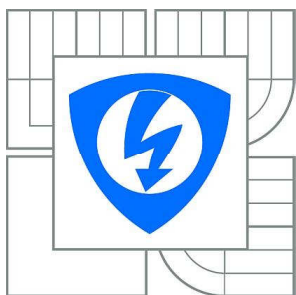


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ÚČINNOST PŘEMĚNY RŮZNÝCH DRUHŮ ENERGIÍ NA ENERGII ELEKTRICKOU A MOŽNOSTI JEJÍ AKUMULACE

THE CONVERSION EFFICIENCY OF DIFFERENT KINDS OF ENERGY INTO ELECTRICAL
ENERGY AND THE POSSIBILITY OF ITS ACCUMULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

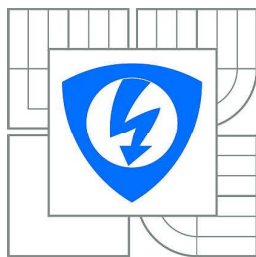
JAN OSTRUŠKA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN MACHÁČEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jan Ostruška

ID: 134578

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Účinnost přeměny různých druhů energií na energii elektrickou a možnosti její akumulace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod do oblasti existence energií a jednotlivých způsobů její přeměny.
2. Tvorba diagramu jednotlivých přeměn energií včetně způsobů její akumulace.
3. Matematický popis vytvořeného diagramu. Ukázkové výpočty jednotlivých případů přeměny energie včetně její případné akumulace.
4. Návrh simulačního programu pro demonstraci toku energie diagramem.
5. Zhodnocení a závěr práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Jan Macháček, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

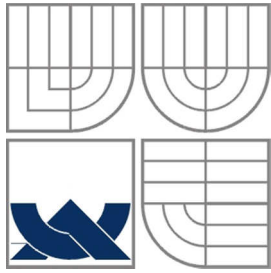
Bibliografická citace práce:

OSTRUŠKA, J. *Účinnost přeměny různých druhů energií na energii elektrickou a možnosti její akumulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Macháček, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Zároveň bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Macháčkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

Účinnost přeměny různých druhů energií na energii elektrickou a možnosti její akumulace

Jan Ostruška

vedoucí: Ing. Jan Macháček, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

The conversion efficiency of different kinds of energy into electrical energy and the possibility of its accumulation

by

Jan Ostruška

Supervisor: Ing. Jan Macháček, Ph.D.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Práce se zaměřuje na problematiku účinnosti přeměn různých druhů energií na elektrickou energii. V úvodu je čtenář stručně seznámen s energetickými zdroji a jejich potenciálem. V návaznosti na tuto kapitolu práce dále rozebírá účinnosti konkrétních přímých a nepřímých přeměn energií se zaměřením na faktory, které danou účinnost ovlivňují. Další část textu práce je věnována možnostem akumulace elektrické energie. Ty práce opět rozebírá z pohledu účinnosti cyklu a v závěru kapitoly pak porovnává jednotlivé možnosti akumulace. Obě části výroby a akumulace elektrické energie se pak spojují v přehledném diagramu přeměn energií. Na tento diagram práce dále navazuje matematickým popisem jeho části a návrhem simulačního programu, který by demonstroval tok energie diagramem.

KLÍČOVÁ SLOVA: Přeměna energií, elektrická energie, druhy energie, účinnost přeměny energie, fotovoltaický článek, palivový článek, termoelektrický článek, elektrický generátor, MHD generátor, tepelný oběh, větrná elektrárna, akumulace elektrické energie, přečerpávací vodní elektrárna, systém stlačeného vzduchu, setrvačnick, elektrochemický akumulátor, superkapacitor, vodíkové hospodářství, diagram přeměn energií

ABSTRACT

The thesis deals with the issues of the conversion efficiency of different kinds of energy into electric energy. Firstly, the thesis presents a brief introduction into types of energy sources and their capacity. Then, conversion efficiency of particular direct and indirect conversion is scrutinized, pointing to factors which affect conversion efficiency. The next chapter deals with the possibilities of accumulating electric energy. These are analysed as far as conversion efficiency is concerned as well and the end of the chapter concludes with comparison of these particular possibilities. Both parts of the process – power generation and its accumulation – are connected in comprehensive scheme of energy conversions. The thesis develops on this scheme by mathematic description of its components and by designing a simulation programme, which would show the flow of energy in the scheme.

KEY WORDS:

Energy conversion, electric power, electric energy, kinds of energy, energy conversion efficiency, photovoltaic cell, fuel cell, thermoelectric cell, electric generator, MHD generator, thermodynamic cycle, wind power, accumulation of electric power, pumped-storage hydroelectricity, compressed air system, flywheel, electrochemical accumulator, supercapacitor, hydrogen economy, figure of energy conversion

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	15
2 ZDROJE ENERGIE PRO ENERGETIKU	16
2.1 ENERGIE PŮVODEM ZE SLUNEČNÍ SOUSTAVY	16
2.1.1 ZÁŘIVÁ ENERGIE ZE SLUNCE	16
2.1.2 NEOBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE VZNIKLÉ PŮSOBENÍ SLUNCE – FOSILNÍ ZDROJE	16
2.1.3 SLAPOVÁ ENERGIE	17
2.1.4 VODNÍ ENERGIE	17
2.1.5 VĚTRNÁ ENERGIE.....	17
2.2 ENERGIE POCHÁZEJÍCÍ Z NITRA ZEMĚ.....	17
2.2.1 GEOTERMÁLNÍ ENERGIE	18
2.2.2 PRVKY S ENERGIÍ VYUŽITELNOU JADERNÝM ŠTĚPENÍM	18
2.2.3 PRVKY PRO JADERNOU SYNTÉZU	18
3 PŘEMĚNY ENERGIÍ A JEJICH ÚČINNOST	19
3.1 PŘÍMÉ PŘEMĚNY	19
3.1.1 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	19
3.1.2 PALIVOVÉ ČLÁNKY	23
3.1.3 TERMOELEKTRICKÉ ČLÁNKY PRO VÝROBU ELEKTRICKÉ ENERGIE	26
3.1.4 ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE – ELEKTRICKÉ GENERÁTORY	28
3.1.5 MAGNETOHYDRODYNAMICKÉ GENERÁTORY	29
3.2 NEPŘÍMÁ PŘEMĚNA ENERGIÍ NA ELEKTRICKOU.....	30
3.2.1 NEPŘÍMÁ PŘEMĚNA TEPELNÉ ENERGIE NA ELEKTRICKOU REALIZOVÁNA VYUŽITÍM TEPELNÉHO OBĚHU	31
3.2.2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	32
4 MOŽNOSTI AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	34
4.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY	35
4.1.1 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY	35
4.1.2 SYSTÉM STLAČENÉHO VZDUCHU	35
4.1.3 SETRVAČNÍKY	35
4.2 ELEKTROCHEMICKÉ PRINCIPY	36
4.2.1 ELEKTROCHEMICKÉ AKUMULÁTORY	36
4.2.2 SUPERKAPACITORY	37
4.2.3 VODÍKOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ.....	37
4.3 POROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	37
5 DIAGRAM PŘEMĚNY ENERGIÍ VČETNĚ AKUMULACE	40
6 MATEMATICKÝ POPIS VYTVOŘENÉHO DIAGRAMU PŘEMĚN ENERGIÍ	41

