je uveden čistý zisk ročně:

Tab. 13: Srovnání návrhů

Technologie	Na-S	VRB	Superkapacitor	Elektrokotel
Kapacita zařízení [MWh]	1,2	1,2	1,2	8
Účinnost [%]	75	80	95	99
Plocha/výška [m <sup>2</sup> /m]	7,4/1,2	44,5/5,8	126/5	16/5,5
Životnost [roky]	6,3	20	10	neomezena
Denní počet cyklů	2	4	20	prům. 13,1 h
Počet provozních dní	356	356	365	365
Investiční náklady [mil. Kč]	13,2	25,9	387,1	15
Roční čistý zisk [mil. Kč]	1,2	2,6	15,9	6,2
Doba návratnosti [roky]	10,8	10	24,4	2,4
Čistý zisk za dobu životnosti [mil. Kč]	-5,53	26,2	-228,6	6,2 mil. Kč ročně

V tabulce jsou žlutou barvou znázorněny technické parametry návrhů, zeleně pak ty ekonomické. Jak je vidět, jednoznačně nejvýhodněji se pro použití v teplárně jeví elektrokotel o výkonu 8 MW. Dle výrobce má neomezenou životnost, což umožňuje jeho provoz libovolný počet hodin denně, v tomto případě je uvažováno průměrně 13,1 h. Za rok kotel vydělá skoro 6,2 miliónů Kč a k jeho splacení dojde již po 2,4 letech. Jelikož v teplárně ELÚ III je nedostatek volného prostoru, je rovněž příznivé, že prostorové nároky kotle nejsou nijak velké, pouze je zde potřeba zastřešené haly, neboť elektrokotel není určen pro venkovní použití. Jak je zmíněno v předchozí kapitole, v praxi by se instalace i provoz zařízení setkávaly s některými problémy, které by snížily jeho ekonomickou výhodnost, ale i při jejich uvážení by tato možnost vycházela nejefektivněji.

Druhým nejvýhodnějším zařízením se zdá být technologie VRB s kapacitou 1,2 MWh. Během provozu nedochází k jejímu opotřebení, tudíž umožňuje větší počet cyklů a to má vliv na delší životnost a kratší dobu návratnosti. Čistý zisk z provozu zařízení za dobu jeho životnosti by činil přes 26 miliónů Kč, což zhruba odpovídá investičním nákladům. To

znamená, že po 20 letech provozu by došlo více než ke zdvojnásobení vložených finančních prostředků. Nevýhodou jsou poměrně velké prostorové nároky vinou nízké hustoty energie, volná plocha 44,5 m<sup>2</sup> by byla v teplárně obtížně dostupná, ovšem kdyby se podařilo ji uvolnit, mohla by být technologie výhodná. Dle informací z Plzeňské energetiky je limitní doba návratnosti pro realizaci projektu 4 roky. Této hranice tedy VRB v současnosti zdaleka nedosahuje, ovšem vezme-li se v úvahu, že během posledních 5 let se zkrátila doba návratnosti o více než 6 let (dle předchozí studie na PE), je možné se domnívat, že tento trend bude pokračovat a v budoucnu může být uvedený návrh realizovatelný.

Zbylé dvě technologie vycházejí pro použití v teplárně nevýhodně, u superkapacitorů je to dáno zejména nízkou energetickou hustotou a závratně vysokou cenou. I zde je ale možné přijmout předpoklad, že cena systémů se bude snižovat. Vzhledem k obrovské prostorové náročnosti pravděpodobně ale nikdy nebude možné je v teplárně instalovat. U technologie Na-S je problémem zejména nízká životnost systémů, která neumožňuje provádět více cyklů denně, i když samotná technická podstata zařízení by to dovozovala. Na rozdíl od ostatních technologií má vysokou energetickou hustotu, takže pro konkrétní použití v teplárně by byla nejvhodnější z důvodu příznivých rozměrů. Doba návratnosti je srovnatelná s technologií VRB, takže jedinou, zato ale podstatnou nevýhodou je velice krátká životnost, která tento návrh činí nevhodným.

## **Závěr**

V této diplomové práci jsem řešil možnost využití akumulace elektrické energie v teplárně ELÚ III. Nejprve jsem provedl teoretický přehled dostupných metod a z vypracované teorie jsem později rozhodl, které technologie by mohly být pro použití výhodné. V následující kapitole jsem se podrobněji zabýval provozem teplárny. Utvořil jsem si představu o celé technologii teplárny, zejména jednoho jejího bloku a pochopil jeho fungování.

V další kapitole jsem analyzoval situaci na trhu se silovou elektřinou, na jejímž základě jsem v závěrečné části práce navrhoval jednotlivé systémy. Zjistil jsem, že situace v přenosové soustavě je velice dynamická a těžko předpovědatelná. Na základě statistických dat se dá pouze s určitou pravděpodobností odhadnout budoucí chování systému. Z toho důvodu by mnou vytvořené teoretické návrhy mohly v praxi fungovat trochu jinak, než předpokládám, a je tedy potřeba je vnímat s určitou rezervou.

V poslední části práce jsem již vytvořil praktické návrhy 4 vybraných systémů, které se dle teorie jeví jako neefektivnější, a v závěrečné kapitole jsem je mezi sebou porovnal. Dá se říci, že mnou vypočtené výsledky víceméně potvrdily teoretické předpoklady, neboť se potvrdila možnost instalace elektrokotle i VRB akumulátorů. V případě superkapacitorů mne nepřekvapila špatná ekonomická stránka návrhu, pouze u varianty akumulátorů Na-S jsem očekával lepší ekonomickou efektivnost.

Závěrem je třeba říci, že teplárna ELÚ III je v určitých aspektech atypická technologie se specifickým provozem a není zcela jisté, jak by se navržené systémy chovaly v jiných provozech. Celkově se domnívám, že práce splnila svůj účel, poskytla přehled o možnosti použití akumulačních zařízení a umožnila jejich hlubší prozkoumání a zhodnocení. Zároveň jsem se přesvědčil o tom, jak složitá je po technologické stránce akumulace většího množství elektrické energie. Zjistil jsem, že v současnosti téměř nemáme možnost, jak efektivně a hlavně levně uložit a opět uvolnit elektřinu tak, aby to bylo výhodné.