6.1 PŘEMĚNA ZÁŘIVÉ ENERGIE SLUNCE PŘES CHEMICKOU, TEPELNOU A MECHANICKOU ENERGII NA ELEKTRICKOU ENERGII (KLASICKÁ TEPELNÁ ELEKTRÁRNA).....	41
6.2 PŘEMĚNA ZÁŘIVÉ ENERGIE SLUNCE PŘES TEPELNOU A MECHANICKOU ENERGII NA ELEKTRICKOU ENERGII (SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNA, KOLEKTORY).....	42
6.3 PŘEMĚNA ZÁŘIVÉ ENERGIE SLUNCE NA ELEKTRICKOU ENERGII PŘÍMO (FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA)	45
6.4 PŘEMĚNA MECHANICKÉ ENERGIE VODNÍCH TOKŮ NA ELEKTRICKOU ENERGII (VODNÍ ELEKTRÁRNA)	46
6.5 PŘEMĚNA KINETICKÉ ENERGIE VĚTRU NA ELEKTRICKOU ENERGII (VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA) ...	47
6.6 PŘEMĚNA JADERNÉ ENERGIE SKRZ TEPELNOU A MECHANICKOU ENERGII NA ELEKTRICKOU ENERGII (JADERNÁ ELEKTRÁRNA).....	48
7 NÁVRH SIMULAČNÍHO PROGRAMU PRO DEMONSTRACI TOKU ENERGIE DIAGRAMEM	51
7.1 FUNKCE PROGRAMU A VOLBA PROGRAMOVACÍHO NÁSTROJE	51
8 ZÁVĚR.....	52
POUŽITÁ LITERATURA	54
PŘÍLOHA A – DIAGRAM PŘEMĚN ENERGÍ S VYZNAČENÍM PŘEMĚN, KTERÉ JSOU V PRÁCI ROZEBÍRÁNY	57
PŘÍLOHA B – ZÁVĚREČNÝ DIAGRAM KAPITOLY 6	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1: Rozložení energie dopadající na Zemi. Zdroj dat [4] a [5].</i>	16
<i>Obr. 3-1: Náhradní schéma fotovoltaického článku [10]</i>	20
<i>Obr. 3-2: Ampérvoltová charakteristika fotovoltaického článku [11]</i>	21
<i>Obr. 3-3: Vliv teploty fotovoltaického článku na A-V charakteristiku [12]</i>	21
<i>Obr. 3-4: Vliv intenzity slunečního záření na A-V charakteristiku fotovoltaického článku [12]</i>	22
<i>Obr. 3-5: Princip fungování palivového článku s vyznačeným tokem energií – modifikováno z [15].</i>	23
<i>Obr. 3-6: Náhradní elektrický obvod FC článku [10]</i>	24
<i>Obr. 3-7: Vliv napěťových ztrát [14]</i>	25
<i>Obr. 3-8: Princip vytváření napětí na kontaktech termoelektrického článku [18]</i>	26
<i>Obr. 3-9: Vývoj hodnoty ZT [19], used in industry - průmyslově používané, under development - předmětem výzkumu</i>	28
<i>Obr. 3-10: Tok činného výkonu elektrickým generátorem</i>	28
<i>Obr. 3-11: Zjednodušené schéma MHD generátoru, modifikováno z [22]</i>	30
<i>Obr. 3-12: Schéma Rankin-Clausiova tepelného oběhu. P - parogenerátor, T - turbína, G - elektrický generátor, K - kondenzátor, Č - napájecí čerpadlo</i>	32
<i>Obr. 3-13: Závislost součinitele výkonnosti na poměru rychlostí za turbínou a před ní. Maxima součinitel dosahuje při poměru rychlostí 1/3. Modifikováno z [26].</i>	33
<i>Obr. 4-1: Průběh spotřeby elektrické energie v ČR ve třetí středě v měsíci březnu (20.3.2013) Modifikováno z [27]</i>	34
<i>Obr. 4-2: Porovnání možností akumulace elektrické energie podle závislosti specifické hustoty energie na objemové hustotě energie [30].</i>	38
<i>Obr. 4-3: Porovnání možností akumulace elektrické energie podle nákladů na jednotku energie [30].</i>	38
<i>Obr. 4-4: Porovnání možností akumulace elektrické energie z hlediska účinnosti a životnosti [30].</i>	39
<i>Obr. 6-1: Proces přeměny zářivé energie Slunce na elektrickou energii v klasické tepelné elektrárně.</i>	41
<i>Obr. 6-2: Proces přeměny zářivé energie Slunce na elektrickou energii v klasické tepelné elektrárně s vyznačenou hodnotou energie v jednotlivých fázích.</i>	42
<i>Obr. 6-3: Proces přeměny zářivé energie Slunce na elektrickou energii v koncentrátorové solární elektrárně.</i>	43
<i>Obr. 6-4: Názorná ukázka zmíněných konfigurací solárních koncentračních elektráren. Vlevo je podélné uspořádání s lineárními parabolickými zrcadly, uprostřed je znázorněno věžovitě uspořádání a vpravo parabolické (talířové) uspořádání. Modifikováno z [35].</i>	43

<i>Obr. 6-5: Znáznornění procesu přeměny zářivé energie Slunce v solárních elektrárnách s vyznačenou hodnotou energie v jednotlivých fázích.</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6-6: Znáznornění procesu přeměny zářivé energie Slunce ve fotovoltaických elektrárnách s vyznačenou hodnotou energie v jednotlivých fázích</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6-7: Závislost celkové účinnosti vodní turbína na měrných otáčkách pro tři typy turbín. Převzato z [10].</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6-8: Proces přeměny kin. a pot. energie vodního toku na elektrickou energii s vyznačeným aktuálním množstvím energie v dílčím kroku.</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 6-9: Proces přeměny kinetické energie větru na elektrickou energii s vyznačenými aktuálními velikostmi hladiny energie v jednotlivých krocích</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 6-10: Proces přeměny jaderné energie na elektrickou v jaderné elektrárně.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 6-11: Proces přeměny jaderné energie na elektrickou energii s aktuálními velikostmi hladiny energie v jednotlivých částech procesu.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-1: Ukázka simulačního programu v Microsoft Excel podle vytvořeného návrhu.</i>	<i>51</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 6-1: Průměrné rozdělení energií z jednoho štěpení ^{235}U [37]49

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
A	Plocha	m^2
B	Magnetická indukce	T
C	Elektrická kapacita	F
C	Solární koncentrační poměr	-
E	Energie	kWh
E_{Nernst}	Napětí palivového článku naprázdno	V
F	Faradayova konstanta	$C \cdot mol^{-1}$
G	Gibbsova volná energie	J
H	Entalpie	J
I	Elektrický proud	A
I	Intenzita záření	$W \cdot m^{-2}$
J	Proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
J	Moment setrvačnosti	$kg \cdot m^2$
Q	Teplo	J
P	Výkon	W
R	Elektrický odpor	Ω
S	Entropie	$J \cdot K^{-1}$
S	Seebeckův koeficient	$V \cdot K^{-1}$
T	Termodynamická teplota	K
U	Elektrické napětí	V
U_f	Stupeň využití paliva	-
V	Objem	m^3
Z	Činitel jakosti	K^{-1}
c	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_p	Součinitel výkonnosti	-
m	Hmotnost	kg
n	Počet zúčastněných elektronů	-
n_q	Měrné otáčky	min^{-1}
v	Rychlost	$m \cdot s^{-1}$
α	Absorpční koeficient	-
ε	Emisivita	-
η	Účinnost	-
κ	Měrná tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Měrná elektrická vodivost	$S \cdot m^{-1}$
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
ω	Úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$
CAES	Systémy akumulující energii ve stlačeném vzduchu (Compressed air energy storage)	
CHP	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (Combined Heat and Power)	

FV	Fotovoltaika
FC	Palivový článek
KSE	Koncentrátorová solární elektrárna
KTE	Klasická tepelná elektrárna
Li-ion	Lithium-iontový akumulátor (Lithium-ion)
MCFC	Palivové články s roztavenými uhlíčitany (Molten Carbide Fuel Cell)
MHD	Magnetohydrodynamický generátor
NiCd	Nikl-kadmiový akumulátor
NiMH	Nikl-metal hydridový akumulátor (Nickel–Metal Hydride)
PEMFC	Palivový článek s polymerním elektrolytem (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
RTG	Radioizotopový termoelektrický generátor
TG	Termoelektrický generátor

1 ÚVOD

Elektrická energie, ačkoli je skryta v pozadí každodenních rutin člověka, si za poslední stolení vydobyla neotřesitelnou pozici v používání a bez ní si dnes jen málokdo dokáže představit život. Světová spotřeba elektrické energie tak činí ročně asi 19,016 PWh (údaj z roku 2011 [1]). Důvody, proč je po elektrické energii taková poptávka jsou, že se jedná o ušlechtilou formu energie, relativně jednoduše se přenáší na velké vzdálenosti a snadno transformuje na jiné druhy energií.

Už bylo zmíněno, jak gigantická je světová spotřeba elektrické energie, a s tímto faktem je spjatá i její výroba. Výroba elektrické energie je silně vžitý avšak nepřesný pojem, protože energie se nevyrábí, ale pouze přeměňují z jednoho druhu na jiný. Zcela přesně to vyjadřuje zákon zachování energie, který říká, že celková energie izolované soustavy je konstantní [2]. Možností přeměn různých druhů energií na elektrickou je mnoho, ale celosvětově dnes nejvíce využívána energie je původem z fosilních zdrojů (tedy chemická a jaderná). Menšinový příspěvek ve výrobě el. energie, avšak dlouhodobě rostoucí, má využití obnovitelných zdrojů.

Hovoříme-li o přeměnách energií, je nutné zmínit jejich účinnost, která vyjadřuje, jaká část vstupní energie se přemění na výstupní energii. Konkrétně pak s účinností přeměny tepelné energie na jiné druhy souvisí dva energetické pojmy z termodynamiky – „exergie“ a „anergie“. O exergii hovoříme jako o části tepelné energie, která může být beze ztrát transformována na vyšší formy energie (např. mechanická energie). Zbývá část tepelné energie – anergie – může být využita jen k ohřívacím účelům [3]. Velikost exergie a anergie tedy má velký vliv na účinnost přeměny tepelné energie na jiné druhy. Účinnost této dílčí přeměny pak velmi snižuje celkovou účinnost přeměny energií na elektrickou energii.

Celková účinnost přeměny různých druhů energií na elektrickou je obecně důležité číslo každé výroby, protože tak mohou být jednotlivé způsoby výroby srovnávány. Navíc také platí, že je dobré znát i maximální teoretické hodnoty účinností přeměn energií, které mohou motivovat ke zvyšování těch dosavadních. Celkově se tak přispěje k lepšímu využití energie primárního zdroje. Dále se jeví jako vhodné sestavit přehled přeměn různých druhů energie na elektrickou, zmapovat jejich účinnosti a vytvořit diagram, ve kterém budou tyto přeměny názorně zaznačeny.

Navzdory již zmíněným kladným vlastnostem el. energie má tento druh i jednu podstatnou nevýhodu. Tou je, že momentální výroba el. energie se musí (aspoň přibližně) rovnat její aktuální spotřebě. Pokud je tedy v elektrizační soustavě přebytek elektrické energie, je vhodné jí zbytečně neplýtvat a přeměnit na jiný druh energie – například potenciální polohovou v přečerpávací vodní elektrárně. Následně pak v období zvýšené spotřeby, kterou nestačí pokrýt stabilní výroba, se přemění tato uložená energie zpět na el. energii. Tento problém ukládání el. energie se nazývá akumulace elektrické energie a v poslední době je stále aktuálnější především kvůli rostoucímu využívání obnovitelných zdrojů. S využitím akumulace elektrické energie tak není nutné při nadbytku výroby obnovitelný zdroj odstavovat. Možnostem akumulace je věnována prostřední část textu, která doplňuje celkový diagram přeměny energií

2 ZDROJE ENERGIE PRO ENERGETIKU

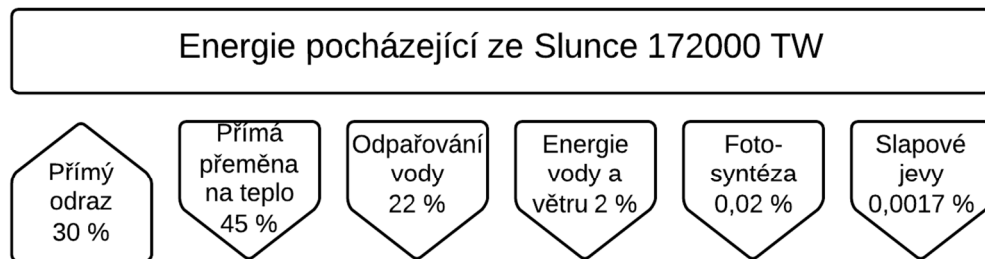
K výrobě elektrické energie využíváme přeměn různých druhů energií právě na energii elektrickou. Tyto druhy energií lze třídit podle různých hledisek. Podle obnovitelnosti na vyčerpatelné a nevyčerpatelné (obnovující se v kratším časovém období), nebo podle jejího původu na energii solární a pozemskou. Většina zdrojů energie pochází z kosmického prostoru okolo Země. Její původ pak lze de facto omezit jen na naši sluneční soustavu – na energii ze Slunce a Měsíce a na energii pocházející z nitra Země. V následujících podkapitolách budou tyto druhy energií podrobněji rozebrány.

2.1 Energie původem ze sluneční soustavy

Jako hlavní zdroje energie v této kategorii můžeme považovat Slunce a Měsíc. Oboje tělesa svou hmotností ovlivňují Zemi prostřednictvím gravitačních sil. Slunce je navíc zdrojem elektromagnetického záření.

2.1.1 Zářivá energie ze Slunce

Tato zářivá energie vzniká v důsledku termojaderných reakcí v nitru hvězdy a na život na Zemi má zásadní význam. Z pohledu existence lidstva je Slunce nevyčerpatelným zdrojem energie. Výkon slunečního záření dopadajícího na Zemi činí asi 172000 TW [4]. Rozebere-li se využití tohoto příkonu detailněji, tak zpět od zemského povrchu se odrazí asi 30 %, přímo na tepelnou energii se přemění 45 % příkonu, na odpařování vody z vodních ploch se spotřebuje 22 % a z dalších větších spotřeb stojí za zmínku 2 %, které se předají energii větru (detailněji viz obr. 2-1).



Obr. 2-1: Rozložení energie dopadající na Zemi. Zdroj dat [4] a [5].

Plošnou hustotu zářivého výkonu ve střední vzdálenosti Země od Slunce (měřenou mimo Zemskou atmosféru) udává tzv. solární konstanta. Podle NASA je její hodnota $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [6]. Po prostupu záření atmosférou lze zavést plošnou hustotu záření, která dopadá na povrch Země. Ta je kromě meteorologických faktorů závislá především na zeměpisné šířce a pro polohu České republiky tak dosahují maximální hodnoty hustoty záření na povrchu cca $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [4]. V porovnání s jinými současnými zdroji energie je zářivá energie ze Slunce považována za málo koncentrovanou.

2.1.2 Neobnovitelné zdroje energie vzniklé působení Slunce – fosilní zdroje

V předchozím odstavci bylo zmíněno, že zářivá energie ze Slunce je málo koncentrovaná, avšak na povrch Země dopadá již od jejího vzniku (cca 4,5 miliardy let). Po zrodu života na Zemi se tato zářivá energie ukládala v tělech rostlin ve formě chemické energie prostřednictvím fotosyntézy. Rozkladem těchto těl a vhodnými geologickými procesy (vysoký tlak, teplota a dlouhá doba trvání) se chemická energie v nich obsažená více koncentrovala. Za miliony let se

tak vytvořily gigantické zásoby energie. Jmenovitě se jedná o zásoby uhlí, ropy a zemního plynu, dále pak lze uvést ještě zásoby břidlic a dehtových písků. Energetický potenciál chemických vazeb pak lze snadno uvolnit spalováním.

2.1.3 Slapová energie

Je energie pohybu velké vodní plochy. Hlavním aktérem je Měsíc, který svou gravitací přitahuje masy vody k sobě, a hladina se tak na ovlivňovaném místě zvedá. Celý tento proces je ještě doplněn rotací Země, a dochází tedy k pravidelnému zvedání a klesání hladiny. K slapům dochází pravidelně v intervalu zhruba 12 hodin. Jedná se tedy o jasně predikovatelný obnovitelný zdroj energie, avšak potenciál ke krytí celosvětových spotřeb energie zde není.

2.1.4 Vodní energie

Vodní energie je historicky jeden z nejstarších zdrojů energie využívaný lidstvem. Pod samotný pojem pak můžeme zařadit více druhů energie. V první řadě tak můžeme u vodních mas využívat jejich kinetickou a potenciální polohovou a tlakovou energii. Tuto energii získávají například horské vodní toky tím, že dešťová voda stéká přirozenou gravitací do údolí. Dalším možným příkladem využití je energie vln, které vytváří na volné hladině vítr – taktéž vzniklý činností Slunce. Potenciální energii zase akumulují vodní masy v přehradních nádržích, které jsou sice umělým výtvozem, avšak v diagramu zatížení mají stálé zastoupení. Druhý typ energie, který lze z vody využívat, je tepelná. Ta vzniká absorpcí tepelné energie ze slunečního záření. Při hladině oceánů a moří se tak teplota vody pohybuje okolo 25 °C, ale v hloubkách okolo 400 m je už zhruba 5 °C. Tento teplotní rozdíl pak mohou využívat ke své práci tepelné motory, které mohou vyrábět elektrickou energii.

2.1.5 Větrná energie

Podobně jako energie vodních toků je větrná energie využívaná člověkem již několik tisíc let. Její vznik je spojen s potřebou vyrovnávání rozdílných atmosférických tlaků, které vznikají nerovnoměrným ohříváním zemského povrchu a v důsledku rotace Země. Kinetická energie větru je tedy původem tlaková potenciální energie vzniklá z tlakového rozdílu. V České republice se celkový potenciál proudění vzdušných mas odhaduje na 5610 GWh ročně [7]. Hlavním problémem ale je, že energie větru se vyskytuje v malé koncentraci, a tedy pro výrobu potřebného výkonu je nutná instalace většího počtu zařízení.

2.2 Energie pocházející z nitra Země

Při vzniku Země se planeta zformovala tak, že nyní je okolo pevného železného jádra tekutá vrstva roztavených kovů. Celá planeta navíc ještě rotuje okolo své vlastní osy a Slunce. Možnosti zdrojů energie, které Země naskýtá, jsou skryté jednak v jaderné energii částic v zemské kůře a také v gravitační síle. Samozřejmě zde může být zahrnuta i chemická energie paliv jako je například uhlí a ropa. Tuto energii ale vytvořilo sluneční záření, a proto je také zařazena v předchozí podkapitole. Země již od dob svého formování obsahuje suroviny s potenciálem pro jaderné štěpení, resp. jadernou syntézu. Některé z těchto prvků jsou radioaktivní. Kromě využití těchto prvků pro jaderné reakce známe také jejich projev trvalého rozpadu radioaktivních částic v nitru Země. Nazývá se geotermální energií a spolu s energií uvolněnou při samovolném radioaktivním rozpadu ji tvoří ještě působení slapových sil. V této podkapitole budou tedy zmíněny prvky s využitelnou jadernou energií a dále potenciál geotermální energie.