Domnívám se, že by mohlo být užitečné, kdyby mnou rozpracovaná problematika byla v budoucnu dále řešena. Dala by se vypracovat hlubší a konkrétnější analýza pouze jedné vybrané technologie anebo se k problému vrátit po určité době, neboť trh v oblasti akumulace elektřiny je dynamický, stále se vyvíjí a v průběhu let se může výrazně změnit.

Rovněž bych doporučoval zpracovat možnost akumulace do roztavených solí, kterou jsem původně zamýšlel zahrnout do svých návrhů. V současnosti je však tato technologie v počátku vývoje a v klasických tepelných elektrárnách a teplárnách se ve světě nepoužívá. Nicméně v dalších letech může dojít k jejímu vylepšení a pak by se stala vysoce efektivní.

## Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] BOLUND, Björn, BERNHOFF, Hans a LEIJON, Mats. Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2006 [cit. 17.11.2015]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: doi: 10.1016/j.rser.2005.01.004
- [2] BECHERIF M., RAMADAN H. S., CABARET K., PICARD F., SIMONCINI M. a BETHOUX O. Hydrogen Energy Storage: New Techno-economic Emergence Solutions Analysis. *Energy Procedia* [online]. Elsevier, 2015 [cit. 31.1.2016]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <http://ac.els-cdn.com/S1876610215013971/1-s2.0-S1876610215013971-main.pdf>
- [3] GONZÁLEZ Ander, GOIKOLEA Eider, BARRENA John Andoni a MYSYK Roman. *Review on supercapacitors: Technologies and materials* [online]. Elsevier, 2015 [cit.31.1.2016]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <http://ac.els-cdn.com/S1364032115016329/1-s2.0-S1364032115016329-main.pdf>
- [4] PENG Qiang, YANG Xiaoxi, DING Jing, WEI Xiaolan a YANG Jianping. *Design of new molten salt thermal energy storage material for solar thermal power plant* [online]. Elsevier, 2015 [cit. 4.2.2016]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <http://ac.els-cdn.com/S0306261912007672/1-s2.0-S0306261912007672-main.pdf>
- [5] RADIL, Lukáš. *Současné možnosti akumulace elektrické energie* [online]. [cit.16.10.2015]. Dostupné z: [http://www.tzb-info.cz/download.py?file=docu/clanky/0080/008065\\_Radil\\_Baterie.pdf](http://www.tzb-info.cz/download.py?file=docu/clanky/0080/008065_Radil_Baterie.pdf)
- [6] KOČVAŘOVÁ P., KOZUBKOVÁ M. *Aplikace plazmového hořáku na kotel PG 350* [online]. [cit.10.2.2016]. Dostupné z: [http://www.ansys.stuba.sk/ansys2009/prednasky/prispevky/vsb\\_kocvarova.pdf](http://www.ansys.stuba.sk/ansys2009/prednasky/prispevky/vsb_kocvarova.pdf)
- [7] OGOUN Milan. *Vývoj zásobníku pro akumulaci latentního tepla* [online]. [cit. 10.3.2016]. Dostupné z: <http://www.topin.cz/download.php?idx=71873&di=7>
- [8] GABRIEL, Jindřich. *Možný návrh a instalace elektrokotle v teplárně Vřesová*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] MURTINGER, Karel. *Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren* [online]. Poslední změna 03.05.2011. [cit. 15.10.2015]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektriny-z-fotovoltaickych-a-vetnych-elektraren.aspx>
- [10] TAYLOR Peter, BOLTON Ronan, STONE Dave, ZHANG Xiao-Ping, MARTIN Chris a UPHAM Paul. *Pathways for energy storage in the UK* [online]. Poslední změna 27.04.2012. [cit. 16.10.2015]. Dostupné z: <http://www.lowcarbonfutures.org/pathways-energy-storage-uk>

- [11] DVOŘÁK, Petr. *Akumulace elektřiny* [online]. Poslední změna 09.05.2011. [cit. 23.10.2015]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [12] ZAJAC Jaromír. *Jak uložit energii* [online]. Poslední změna 08.06.2006. [cit. 23.10.2015]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/744-jak-ulozit-energii>
- [13] WAY, Julia. *Storing the Sun: Molten salt provides highly efficient thermal storage* [online]. Poslední změna 26.06.2008. [cit. 4.2.2016]. Dostupné z: <http://www.renewableenergyworld.com>
- [14] JANATA, Marek, CHRÁSKA, Pavel a MUŠÁLEK Radek. *Plazmatron a jeho využití ve strojírenském průmyslu* [online]. 12.02.2014. [cit. 9.2.2016]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/plazmatron-a-jeho-vyuziti-ve-strojirenskem-prumyslu.html>
- [15] KOLAT, Pavel. *Plazmové najížděcí systémy v energetice* [online]. 04.07.2007 [cit. 9.2.2016]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1460>
- [16] RADA, Jozef. *Elektrodový ohřev vody* [online]. [cit. 15.2.2016]. Dostupné z: <http://elektrokotel-eu.webnode.cz/nazor-odbornika/>
- [17] *Technologický plán akumulace energie* [online]. Poslední změna 14.02.2015 14:22. [cit. 15.10.2015]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>
- [18] *Lithium-Ion Batteries* [online]. [cit. 15.10.2015]. Dostupné z: <http://www.physicscentral.com/explore/action/lithium.cfm>
- [19] *Vanadové redoxní baterie* [online]. Poslední změna 15.06.2011. [cit. 16.10.2015]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/vanadove-redoxni-baterie>
- [20] *Ni-MH akumulátory* [online]. [cit. 17.11.2015]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nimh-akumulatory>
- [21] *Energy storage: Superconducting magnetic energy storage* [online]. [cit. 3.2.2016]. Dostupné z: <http://www.climatetechwiki.org/technology/jiqweb-ee>
- [22] *Is Lithium-Ion the Ideal Battery?* [online]. [cit.16.10.2015]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/is\\_lithium\\_ion\\_the\\_ideal\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/is_lithium_ion_the_ideal_battery)
- [23] *Kogenerace – princip, technologie a výhody* [online]. Poslední změna 21.04.2015 17:14. [cit. 21.04.2016]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody/>