2.2.1 Geotermální energie

Geotermální energie je energie vycházející z nitra planety. Na povrchu Země se projevuje erupcemi sopek, horkými prameny, výrony horké páry nebo gejzíry. Celkový světový potenciál geotermální energie je těžko vyčíslitelný, protože množství využitelné energie závisí například na geologickém podloží a na hloubce vrtu, z něhož se tato energie získává. Odhadem je asi 324000 TWh [3].

2.2.2 Prvky s energií využitelnou jaderným štěpením

Mezi prvky s energií využitelnou k jadernému štěpení jmenovitě patří uran, plutonium a výhledově i thorium. Tyto prvky mají těžké atomové jádro a jsou tedy vhodné k jadernému štěpení. Uran je kov nacházející se v zemské kůře v průměrné koncentraci 2,7 ppm. Na Zemi se tento prvek nachází jako směs tří izotopů – ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U . Procentuálně největší zastoupení ze všech izotopů má ale nejstabilnější ^{238}U (99,3 %). Pro energetické účely je nejvhodnější snáze štěpitelný izotop ^{235}U , který se musí vyrobit ze stabilního ^{238}U tzv. obohacováním. Dalším ke štěpení používaným prvkem je plutonium. Je to velmi toxický kov v přírodě se vyskytující jen ve velmi malých stopových množstvích v uranových rudách, proto je nutné ho vyrábět. Pro energetiku je nejdůležitější izotop ^{239}Pu . Vyrábí se reakcí neutronu s ^{238}U . Největší potenciál v jaderné energetice má poslední zmiňovaný stříbrně bílý prvek thorium. Díky dlouhému poločasu rozpadu se tento prvek běžně vyskytuje v zemské kůře (koncentrace cca 10 mg/kg). Z thoria zachytem neutronu poté vzniká izotop ^{233}U , který je výborným jaderným palivem a zdrojem neutronů. Při jaderné štěpné reakci se energie uvolňuje rozštěpením výchozí prvku na dvě části s celkovou energií nižší, než měl výchozí prvek. [8]

2.2.3 Prvky pro jadernou syntézu

Na rozdíl od prvků pro jaderné štěpení mají tyto prvky velmi lehké atomové jádro. Jako vhodné prvky se tedy jeví těžký vodík (deuterium) nebo lithium. Při jaderné syntéze (fúzi) dochází ke slučování těchto lehkých jader za vzniku těžších prvků a uvolnění energie. Její výhodou je nejen velké množství uvolněné energie při reakcích, ale také dostupnost potřebných prvků, protože uvažované deuterium je přirozeně obsaženo ve vodíku (v poměru 1:6000). Ve světových oceánech je tedy odhadem $2,6 \cdot 10^{13}$ tun deuteria. Dosavadním problémem průběhu jaderné fúze je její technické zajištění, protože proces vyžaduje vysoké teploty a specifické podmínky pro trvalé udržení.

Celkově lze říci, že pro každý primární zdroj energie na zemi nelze stoprocentně určit jeho původ, protože Země je otevřená soustava, na kterou a ve které působí mnoho zdrojů energie současně navzájem se sčítajících. Zmíněné rozdělení ale dává přehled o většinovém původu energie. Například chemická energie fosilních paliv je sice uložena pod povrchem Země, ale její původ je ze slunečního záření.

3 PŘEMĚNY ENERGÍÍ A JEJICH ÚČINNOST

Druhy energií, které jsou k dispozici jednak z prostředí sluneční soustavy nebo z nitra Země se přeměňují na elektrickou energii různými procesy v zařízeních tomu uzpůsobených. Přeměny na elektrickou energii jsou přímé, při kterých se vstupní energie (energie záření, tepelná, mechanická, ...) v daném zařízení přeměňuje na elektrickou energii bez mezistupně. Příkladem je fotovoltaický článek, termočlánek nebo piezoelektrický jev. Druhým a více častým způsobem je nepřímá přeměna vstupní energie na elektrickou. V tomto případě transformace probíhají s mezistupni. Příkladem je využití Rankin-Clausiova cyklu, kde parní oběh turbínou pohání elektrický generátor. Tato kapitola je věnována procesům transformace různých druhů energie na elektrickou energii a především jejich účinnosti. Obecně můžeme účinnost definovat následujícím vztahem, kde P_1 značí výkon na výstupu ze zařízení vyrábějícího elektrickou energii a P_2 je příkon, tedy výkon který do zařízení přeměňujícího energii vstupuje.

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \quad (3.1)$$

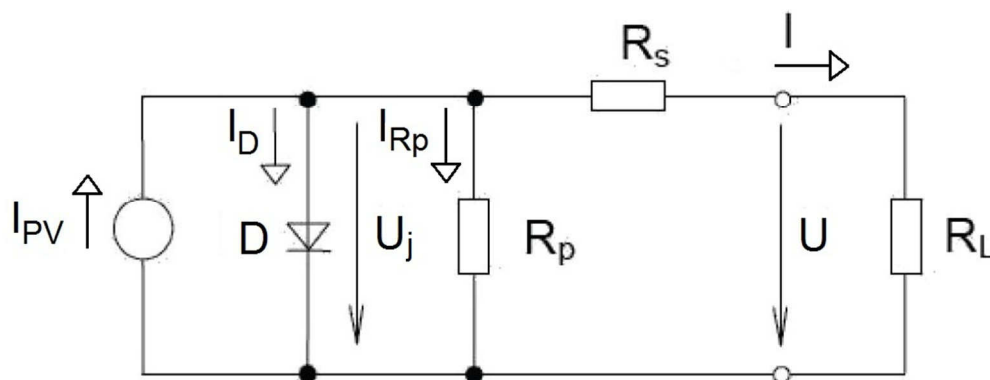
3.1 Přímé přeměny

U přímých přeměn je výchozí energie transformována na elektrickou energii bez jakýchkoli mezistupňů. Tato zařízení lze tedy považovat z hlediska procesu přeměny energií za jednodušší, avšak mnohdy jsou tyto přeměny podmíněné znalostí specifických fyzikálních jevů. Jejich zastoupení při výrobě elektrické energie je zatím malé, vyjma principu přímé přeměny mechanické energie na elektrickou pomocí elektromagnetické indukce.

3.1.1 Fotovoltaické články

Někdy také nazývány solární články, jsou zařízení přímo přeměňující energii záření na elektrickou energii. Zdrojem zářivé energie je pro účely energetiky výhradně Slunce. Princip fungování fotovoltaických (zkráceně FV) článků je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu. Poprvé byl tento jev pozorován roku 1839 fyzikem A. E. Becquerelem. O bezmála 120 let později byl vyroben první FV článek s účinností přeměny asi 4 %. Základem dnešního FV článku je polovodičový PN přechod. FV články generují stejnosměrné napětí, přičemž potřebné velikosti se docílí jejich sériovým spojením na fotovoltaickém panelu. [9]

Absorpcí kvanta elektromagnetického záření, jehož energie odpovídá šířce zakázaného pásu energií daného polovodiče, dochází k uvolnění elektronu z valenčního pásu do vodivostního, který za sebou zanechá kladně nabitou díru. Vzniklý elektron je dále přitahován do oblasti polovodiče typu N a zanechaná díra do oblasti typu P, na PN přechodu se vytvoří elektrické napětí (zhruba 0,5 V u křemíkových článků). Po připojení zátěže protéká obvodem proud. Tento proud lze vyjádřit pomocí náhradního schématu FV článku na obr. 3-1, který obsahuje elementární elektrické součástky.



Obr. 3-1: Náhradní schéma fotovoltaického článku [10]

Z náhradního modelu FV článku plyne, že proud I dodávaný do zátěže R_L je podle prvního Kirchhoffova zákona složen ze tří dílčích proudů. Ze zářením generovaného proudu I_{PV} , z proudu I_D tekoucího propustně polarizovanou diodou, která reprezentuje PN přechod s probíhajícím fotoelektrickým jevem, a z proudu tekoucího paralelním odporem R_p označeným I_{Rp} . Matematicky to lze vyjádřit takto:

$$I = I_{PV} + I_D + I_{Rp} \quad (3.2)$$

Generovaný proud je dále závislý na aktivní ploše A FV článku a proudové hustotě J_{PV} , která je tvořena nosiči náboje zachycenými v oblastech PN přechodu (rovnice 3.3). Velikost proudu diodou a proudu paralelním odporem je dána výrobou FV článku.

$$I_{PV} = A \cdot J_{PV} \quad (3.3)$$

Z náhradního modelu FV článku dále vyplývá, že výstupní napětí FV článku je napětí na diodě U_j snižené o úbytek napětí způsobený sériovým odporem R_s . Výsledné napětí fotovoltaického článku je pak dáno následujícím vztahem:

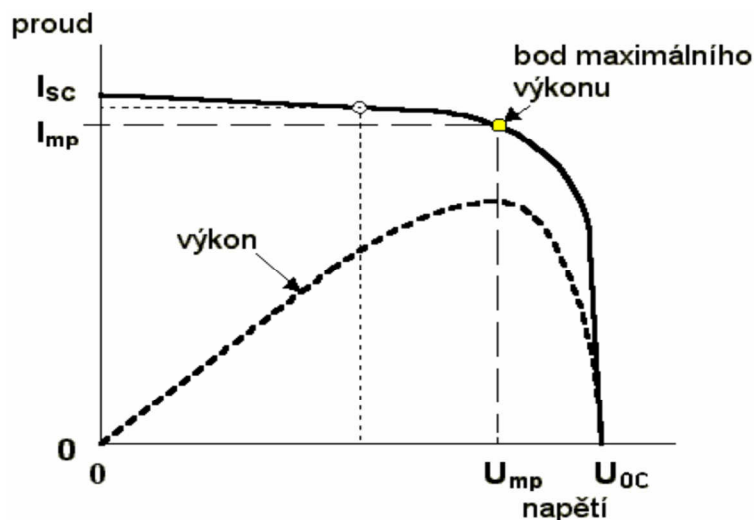
$$U = U_j - R_s \cdot I \quad (3.4)$$

Účinnost FV článku je fyzikálně definována jako podíl výkonu P , který článek dodává, k výkonu P_0 na článek dopadajícího:

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_0} \quad (3.5)$$

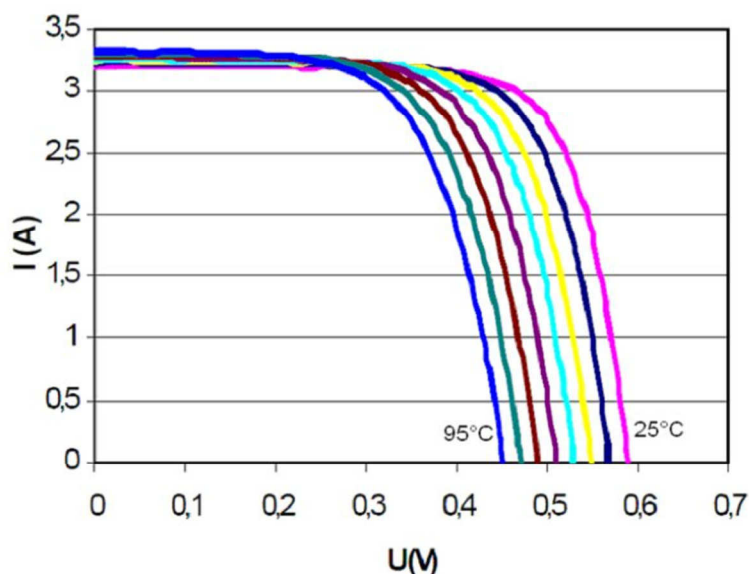
Napětí U_{mp} a proud I_{mp} zde značí jejich hodnoty při maximálním výkonu. Závislost proudu na napětí ukazuje ampérvoltová charakteristika na obr. 3-2 s vyznačeným pracovním bodem, ve kterém je dodávaný výkon maximální. Výkon P_0 dopadající na plochu FV článku se pro prvotní rozbor účinnosti považovat za konstantní (asi 1000 W/m^2 – reálně je však závislý na propustnosti atmosféry, ročním období a na dané zeměpisné šířce). Velikost účinnosti FV článku je tedy závislá na součinu U_{mp} a I_{mp} . Ze vztahů 3.2, 3.3 a 3.4 pak plynou jejich závislosti. Souhrnně je

tedy účinnost FV článku závislá na velikosti aktivní plochy článku A , proudové hustoty J_{PV} , napětí na diodě U_j a velikosti paralelního a sériového odporu R_p a R_s .



Obr. 3-2: Ampérvoltová charakteristika fotovoltaického článku [11]

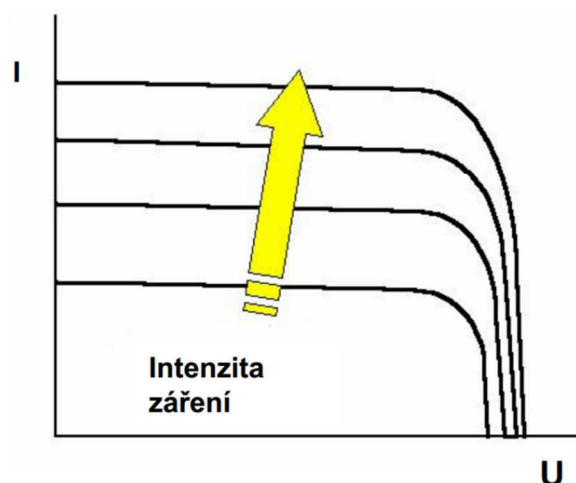
Parametry U_j , R_s a R_p jsou v podstatě dány materiálem a technickou dokonalostí výroby FV článku, významná je ale jejich teplotní závislost. Při rostoucí teplotě je z výstupních hodnot napětí a proudu výraznější pokles napětí naprázdno U_{oc} , který je například pro FV články z krystalického křemíku asi 0,4 % při změně teploty o 1 K. Účinnost u takovýchto článků pak klesá přibližně o 0,5 %/K. V extrémních podmínkách špatného chlazení FV článku (např. v letním období při bezvětří) může povrchová teplota článku dosáhnout teploty až 90 °C. Proto také FV články dosahují nejvyšší účinnosti přeměny energie v zimních měsících. Možný vliv teploty na ampérvoltovou charakteristiku FV článku je na obr. 3-3.



Obr. 3-3: Vliv teploty fotovoltaického článku na A-V charakteristiku [12]

Dalším významným faktorem ovlivňujícím účinnost je intenzita dopadajícího záření, která má přímý vliv na proudovou hustotu J_{PV} , respektive tedy i na proud fotovoltaického článku. Pro články s velkým sériovým odporem R_s je závislost účinnosti na rostoucí intenzitě záření nepřímá (tento jev se vyskytuje především u tenkovrstvých FV článků). Opačným

případem jsou články s malým sériovým odporem R_s , kde s rostoucí intenzitou záření roste i účinnost FV článku. Příklad vlivu intenzity záření na A-V charakteristiku je na obr. 3-4.



Obr. 3-4: Vliv intenzity slunečního záření na A-V charakteristiku fotovoltaického článku [12]

Z hlediska vnitřní přeměny energie záření na elektrickou energii ve fotovoltaickém článku je horní limit účinnosti omezen Shockley–Queisserovým limitem. Například pro PN přechod z krystalického křemíku je tento limit 33 % [13] (uvažovaná intenzita záření je 1000 W/m^2 [4]), zatímco v laboratořích dosahují tyto články účinnosti kolem 24 % [13]. U sériově vyráběných je pak účinnost přeměny energií výrazně nižší (na úrovni 50 až 65 % teoretického maxima [13]) z důvodů většího rozptylu světla od krycího skla, částečného zakrytí povrchu sběrnými elektrodami nebo i kvůli nižší kvalitě materiálu použitého při průmyslové výrobě.

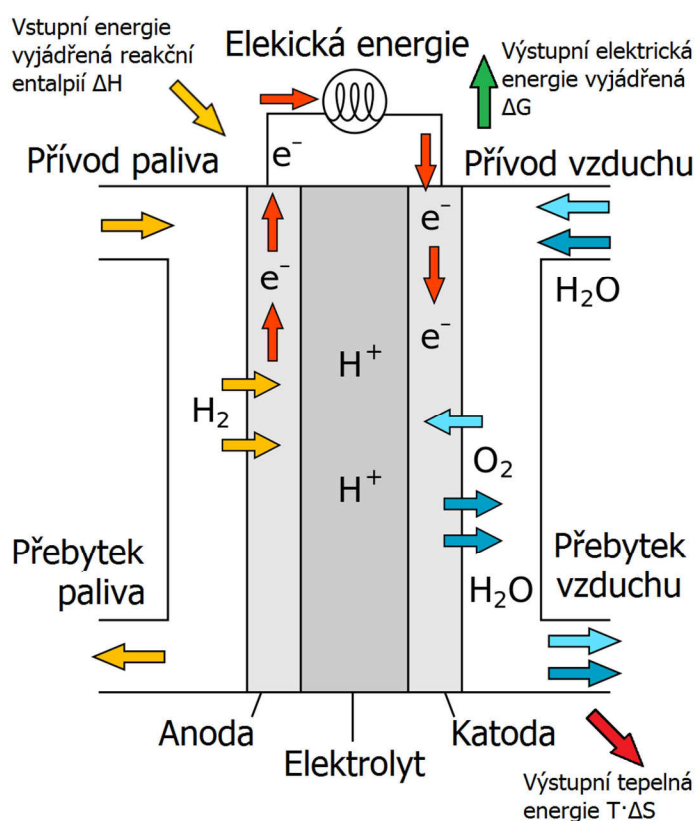
Shockley–Queisserův limit pro FV článek lze zvýšit použitím více PN přechodů (resp. většího počtu vrstev), které tím pádem pohltnou větší spektrum energií fotonů dopadajících na přechod. Pro články se dvěma PN přechody (zkráceně dvouvrstvé) je pak teoretická účinnost přeměny 42 %, pro třívrstvé články 49 % [13]. Účinnosti dosažené při laboratorní výrobě jsou samozřejmě vždy nižší a taktéž i účinnosti průmyslově vyráběných článků jsou oproti těm laboratorním menší. Maximální teoretické účinnosti 68 % by bylo dosaženo při použití nekonečného počtu vrstev [13].