- [24] *INVESTINGNEWS* [online]. [cit. 16.10.2015]. Dostupné z:  
<http://www.investingnews.com>
- [25] *ENERGYSTORAGE* [online]. [cit. 16.10.2015]. Dostupné z:  
<http://www.energystorage.org>
- [26] *GVEA* [online]. [cit. 17.11.2015]. Dostupné z: <http://www.gvea.com>
- [27] *OTE/CR.CZ.*, [online]. [cit. 15.4.2016]. Dostupné z: <http://www.ote/cr.cz.com>
- [28] *NGK INSULATORS, LTD.*, [online]. [cit. 21.04.2016]. Dostupné z:  
<http://www.energystorage.com>
- [29] *CEPS.CZ.*, [online]. [cit. 15.04.2016]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz>
- [30] Technická dokumentace technologie PE.
- [31] Technická dokumentace technologie VRB.
- [32] Technická dokumentace technologie superkapacitorů.



## **Seznam příloh**

- Příloha 1: Denní odchylky v lednu 2015
- Příloha 2: Denní odchylky v únoru 2015
- Příloha 3: Denní odchylky v březnu 2015
- Příloha 4: Denní odchylky v dubnu 2015
- Příloha 5: Denní odchylky v květnu 2015
- Příloha 6: Denní odchylky v červnu 2015
- Příloha 7: Denní odchylky v červenci 2015
- Příloha 8: Denní odchylky v srpnu 2015
- Příloha 9: Denní odchylky v září 2015
- Příloha 10: Denní odchylky v říjnu 2015
- Příloha 11: Denní odchylky v listopadu 2015
- Příloha 12: Denní odchylky v prosinci 2015
- Příloha 13: Technické parametry modulů CellCube
- Příloha 14: Doby vybíjení modulů CellCube
- Příloha 15: Technická specifikace modulu BMOD P125 B08, str. 1
- Příloha 16: Technická specifikace modulu BMOD P125 B08, str. 2
- Příloha 17: Technická specifikace modulu BMOD P125 B08, str. 3
- Příloha 18: Kalkulačka pro výpočet doby návratnosti investic

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.1.2015	6.1.2015	11.1.2015	16.1.2015	21.1.2015	26.1.2015	31.1.2015
1	-167,59	-25,19	221,72	0,12	6,20	76,61	101,81
2	-120,48	-46,28	302,41	31,01	2,72	53,41	83,62
3	-31,68	-68,59	218,72	24,22	24,62	24,91	-51,20
4	-65,19	-36,69	238,82	36,72	7,82	27,82	-41,99
5	-56,48	-25,58	268,83	20,40	-35,88	22,83	27,41
6	-38,19	-26,49	316,42	30,52	-4,29	53,53	18,30
7	-9,08	-55,09	282,30	28,53	45,62	18,31	3,31
8	7,22	-92,48	211,21	-127,80	47,82	42,01	17,53
9	35,41	-137,59	141,51	12,94	-0,28	34,22	17,62
10	12,03	-107,70	124,22	57,11	-63,07	-89,19	-6,10
11	-28,19	37,00	89,01	112,72	-21,28	-53,49	-18,48
12	-29,29	159,11	30,70	15,31	-125,29	-11,59	35,11
13	36,01	187,81	64,71	-35,69	-74,59	26,80	-8,49
14	118,02	134,40	127,91	-43,49	-80,50	44,60	6,51
15	139,50	115,60	153,60	-31,99	-77,69	0,51	41,72
16	56,31	51,30	188,20	18,01	-57,90	22,41	-73,68
17	56,01	-20,30	233,01	14,51	32,11	25,92	-50,29
18	96,11	-57,91	218,61	-50,60	9,80	-28,70	69,62
19	87,71	-79,19	187,21	40,92	8,21	-19,00	68,49
20	65,13	-97,80	166,00	3,51	-36,28	-41,59	90,40
21	21,32	-28,20	155,70	34,12	-20,29	-90,59	39,62
22	49,42	18,91	128,11	37,11	9,91	-55,69	62,90
23	70,63	37,61	132,02	82,72	-2,19	-53,38	83,83
24	66,34	-9,29	152,71	31,52	17,42	-43,60	53,01

Příloha 1: Denní odchylky v lednu 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]					
	1.2.2015	6.2.2015	11.2.2015	16.2.2015	21.2.2015	26.2.2015
1	60,60	-2,00	59,41	-30,79	18,91	-40,29
2	-56,98	16,22	68,41	-25,29	-39,98	-46,68
3	-25,50	-12,99	40,61	-14,39	-18,79	-31,39
4	-96,57	-25,20	55,42	28,20	-30,79	-13,28
5	51,42	-10,07	89,21	-1,98	-62,88	-24,30
6	45,31	-1,10	-88,28	-27,68	-40,28	-100,49
7	-61,89	-61,70	39,02	-50,99	-46,10	-59,69
8	-177,08	-8,87	39,92	17,12	-37,19	-99,39
9	12,52	-100,79	-33,89	147,21	90,31	15,71
10	72,71	-75,18	-97,18	221,21	137,23	88,22
11	107,61	-114,19	-205,10	153,71	158,90	75,12
12	47,71	0,31	-189,18	108,60	60,72	29,32
13	111,91	68,40	-33,80	120,01	149,31	-16,79
14	151,40	120,12	-0,88	109,90	267,70	-41,39
15	232,73	3,61	8,91	105,00	292,91	-27,39
16	78,82	-74,89	22,71	16,21	147,32	-26,70
17	7,91	-82,19	52,23	51,22	39,62	47,01
18	6,01	-23,70	129,90	16,90	28,31	73,61
19	19,80	-16,30	-36,27	-29,30	-4,81	20,00
20	-33,59	-51,80	-88,21	-47,00	1,61	-213,48
21	34,52	-40,49	30,30	-99,69	15,31	-206,28
22	6,60	-91,30	19,11	-19,69	-14,70	30,61
23	-16,60	-76,58	48,92	-39,98	17,51	53,22
24	-26,68	-20,50	-48,40	25,11	19,01	18,21