Dalšího možného zvýšení Shockley–Queisserova limitu můžeme dosáhnout u tzv. koncentrátorových fotovoltaických článků. Tyto články jsou vybaveny optickým zařízením, které koncentruje záření na FV článek a zvýší tedy intenzitu dopadajícího záření. Navíc také FV panely bývají vybaveny sledovacím zařízením polohy Slunce, které zajišťuje přísun energie záření po většinu dne. Teoretická účinnost přeměny energií pak může dosáhnout u takovýchto jednovrstvých článků až 41 %, dvouvrstvých 55 %, třívrstvých 63 % a limitu 86 % pro nekonečný počet vrstev [13].

S rostoucím počtem vrstev rostou samozřejmě náklady na výrobu článku, jak kvůli větší technické náročnosti, tak kvůli nutnosti použití dražších materiálů (tellur, selen, indium). Díky tomuto faktu jsou stále nejvíce vyráběné křemíkové krystalické jednovrstvé články (nicméně v posledních letech začínají být ekonomicky výhodné i dvouvrstvé články). Cena jednovrstvého křemíkového článku se na trzích pohybuje okolo 2 USD/Wp [13] (Wp udává výkon při ozáření intenzitou 1000 W/m^2 a teplotě okolí $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

3.1.2 Palivové články

Palivové články (anglicky fuelcells – zkráceně FC) jsou zařízení využívající principu přímé přeměny chemické energie na elektrickou energii. Obecně v nich probíhají oxidačně-redukční chemické reakce. Oxidační činidlo (např. kyslík O_2) je tak přiváděno na katodu a zde se redukuje. Vzniklý anion je pak transportován elektrolytem ke katodě, kde probíhá opačný proces – přiváděné palivo (např. vodík H_2) se oxiduje a reaguje s dodávanými aniony za vzniku příslušné molekuly (v uvedeném případě kyslíku a vodíku je to voda). Elektrony, které reakcí anionů na katodě vzniknou, jsou pak vedeny vnějším obvodem na anodu. Mezi katodou a anodou vzniká rozdíl elektrického potenciálu a po připojení zátěže pak obvodem protéká stejnosměrný proud. Princip fungování je názorně ukázán na obrázku 3-5 a je pro všechny typy palivových článků stejný. Jednotlivé typy článků se pak navzájem liší především konkrétními chemickými reakcemi na katodě a anodě, provozní teplotou či tlakem, použitými materiály elektrod a elektrolytem. Příkladem typů článků jsou PEMFC články vybavené polymerní membránou, která je výborným protonovým vodičem. Tento článek pracuje s vodíkem a kyslíkem za vzniku vody. Dalším příkladem je článek MCFC u kterého je elektrolyt z roztavených karbidů lithia a draslíku. Takový článek pak pracuje s vodíkem, oxidem uhelnatým, kyslíkem a oxidem uhličitým. [14]



Obr. 3-5: Princip fungování palivového článku s vyznačeným tokem energií – modifikováno z [15]

Při chemické přeměně reaktantů na produkty v palivovém článku dochází ke změně reakční entalpie ΔH charakterizující soustavu před a po chemické reakci. Z této energie je ale pro přeměnu na elektrickou energii využita jen část – tzv. Gibbsova volná energie ΔG . Její velikost vyjadřuje následující vztah:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S, \quad (3.6)$$

kde T je termodynamická teplota při reakci a ΔS je změna reakční entropie. Toky energií v FC jsou vyznačené na obr. 3-5. Ze vztahu 3.6 plyne závislost Gibbsovy volné energie na termodynamické teplotě.

Maximální elektrická účinnost η_{max} palivového článku lze vyjádřit jako poměr Gibbsovy volné energie a maximální možné energie vzniklé při slučování paliva a okysličovadla.

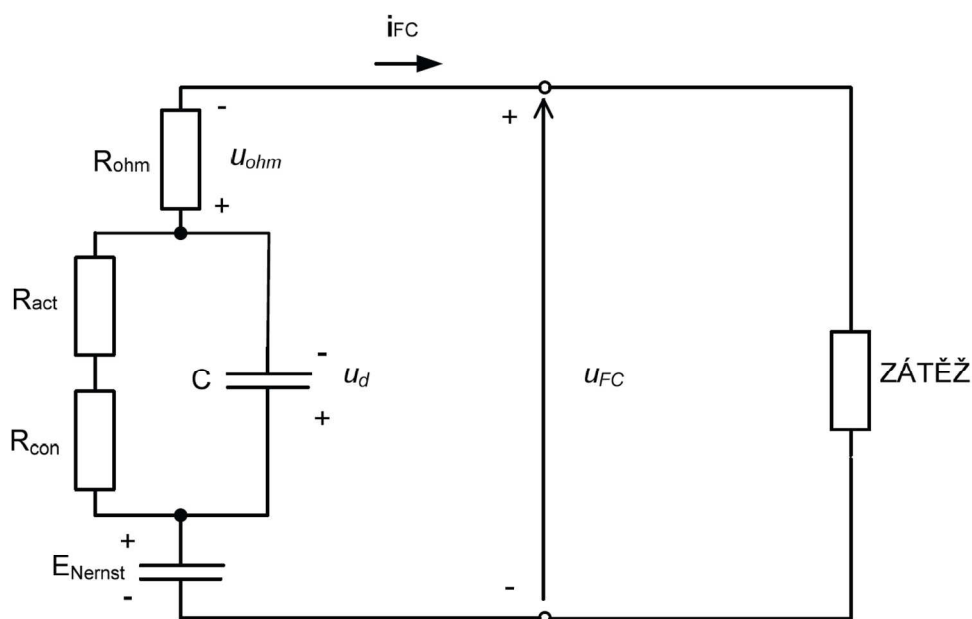
$$\eta_{max} = \frac{\Delta G}{\Delta H}. \quad (3.7)$$

Při práci palivového článku v reálných podmínkách je ale tato maximální účinnost snižována, a proto se zavádí další dílčí účinnosti vyjadřující ztráty. Jako první uvedeme ztrátu vzniklou nevyužitím plného množství přiváděného paliva. Vyjadřuje ji tzv. stupeň využití paliva U_f a je určen poměrem paliva, které v palivovém článku skutečně zreaguje a paliva do FC článku přivedeného. Velikost stupně využití paliva se dá určit jen experimentálně, avšak u článků s velkými výkony se očekává až 90 % a pro vodíkové články až 100 % [14].

Napětí U_{ideal} , které lze na kontaktech palivového článku teoreticky dosáhnout je dáno vztahem 3.8, kde n značí počet zúčastněných elektronů při chemické reakci a F je Faradayova konstanta.

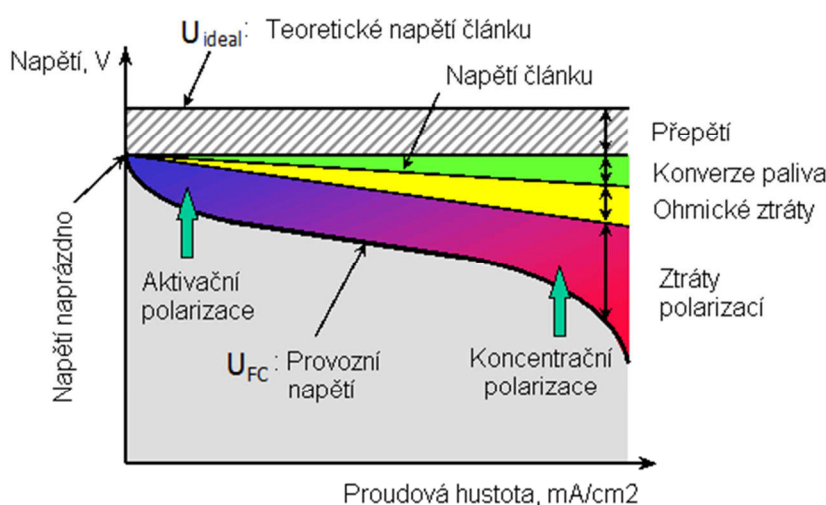
$$U_{ideal} = \frac{\Delta G}{n \cdot F}. \quad (3.8)$$

Tato rovnice ale stanovuje napětí článku při ideálních podmínkách, tedy když se nemění provozní tlak ani teplota. Dále nezohledňuje ztráty mající vliv na napětí. Skutečné napětí FC je pak nižší než jeho ideální hodnota. Ztráty reprezentované elektrickými odpory v ekvivalentním elektrickém obvodu palivového článku ukazuje obr. 3-6.