Příloha 2: Denní odchylky v únoru 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.3.2015	6.3.2015	11.3.2015	16.3.2015	21.3.2015	26.3.2015	31.3.2015
1	81,72	29,91	110,51	64,12	18,12	68,81	53,01
2	34,92	12,12	73,70	52,11	11,03	77,01	30,22
3	42,31	-5,89	82,00	50,32	19,11	82,22	19,21
4	67,82	29,92	27,60	34,01	-8,59	53,42	41,62
5	46,32	6,21	19,22	5,12	-36,58	85,72	6,62
6	52,81	-2,59	67,22	46,51	11,52	90,73	13,61
7	96,83	25,02	50,02	59,12	-64,09	99,31	-87,78
8	-0,19	46,11	-22,60	99,91	-70,99	220,32	-215,19
9	23,61	95,02	-46,49	106,83	21,93	210,51	-259,79
10	102,42	166,61	-154,78	-14,39	63,72	235,21	-236,28
11	40,80	81,02	-56,18	-133,38	109,50	112,00	-259,80
12	8,12	37,82	23,31	-143,29	157,00	23,92	-209,78
13	-0,80	130,22	84,12	-88,98	195,71	-22,19	147,73
14	-69,08	59,92	43,12	-116,00	171,31	100,41	150,92
15	-73,18	15,90	-3,67	-75,88	176,10	-5,00	95,22
16	12,72	-97,71	27,32	-46,10	39,20	-6,01	22,30
17	45,72	-25,69	-44,09	-17,48	-11,69	-2,88	-20,50
18	88,43	17,10	40,42	55,31	30,01	3,11	-28,39
19	54,81	39,22	63,00	3,90	85,92	27,31	237,21
20	31,11	82,21	-56,28	-129,97	21,01	52,83	159,30
21	72,10	40,81	-22,30	-21,20	31,53	75,53	82,70
22	46,10	28,72	-8,36	-0,29	49,90	100,21	-12,79
23	68,81	52,61	7,62	119,71	51,02	71,70	-62,38
24	51,02	119,00	18,32	101,12	111,52	73,90	33,31

Príloha 3: Denní odchylky v březnu 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.4.2015	6.4.2015	11.4.2015	16.4.2015	21.4.2015	26.4.2015	30.4.2015
1	65,92	1,51	-40,29	55,71	-14,40	-18,28	108,33
2	17,02	67,22	14,43	3,92	4,22	11,50	16,62
3	21,21	68,70	-18,29	-13,80	25,21	11,21	13,93
4	106,02	57,01	-44,29	-9,28	13,62	34,91	23,02
5	32,72	-20,28	7,83	-3,19	-25,99	-124,08	-9,37
6	13,91	2,92	-18,89	34,40	16,82	54,42	26,61
7	101,61	68,32	-43,99	25,20	-56,28	5,70	9,60
8	64,11	19,51	-32,90	52,61	-10,29	81,11	66,42
9	87,63	124,52	-16,09	78,82	40,33	7,20	72,41
10	107,42	337,33	51,32	40,41	75,72	-4,99	121,31
11	-0,89	334,92	-10,39	59,41	146,82	-60,38	137,10
12	-21,48	293,00	64,72	82,12	53,32	-26,79	66,52
13	60,21	221,12	101,61	-35,48	23,81	-80,29	103,01
14	76,41	253,32	93,22	-131,69	57,41	-77,47	68,70
15	127,12	209,93	89,80	-109,28	45,53	-91,19	111,21
16	31,31	92,62	-1,29	-72,87	65,91	49,42	86,41
17	-43,71	141,62	45,11	-0,50	87,82	22,51	116,50
18	-125,38	116,02	12,10	1,61	-4,18	49,21	28,62
19	4,41	66,11	64,00	-106,49	-23,08	10,32	0,82
20	-51,18	120,21	34,32	-115,98	62,11	68,01	-2,58
21	-61,09	106,22	2,02	-48,19	35,81	66,82	49,42
22	3,01	109,81	3,51	-42,09	-53,48	-33,79	33,02
23	-30,18	70,32	24,23	-20,28	6,92	-68,80	18,92
24	-81,39	27,62	11,32	44,71	32,32	-52,10	5,51

Príloha 4: Denní odchylky v dubnu 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.5.2015	6.5.2015	11.5.2015	16.5.2015	21.5.2015	26.5.2015	31.5.2015
1	49,92	41,62	-8,58	-43,00	35,11	45,32	19,42
2	5,81	-46,80	-12,58	-41,29	38,91	3,32	21,61
3	2,90	6,51	23,01	-5,38	37,31	26,73	-21,98
4	-15,59	-13,48	4,31	-7,39	25,42	50,93	-56,58
5	-12,88	-25,80	11,81	-50,09	-19,10	25,41	31,01
6	24,62	-15,39	89,71	26,91	25,71	48,12	58,63
7	103,81	-14,99	22,10	-54,29	55,02	-21,98	-2,48
8	104,01	-71,30	62,42	-24,19	82,52	-94,69	20,94
9	117,01	-84,58	26,12	-101,68	135,91	-144,48	35,20
10	157,41	-47,68	-130,50	-73,98	83,43	-416,58	28,21
11	145,41	-33,30	46,71	-91,69	81,23	-319,69	19,02
12	226,21	-131,30	116,32	-53,60	118,42	-326,69	51,10
13	79,72	-85,40	66,21	106,51	90,12	-7,28	122,11
14	81,21	-88,29	43,81	69,82	-29,69	-97,49	53,11
15	-28,89	-166,49	62,80	32,20	-2,28	-110,68	-49,69
16	41,02	-68,28	119,02	-29,27	-92,69	-199,77	-18,59
17	13,11	-3,98	107,02	-24,18	48,42	-342,10	2,60
18	33,52	-63,18	83,21	160,43	80,12	-233,10	106,12
19	-54,48	-23,99	53,21	82,62	39,92	-226,19	57,90
20	-4,57	-29,58	32,92	37,73	-17,49	-76,70	-16,99
21	10,71	59,12	25,92	-7,09	-33,59	-26,39	-24,99
22	18,12	-5,38	-59,41	5,21	35,22	43,71	-1,59
23	-32,28	-41,88	24,11	13,71	37,93	-190,07	-3,29
24	-15,08	-68,27	5,91	25,61	44,42	-150,67	50,02