Obr. 3-6: Náhradní elektrický obvod FC článku [10]

Nejvýznamnějšími ztrátami jsou ohmické ztráty, které závisí na elektrické vodivosti elektrolytu, tedy na velikosti procházejícího proudu a na teplotě – na obrázku 3-6 tyto ztráty reprezentuje odpor R_{ohm} . Další odpor R_{act} vyjadřuje ztráty aktivační, které se projevují při nízkých proudových hustotách, resp. nízkého zatížení článku. V takovém případě je malá kinetika chemické reakce na povrchu elektrod, a důsledkem částečné oxidace dochází k úbytku elektrodového potenciálu. Odpor R_{con} reprezentuje ztráty koncentrační. Ty se projevují při vyšších proudových hustotách. Při vysokých proudových hustotách totiž dochází nedokonalému přenosu hmoty a tím pádem k nedostatku reaktantů v místě reakce. Dochází tak ke snížení výkonnosti palivového článku. Kapacita C v obvodu na obr. 3-6 značí ekvivalentní kapacitu obvodu a její význam je u dynamických dějů v palivovém článku. E_{Nernst} je napětí FC naprázdno, zohledňující vliv tlaku a teploty. Při provozu palivového článku ve jmenovité oblasti převládají ztráty ohmické. Vliv výše uvedených ztrát je uveden na následujícím obrázku. [10]



Obr. 3-7: Vliv napěťových ztrát [14]

Výstupní napětí palivového článku je pak možné vyjádřit následovně:

$$U_{FC} = U_{ideal} - I_{FC} \cdot R', \quad (3.9)$$

kde I_{FC} je proud na výstupu z článku a hodnota odporu R' zahrnuje všechny výše uvedené napěťové ztráty a je vztažena ke konkrétnímu proudu I_{FC} .

Z pohledu této práce je výsledkem napěťová účinnost, která udává poměr skutečného napětí na kontaktech FC k teoretickému napětí.

$$\eta_U = \frac{U_{FC}}{U_{ideal}}. \quad (3.10)$$

Elektrické napětí je dále závislé na provozní teplotě a tlaku, kdy obecně platí, že při vyšších hodnotách je na kontaktech FC vyšší napětí. Principiálně to je dáno rychleji probíhající chemickou reakcí.

Celková elektrická účinnost palivového článku je pak vyjádřena jako součin maximální účinnosti, stupně využití paliva a napěťové účinnosti.

$$\eta_{FC} = \eta_{max} \cdot U_f \cdot \eta_U \cdot \quad (3.11)$$

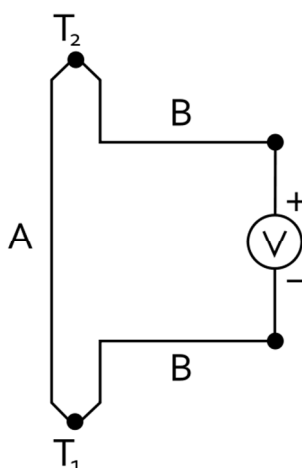
U palivových článků se tato účinnost běžně pohybuje v rozmezí 40 – 60 % [10]. Teoretické maximum je pak 83 % za uvažování čistého vodíku a kyslíku na vstupech při nízké hustotě výkonu [10]. Shrnutí z výše uvedeného je účinnost palivových článků závislá převážně na výkonovém zatížení, kdy nejsou vhodné příliš malé a velké hodnoty. Pozitivní vliv na celkovou účinnost má pak vyšší provozní teplota a tlak. Důležitou roli hraje také stupeň využití paliva.

Při použití palivových článků v oblasti elektroenergetiky jsou vhodné palivové články s nižšími proudovými hustotami a vyšším napětím. Jelikož palivové články generují stejnosměrný proud a napětí, dosahuje se vyšší hodnot napětí spojováním FC do série. V takovém případě je nutné uvažovat i účinnost střídačů, která se pohybuje v rozsahu 96 až 98 %. Navíc také musíme uvažovat i vlastní spotřebu systému výroby elektrické energie – tzn. například kompresory nebo chladicí zařízení. Právě využitím výstupní tepelné energie z palivového článku se může dosáhnout vyšších hodnot celkové účinnosti přeměny energií. Jejich teplo se využívá například pro regenerační ohřev napájecí vody v klasických tepelných elektrárnách anebo u vysokoteplotních FC, kde se výstupní teplota pohybuje i přes 600 °C, může být tato energie využita přímo v parogenerátoru. Další postup výroby elektrické energie je pak shodný jako u tepelných elektráren. Zařízení kombinující využití elektrické a tepelné energie se zkráceně nazývají CHP systémy a jejich účinnost může dosahovat až 90 % [16].

Palivové články jsou v současnosti velmi vyspělou a bezpečnou technologií, avšak jejímu komerčnímu využití brání příliš vysoká cena, která se pohybuje okolo hranice 10 000 USD/kW [16]. Tato cena je dána především nutností používat drahé materiály jako je například platina, která v palivovém článku plní funkci katalyzátoru. Životnost FC je v současnosti garantována po dobu 5 až 20 tisíc provozních hodin [17].

3.1.3 Termoelektrické články pro výrobu elektrické energie

Termoelektrické články jsou zařízení, které přímo přeměňují tepelnou energii na energii elektrickou. Princip této přeměny spočívá v termoelektrickém jevu (někdy je také označován jako Peltier-Seebeckův jev), kdy v obvodu složeném ze dvou vodičů (obecně materiály A a B), jejichž spoje mají různou teplotu, vznikne napětí (viz obr. 3-8). Vzniklé stejnosměrné napětí je v řádech několika mikrovoltů na Kelvin (dle použitých materiálů), a proto se jednotlivé články většinou spojují do série do tzv. termoelektrických baterií.



Obr. 3-8: Princip vytváření napětí na kontaktech termoelektrického článku [18]

Využití termoelektrických článků je masivní spíše v oblasti měření teploty než pro výrobu elektrické energie. V oblasti elektrických zdrojů lze pak s výhledem do budoucna zmínit termoelektrické generátory (TG), které jsou nyní schopné dosahovat výkonů okolo 300 W. Jako zdroj tepelné energie se u nich uvažuje například odpadní teplo z tepelných elektráren nebo ze spalovacího motoru v automobilu. Zvláštní modifikací TG je pak radioizotopový termoelektrický generátor (zkráceně RTG). Již dnes se používá jako dlouhodobě spolehlivý zdroj elektrické energie převážně pro kosmické aplikace a do odlehlých částí Země. Zdrojem tepelné energie je rozpad radioaktivního prvku. Obecně je u termoelektrických generátorů výhoda v absenci mechanických částí, v bezúdržbovosti, výdržnosti vysoké provozní teploty a životnosti.

Maximální účinnost přeměny tepelné energie v elektrickou je u termočlánku závislá především na velikosti rozdílu teplot spojů dvou různých vodičů. Matematicky ji lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}}. \quad (3.12)$$

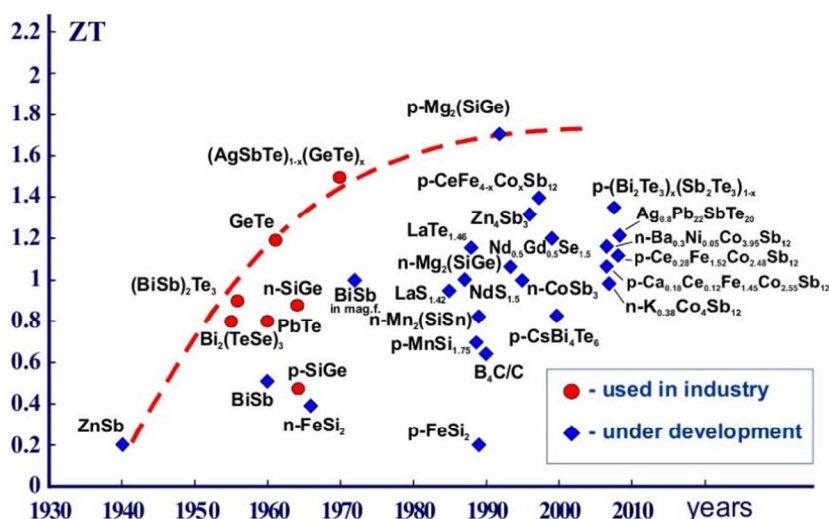
V tomto vzorci (převzato z [18]) značí T_H termodynamickou teplotu horkého spoje vodičů, T_C termodynamickou teplotu chladnějšího spoje vodičů, Z je činitel jakosti, který je závislý na termoelektrických vlastnostech použitých materiálů a \bar{T} je průměrná teplota mezi horkým a chladným spojením. Činitel jakosti Z je samostatně určen následovně [18]:

$$Z = \frac{\sigma S^2}{\kappa}, \quad (3.13)$$

kde σ je měrná elektrická vodivost, S je Seebeckův koeficient a κ je měrná tepelná vodivost.