Příloha 5: Denní odchylky v květnu 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.6.2015	6.6.2015	11.6.2015	16.6.2015	21.6.2015	26.6.2015	30.6.2015
1	57,70	13,40	-0,40	-7,10	41,01	15,81	-20,89
2	8,52	26,22	42,62	-21,00	8,32	-6,58	-15,89
3	15,42	79,62	9,61	-36,09	20,71	-18,17	7,94
4	43,12	71,22	4,31	-14,98	6,22	13,62	38,91
5	61,41	41,82	-32,28	17,82	-2,19	13,23	60,33
6	115,12	28,42	48,32	39,42	20,52	52,43	51,41
7	-31,48	-8,59	53,41	39,22	2,12	-10,69	31,10
8	3,72	-11,47	-17,88	73,82	23,01	76,01	55,11
9	11,53	-14,88	41,71	42,33	15,83	74,41	125,51
10	-36,68	26,52	49,52	38,22	-30,48	52,31	49,62
11	-96,60	-44,49	30,61	12,51	34,11	-7,78	22,10
12	-132,89	11,01	0,01	-76,79	33,51	29,12	-28,89
13	-60,70	40,22	12,62	-66,28	-69,88	39,22	-59,50
14	-45,49	-11,20	55,81	-60,49	-95,40	-62,29	-115,69
15	21,61	-55,60	-6,09	-18,00	-56,28	-189,18	-151,18
16	66,81	-71,19	-6,18	13,41	12,02	-166,60	-164,38
17	20,72	-128,78	9,01	80,90	17,72	-118,69	-174,99
18	51,03	-75,58	14,62	58,42	75,01	-158,88	-99,09
19	60,71	-75,68	-54,29	38,60	23,72	-177,99	-214,19
20	38,32	-39,38	-55,89	-14,79	56,79	-94,59	-130,38
21	-30,48	-39,11	-23,89	-37,89	41,61	-39,49	-18,18
22	24,21	-39,18	-43,78	55,81	-1,49	-37,58	-10,79
23	-63,08	-82,10	-102,21	-73,49	-7,70	27,32	-64,59
24	-18,50	-69,19	-73,79	-91,28	-24,68	11,79	-44,09

Příloha 6: Denní odchylky v červnu 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.7.2015	6.7.2015	11.7.2015	16.7.2015	21.7.2015	26.7.2015	31.7.2015
1	-29,49	-3,09	22,71	-60,19	-2,70	-116,39	41,20
2	-65,88	-9,29	19,81	-33,09	1,20	-128,30	39,31
3	-33,08	-18,79	17,41	-30,59	-9,80	-99,69	32,92
4	-36,38	-24,21	26,01	-0,89	9,81	-12,39	9,21
5	-33,88	-57,58	-24,58	6,91	-13,70	32,70	157,01
6	-6,50	-21,09	7,72	0,32	-7,39	45,92	18,51
7	-70,49	-70,39	-36,68	21,61	-62,99	87,11	31,80
8	-78,08	-76,90	-15,29	-35,38	-75,50	67,22	40,31
9	-129,78	-76,18	38,83	-56,09	-51,89	-86,09	26,72
10	-154,09	-74,59	66,73	-81,17	-47,18	-249,67	82,62
11	-135,59	-101,58	-20,98	7,33	-21,68	-332,00	137,80
12	-92,69	1,61	-4,47	34,91	-37,38	-306,98	148,62
13	64,71	34,83	-7,18	-13,90	-9,10	-382,08	83,22
14	101,71	52,72	-32,68	-20,19	20,01	-253,68	122,82
15	23,32	-13,18	-22,49	23,31	6,31	-31,68	120,61
16	22,71	-12,89	4,32	24,82	18,62	53,32	75,21
17	-43,90	-55,67	-2,19	-15,09	17,71	50,11	58,23
18	-8,17	-68,70	38,52	-8,19	-115,58	103,61	29,71
19	25,62	-141,09	-6,49	-17,69	-208,19	80,10	9,72
20	-73,88	-111,08	29,52	-58,67	-108,48	18,20	7,71
21	-52,78	-86,90	-14,28	-50,38	-23,48	-24,09	30,23
22	-50,99	-60,21	-22,39	-79,59	21,92	6,11	-25,99
23	-43,80	-64,39	-7,59	-52,20	20,72	93,53	21,31
24	2,73	-19,99	-12,08	-67,50	-22,19	129,01	28,81

Příloha 7: Denní odchylky v červenci 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.8.2015	6.8.2015	11.8.2015	16.8.2015	21.8.2015	26.8.2015	31.8.2015
1	117,61	13,52	-10,99	71,21	-7,59	-18,29	22,72
2	119,80	39,91	21,82	23,82	-25,78	-6,48	3,83
3	95,20	60,82	35,51	-1,99	-36,58	-28,39	30,81
4	44,91	32,02	40,81	-1,18	-27,09	17,02	36,62
5	68,41	13,12	-32,98	21,12	-43,18	-5,07	33,82
6	82,32	17,12	-34,78	-45,58	-6,67	-60,68	42,92
7	127,32	38,51	-54,00	-10,09	-39,00	-111,30	-15,18
8	170,11	11,61	-47,89	27,54	38,72	-55,60	-9,88
9	185,71	8,71	45,62	86,52	-6,50	62,31	-1,89
10	195,21	-22,99	-64,69	57,22	68,01	48,42	-4,89
11	173,32	20,30	-165,79	30,60	92,11	-17,18	-8,58
12	87,53	31,82	-19,78	22,11	133,41	-15,37	-24,48
13	52,91	82,22	88,43	81,62	40,61	98,21	-67,08
14	15,02	74,82	95,62	129,74	34,71	88,72	-8,50
15	6,02	36,11	58,91	111,51	76,40	37,92	-36,10
16	1,11	13,01	60,51	106,63	40,61	-47,88	-255,09
17	-61,07	32,51	44,10	74,52	-1,58	27,70	24,31
18	-60,78	-9,49	37,10	91,82	-86,99	-15,69	-183,30
19	-16,47	21,39	67,11	93,02	-38,18	-116,08	-241,99
20	-67,08	23,31	86,90	100,21	-197,78	-81,98	-123,50
21	-97,88	40,42	23,00	-29,38	-73,28	28,01	-299,90
22	-41,89	36,01	45,10	-12,99	13,80	27,42	-100,79
23	19,60	36,00	30,51	7,11	37,10	-11,58	-16,89
24	12,51	38,91	32,10	35,61	54,20	14,62	75,82

Příloha 8: Denní odchylky v srpnu 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.9.2015	6.9.2015	11.9.2015	16.9.2015	21.9.2015	26.9.2015	30.9.2015
1	27,21	165,01	-527,18	-40,69	-8,08	-24,90	6,71
2	25,92	177,72	-303,18	-18,48	-51,69	-29,48	8,92
3	-5,79	216,52	-357,98	-29,88	-72,46	-22,79	4,12
4	32,24	139,01	-357,78	7,20	-84,48	0,12	17,73
5	78,91	80,22	-256,78	35,62	2,52	-8,79	20,81
6	-6,78	162,71	-446,70	39,51	-23,18	-15,99	23,72
7	-55,79	157,61	-1 146,70	-25,48	-120,59	-36,18	-33,50
8	11,20	146,31	-879,59	-85,58	-1,79	-11,79	-82,78
9	131,02	220,90	-625,00	-38,20	90,62	-12,09	-119,91
10	104,81	229,81	-665,39	-0,98	160,72	7,72	-70,79
11	73,20	223,22	-681,48	-10,09	53,31	-4,68	-121,00
12	-69,70	77,71	-717,10	-200,10	-3,97	-15,38	-312,09
13	-8,81	217,50	-651,69	-175,58	-120,69	-23,60	-269,22
14	-1,30	242,63	-492,99	-68,00	-137,07	-73,19	-164,60
15	-6,20	269,32	-129,98	147,91	-100,70	-47,60	-52,80
16	-47,40	131,91	-146,00	140,01	-4,09	-73,39	-143,08
17	10,20	94,61	-90,79	-20,58	91,31	-20,69	-227,60
18	146,91	150,11	-116,49	7,21	70,01	-15,09	-232,79
19	126,50	89,82	8,91	-11,80	33,42	-32,38	-121,19
20	64,80	61,32	-251,17	37,91	-69,00	-104,38	-230,51
21	76,61	28,11	-328,87	-28,60	-19,11	3,40	-178,39
22	113,51	121,70	-147,08	50,72	-7,29	-0,99	-13,91
23	106,40	101,42	20,61	-7,29	-8,89	-29,30	-37,99
24	95,92	75,11	-29,48	21,21	-19,49	-21,69	-28,18

Příloha 9: Denní odchylky v září 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.10.2015	6.10.2015	11.10.2015	16.10.2015	21.10.2015	26.10.2015	31.10.2015
1	-0,380	4,612	81,708	-39,690	-17,570	45,020	15,021
2	-21,669	22,413	88,510	26,929	5,027	53,822	38,615
3	7,415	10,619	72,728	24,218	22,608	77,213	23,829
4	-11,580	29,229	56,507	-7,472	-1,475	52,231	5,422
5	-17,381	18,417	48,008	-13,087	-21,078	-2,094	-6,582
6	41,400	111,816	62,803	2,418	0,424	-45,080	7,419
7	-47,089	-25,487	68,411	-0,679	-0,684	18,430	41,226
8	2,409	-29,914	69,809	7,216	-65,490	105,412	54,525
9	161,409	-37,976	104,306	14,414	2,114	99,105	192,521
10	198,722	-33,782	132,807	-54,493	47,212	162,605	281,009
11	104,315	4,721	146,308	9,411	31,600	300,712	390,924
12	47,411	17,014	151,402	-20,583	20,709	275,510	241,208
13	43,305	22,808	198,300	21,418	-29,502	79,103	54,915
14	55,624	77,213	187,006	2,107	-47,789	50,304	-14,484
15	13,509	46,705	147,509	-8,394	-54,503	79,719	106,916
16	54,021	14,320	100,918	-55,580	-56,501	171,019	19,913
17	65,009	67,510	78,910	-79,879	-61,907	109,307	56,309
18	50,809	106,606	101,905	-84,508	-12,785	-79,778	-7,480
19	-16,099	-11,685	43,907	-18,299	28,911	-71,695	22,813
20	-54,190	44,595	41,305	17,015	-61,093	-60,275	67,514
21	4,412	-4,493	-25,490	-4,588	-28,384	83,903	47,499
22	29,306	19,229	-39,796	-162,596	12,421	93,125	36,122
23	-45,176	17,815	-36,303	20,106	-5,592	-18,482	33,322
24	-31,373	13,631	-18,893	-10,494	-38,481	44,314	3,908

Příloha 10: Denní odchylky v říjnu 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.11.2015	6.11.2015	11.11.2015	16.11.2015	21.11.2015	26.11.2015	30.11.2015
	1	26,82	-53,48	24,42	-41,97	14,81	36,42
2	13,71	-36,38	-28,09	43,33	119,94	69,61	26,20
3	40,21	-17,69	49,72	56,21	85,32	11,70	13,32
4	10,52	6,92	13,31	44,72	92,83	86,82	11,42
5	53,92	44,23	35,43	13,93	91,43	41,71	3,53
6	65,21	20,42	14,32	92,41	128,73	20,31	-22,28
7	65,01	-68,17	9,32	13,12	271,41	-93,89	-70,28
8	143,01	11,81	97,21	-14,18	190,82	88,28	-143,30
9	267,71	91,34	74,73	35,92	203,91	59,22	-87,77
10	276,41	110,71	9,72	142,33	103,63	24,23	-10,48
11	327,41	183,72	3,00	126,92	215,32	-48,78	21,42
12	205,52	75,92	-26,59	103,90	243,32	-12,98	-50,38
13	175,01	25,49	-22,91	107,49	138,30	25,59	-67,40
14	180,50	36,80	-1,00	42,71	90,90	-26,51	-180,98
15	158,83	35,10	-21,40	40,41	57,62	-56,00	-41,20
16	46,92	28,20	57,30	75,52	71,80	-53,70	-75,09
17	-8,67	1,01	97,01	102,62	5,32	45,51	-104,39
18	16,12	11,91	92,71	16,79	35,71	62,72	-86,79
19	-31,30	29,92	2,33	-9,78	23,81	78,32	7,40
20	-9,39	-114,90	24,79	47,19	-23,19	42,01	7,92
21	-12,09	8,60	41,31	53,01	15,40	68,71	44,91
22	-43,29	-4,48	56,50	17,92	14,91	45,51	-28,18
23	-70,99	42,91	-11,21	14,03	-53,89	78,80	54,21
24	-28,88	40,21	-3,29	-34,89	-53,09	63,90	103,84

Příloha 11: Denní odchylky v listopadu 2015

Hodina	Systémová odchylka [MWh]						
	1.12.2015	6.12.2015	11.12.2015	16.12.2015	21.12.2015	26.12.2015	31.12.2015
	1	91,51	38,32	-10,39	11,42	18,82	109,42
2	100,92	45,62	2,11	3,41	47,32	137,51	-8,59
3	110,02	37,20	4,91	6,52	9,53	62,22	-40,29
4	90,02	63,42	-50,48	15,50	-29,87	45,22	-1,59
5	100,61	79,62	-6,50	16,51	-68,78	5,21	61,03
6	78,80	48,81	-4,69	36,02	-72,78	118,13	9,92
7	26,01	44,01	-37,48	-13,08	-267,20	-23,98	5,82
8	71,71	25,71	-57,18	-1,47	-231,99	12,02	43,54
9	53,01	30,11	-8,60	27,72	-120,18	-9,90	109,60
10	56,31	38,31	37,21	45,52	-76,09	68,21	185,83
11	90,22	26,32	55,30	66,61	-35,68	87,72	250,22
12	83,01	94,50	9,43	83,71	-79,80	50,21	275,12
13	56,02	140,00	-99,29	82,30	-81,28	65,00	371,62
14	55,33	44,52	-11,07	71,12	-89,00	66,32	253,41
15	47,61	-14,81	-47,58	30,32	-68,19	78,11	104,22
16	-20,20	-70,68	-16,10	22,73	-105,18	24,52	-49,58
17	5,43	-28,28	73,41	38,51	-86,40	43,12	-149,39
18	7,81	-22,38	129,91	42,22	-59,89	16,62	-28,09
19	29,81	-12,57	83,21	64,01	18,00	74,11	-2,07
20	-14,40	-40,79	50,59	14,71	-0,68	29,81	26,12
21	-8,88	-21,68	43,71	0,82	12,33	129,02	55,42
22	36,80	-0,18	54,01	26,31	7,02	79,21	23,33
23	6,02	-55,67	25,62	-15,37	-11,37	58,12	-0,20
24	44,12	-25,88	37,01	-3,18	-8,19	117,32	16,11

Příloha 12: Denní odchylky v prosinci 2015

## Technical data.

Performance and energy	CellCube FB 10/20/30 kW	CellCube FB 200 kW
Nominal charge output	10/20/30 kW	200 kW
Nominal discharge output	10/20/30 kW	200 kW
Capacity of the energy storage system	40/70/100/130 kWh	400/800/1600 kWh
<b>Battery and system voltage</b>		
Output voltage option	- 48 VDC; 120 VAC; 230 VAC (1-phase); 400 VAC (3-phase)	400 VAC
Duration of connection/ Reaction time	grid-independent: < 20 ms, remote converter: < 3 ms	
<b>Control system</b>		
Control via external interfaces	serial, TCP/IP, bus systems	
<b>Monitoring</b>		
Condition detection via remote monitoring by e-mail	State of charge (SOC), available energy, charge/discharge power output, and more	
<b>Efficiency</b>		
Charge/discharge cycle DC	up to 80 %	up to 80 %
Multi-stage management reduces power losses	3 independent, switchable circuits with energy-efficient pump control system	4 independent, switchable circuits with energy-efficient pump control system
<b>Self-discharge</b>		
Self-discharge in standby**	< 150 W	< 200 W
Self-discharge in tank	negligible (< 1% per year)	negligible (< 1% per year)
<b>Size and weight</b>		
Dimensions L x W x H	4,660 x 2,200 x 2,420 mm (15 x 7 x 8 ft)	6,060 x 2,440 x 5,800 mm* (20 x 8 x 19 ft)
Weight (empty condition)	3,8 - 4,5 t	20 t
Gross weight (filled condition)	7 - 14 t	60 t
<b>Climatic operating conditions</b>		
Climatic control	-40°C to +50°C (monthly average temperature)  The inside temperature is controlled between 20°C and 30°C by an intelligent temperature management system. Suitable insulation (for heating and cooling) allows deployment in any climate.	

Příloha 13: Technické parametry modulů CellCube



### CellCube - combination examples



### A solution for every requirement \*

Power (kW)	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	8 h	10 h
10	FB 10-40	FB 10-40	FB 10-40	FB 10-70	FB 10-70	FB 10-100	FB 10-100	FB 10-130
20	FB 20-40	FB 20-70	FB 20-70	FB 20-100	FB 20-130	FB 200-400	FB 200-400	FB 200-400
30	FB 30-40	FB 20-70	FB 30-100	FB 30-130	FB 200-400	FB 200-400	FB 200-400	FB 200-800
100	FB 200-400	FB 200-400	FB 10-40	FB 200-800	FB 200-800	FB 200-800	FB 200-1600	FB 200-1600
150	FB 200-400	FB 200-400	FB 200-800	FB 200-800	FB 200-1600	FB 200-1600	FB 200-1600	
200	FB 200-400	FB 200-800	FB 200-800	FB 200-1600	FB 200-1600	FB 200-1600		

\* The optimal combination of power and energy capacity are specified in each case (other combinations or oversizing are also possible)

Příloha 14: Doby vybíjení modulů CellCube

DATASHEET
125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

**FEATURES AND BENEFITS\***

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- 125V DC working voltage
- Active cell balancing
- Temperature and voltage monitoring
- CAN bus digital monitoring and communications
- High power density

**TYPICAL APPLICATIONS**

- Buses
- Electric trains and trolleys
- Heavy duty transportation
- Cranes, RTGS
- Utility vehicles
- Mining equipment



## PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BMOD0063 P125 B08
Rated Capacitance <sup>1</sup>	63 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	63 F
Maximum Capacitance, initial <sup>1</sup>	76 F
Maximum ESR <sub>DC</sub> initial <sup>1</sup>	18 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>DC</sub> <sup>1</sup>	100 A
Rated Voltage	125 V
Absolute Maximum Voltage <sup>2</sup>	136 V
Absolute Maximum Current	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum <sup>3</sup>	10 mA
Maximum Series Voltage	1500 V
Capacitance of Individual Cells <sup>11</sup>	3000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell <sup>11</sup>	3.0 Wh
Number of Cells	48
TEMPERATURE	
Operating temperature range (Cell case temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	65°C
Storage temperature range (Stored uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C

\*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details and enclosed information for applicable operating and use requirements.

**DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE**

**PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)**

<b>PHYSICAL</b>		<b>BMOD0063 P125 B08</b>
Mass, typical <sup>13</sup>		61 kg
Power Terminals		Radsok®
Recommended Torque - Terminal		N/A
Vibration Specification		ISO16750-3 Table 14
Shock Specification		SAE J2464
Environmental Protection		IP65
Cooling		Forced Air
<b>MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT</b>		
Temperature Interface		Serial Data (CAN)
Cell Voltage Monitoring		Group Voltage (CAN)
Connector		Deutsch DTM
Cell Voltage Management		VMS 2.0
<b>POWER &amp; ENERGY</b>		
Usable Specific Power, $P_d$ <sup>4</sup>		1,700 W/kg
Impedance Match Specific Power, $P_{max}$ <sup>5</sup>		3,600 W/kg
Specific Energy, $E_{max}$ <sup>6</sup>		2.3 Wh/kg
Stored Energy, $E_{stored}$ <sup>7</sup>		140 Wh
<b>SAFETY</b>		
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)		6,900 A
Certifications		RoHS, eMark
High-Pot Capability <sup>12</sup>		4,000 VAC

DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS		BMOD0063 P125 B08
Thermal Resistance ( $R_{\theta_{ca}}$ Case to Ambient), typical <sup>a</sup>		0.04°C/W
Thermal Capacitance ( $C_{th}$ ), typical		33,000 J/°C
Maximum Continuous Current ( $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ) <sup>b</sup>		140 A <sub>RMS</sub>
Maximum Continuous Current ( $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ ) <sup>b</sup>		240 A <sub>RMS</sub>
LIFE		
DC Life at High Temperature <sup>1</sup> (at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)		1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Projected DC Life at 25°C <sup>1</sup> (held continuously at Rated Voltage)		10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Projected Cycle Life at 25°C <sup>1,8,10</sup>		1,000,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Test Current		100 A
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)		4 years

*Příloha 18: Kalkulačka pro výpočet doby návratnosti investic*

```
%Program na výpočet doby návratnosti investic;

clc;
clear;

fprintf('Toto je program pro výpočet ekonomické efektivnosti.\n');
fprintf('Program vypočte dobu návratnosti investic, cenu zařízení, roční zisk a čistý zisk.\n');
fprintf('Zadejte vstupní hodnoty: \n\n');

%Zadání investičních nákladů
naklady = input('Zadejte náklady na 1 kWh v [Kč/kWh]: ');
while naklady<=0
    fprintf('\nHodnota musí být kladná.\n');
    naklady = input('Zadejte náklady na 1 kWh v [Kč/kWh]: ');
end

%Zadání požadované kapacity zařízení
kapacita = input('Zadejte požadovanou kapacitu zařízení v [MWh]: ');
while kapacita<=0
    fprintf('\nHodnota musí být kladná.\n');
    kapacita = input('Zadejte požadovanou kapacitu zařízení v [MWh]: ');
end

%Zadání životnosti zařízení
zivotnost = input('Zadejte předpokládanou životnost v [roky]: ');
while zivotnost<=0
    fprintf('\nHodnota musí být kladná.\n');
    zivotnost = input('Zadejte předpokládanou životnost v [roky]: ');
end

%Zadání počtu cyklů
cykly = input('Zadejte předpokládaný počet cyklů denně: ');
while cykly<=0
    fprintf('\nHodnota musí být kladná.\n');
    cykly = input('Zadejte předpokládaný počet cyklů denně: ');
end

%Zadání počtu provozních dní
dny = input('Zadejte počet dnů v roce, během kterých bude zařízení v provozu: ');
while dny<=0
    fprintf('\nHodnota musí být kladná.\n');
    dny = input('Zadejte počet dnů v roce, během kterých bude zařízení v provozu: ');
end

%Zadání účinnosti zařízení
ucinnost = input('Zadejte účinnost zařízení v [%]: ');
while ucinnost<=0||ucinnost>100
    fprintf('\nHodnota musí být v intervalu od 0 do 100.\n');
    ucinnost = input('Zadejte předpokládaný počet cyklů: ');
end

%Výpočet ceny zařízení, ročního zisku, doby návratnosti a čistého zisku
IN=naklady*kapacita*1000;
CF=2351*kapacita*(ucinnost/100)*cykly*dny*0.81;
```

```
Ts=IN/CF;  
Z=(zivotnost-Ts)*CF;  
  
%Výpis výsledků  
fprintf('\nInvestiční náklady tohoto zařízení jsou: %0.1f [Kč]\n',IN);  
fprintf('\nRoční zisk je: %0.1f [Kč]\n',CF);  
fprintf('\nDoba návratnosti investic je: %0.1f [roků]\n',Ts);  
fprintf('\nČistý zisk je: %0.1f [Kč]\n',Z);
```