Ze vztahu 3.12 je vidět, že maximální účinnost termočlánku závisí přímo úměrně na velikosti rozdílu termodynamických teplot spojů použitých vodičů. Maximum toho teplotního rozdílu ovšem závisí na výdržnosti použitých materiálů a vzhledem k rozměrům termočlánku také na vzdálenosti spojů s různými teplotami. Teplotně závislý je také Seebeckův koeficient, který s rostoucí teplotou klesá. Obecně ale platí, čím větší je teplotní rozdíl, tím je možno dosáhnout větší účinnosti přeměny energií.

Dalším faktorem majícím vliv na účinnost je hodnota činitele jakosti Z , pro vyšší hodnoty účinnosti je žádoucí vyšší hodnota činitele jakosti Z . Podle vztahu 3.13 dosahují vyšších hodnot Z materiály s vysokou elektrickou vodivostí, vysokým Seebeckovým koeficientem a naopak nízkou tepelnou vodivostí. Dříve se využívající kovy (měď-konstantan) tomuto pravidlu nevyhovují, protože obecně kovy jsou sice výbornými elektrickými vodiči, avšak i výbornými vodiči tepla. Značně lepší výsledky pak vykazují polovodiče, u kterých je tepelná vodivost menší než u kovů, a v termočláncích tedy nacházejí lepší uplatnění. Historický vývoj hodnoty $Z\bar{T}$ lze pozorovat na obr. 3-9.



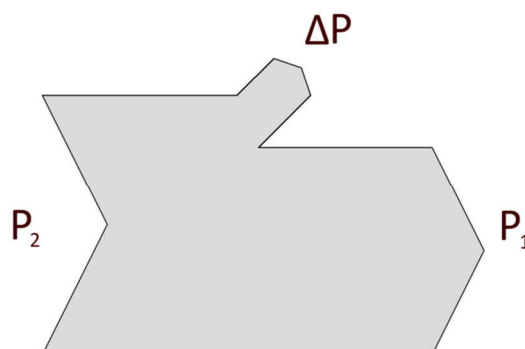
Obr. 3-9: Vývoj hodnoty ZT [19], used in industry - průmyslově používané, under development - předmětem výzkumu

Číselně se účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou pohybuje v rozmezí 5 až 10 %, což je v porovnání s účinností výroby elektrické energie pomocí Rankin-Clausiova cyklu (cca 40 %) malá hodnota. Materiály termočlánků jsou stále předmětem výzkumů, které se nyní soustředí především na zvyšování Seebeckova koeficientu a snižování tepelné vodivosti pomocí manipulace s částicemi na úrovni nanostruktur [18][16].

3.1.4 Elektromagnetická indukce – elektrické generátory

Jev elektromagnetické indukce je základem výroby elektrické energie ve velkých zdrojích elektrické energie, protože umožňuje efektivní přeměnu mechanické (rotační kinetické) energie na energii elektrickou. Zařízení využívající tohoto principu se obecně nazývají elektrické generátory. Podle průběhu generovaného proudu je lze rozdělit na alternátory a dynamy. Alternátory lze dále rozdělit na synchronní a asynchronní.

Podstatou jevu elektromagnetické indukce je vodič, který se pohybuje v magnetickém poli, nebo naopak stacionární vodič umístěný v proměnlivém magnetickém poli. Na koncích takového vodiče se pak indukuje elektrické napětí a je-li obvod uzavřený, prochází jím elektrický proud. Nejjednodušejší realizovatelný mechanický periodický pohyb je pohyb rotační. Konstrukčně jsou tedy elektrické generátory provedeny tak, že buď v nich rotuje magnetické pole a cívky jsou stacionární, nebo rotují cívky a magnetické pole je stacionární. Poháněcím strojem elektrických generátorů jsou nejčastěji turbíny – parní, plynová, vodní a větrná.



Obr. 3-10: Tok činného výkonu elektrickým generátorem

Účinnost elektrických generátorů můžeme definovat základním vztahem 3.1. Při rozboru účinnosti přeměny mechanické energie na elektrickou pomocí elektromagnetické účinnosti pak budeme vycházet z obr. 3-10. Matematicky jej pak popisuje rovnice 3.14. V této rovnici je P_2 výkon poháněcího stroje, P_1 je výkon na svorkách elektrického generátoru a ΔP souhrnně vyjadřuje všechny ztráty v generátoru ať už na straně statoru či rotoru. Ztráty ΔP samozřejmě závisí na typu generátoru, obecně je ale lze rozdělit na ztráty ve vinutí statoru a rotoru ΔP_N , ztráty ve feromagnetických materiálech ΔP_{Fe} vytvářejících magnetický obvod generátoru, ztráty mechanické ΔP_m způsobené například třením v ložiscích a na ztráty dodatečné ΔP_d , které zahrnují jiné možné ztráty závislé například právě na konstrukci motoru.

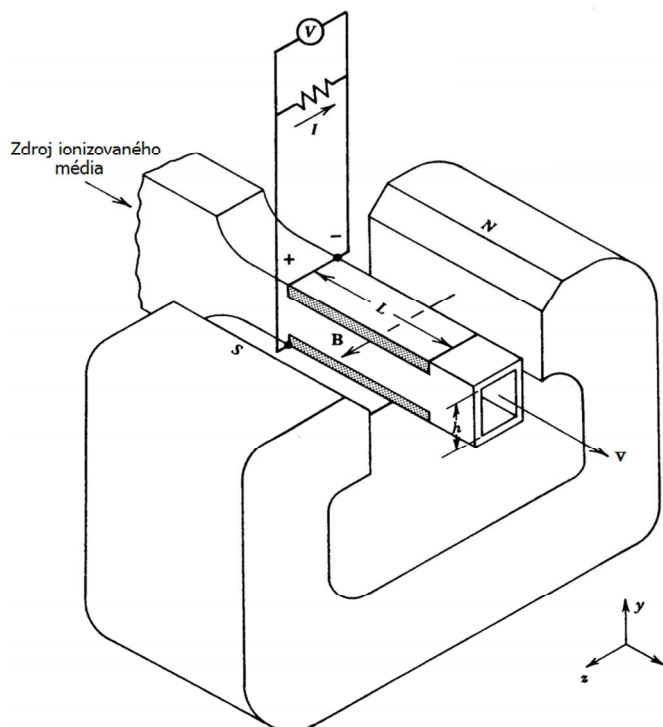
$$P_2 = P_1 + \Delta P, \quad (3.14)$$

Na ztráty ve vinutích generátoru ΔP_N má vliv odpor materiálu, ze kterého je vinutí vytvořeno, a velikost procházejícího proudu. Ztráty ΔP_{Fe} se pak skládají ze ztrát hysterezních a vířivými proudy. První jmenované ztráty jsou dány změnami doménové struktury materiálu v magnetickém poli. Jsou závislé na frekvenci změn magnetického pole a na vlastnostech materiálu. Druhé jmenované – ztráty vířivými proudy jsou pak také frekvenčně a materiálově závislé a navíc také na tloušťce feromagnetika. Frekvence změn magnetického pole je pevně daná elektrizační soustavou, do které generátor pracuje a jako materiálu feromagnetika bývá použito izolovaných dynamových plechů. Z uvedeného pak vyplývá, že ztráty ΔP v generátoru jsou ovlivnitelné z většiny použitými materiály a proudem, který protéká vinutím generátoru – tedy jeho momentálním výkonem.

U malých generátorů (výkony řádově jednotek MW) jsou ztráty ΔP okolo 5 % z výkonu který do generátoru vstupuje. Účinnost přeměny energií se pak u takovýchto strojů pohybuje okolo 95 %. S rostoucím výkonem generátorů se poměr ztrát ΔP k příkonu P_2 zmenšuje a jejich účinnost dosahuje 98 až 99 % [21]. Výkony těch největších generátorů dosahují až 1500 MW. Ztráty o velikosti 1 % u takovýchto generátorů jsou číselně v desítkách MW uvolněných převážně jako teplo. Proto pro chlazení již většinou nestačí proudící masy vzduchu nebo vody, ale používá se chlazení vodíkem. Celkově je účinnost přeměny energie v elektrickém generátoru funkcí výkonu a největších hodnot dosahuje při jmenovitých parametrech generátoru.

3.1.5 Magnetohydrodynamické generátory

Magnetohydrodynamický generátor (zkráceně MHD generátor) je zařízení umožňující přímou přeměnu tepelné energie na energii elektrickou. Princip přeměny vychází ze zákona elektromagnetické indukce, kdy dochází k interakci rychlého vodivého média (např. plazmy) s magnetickým polem. Po stranách kanálu s proudícím médiem jsou pak umístěny elektrody, na nichž dochází ke vzniku stejnosměrného elektrického napětí. Zjednodušený MHD generátor je na obrázku 3-11.



Obr. 3-11: Zjednodušené schéma MHD generátoru, modifikováno z [22]

Účinnost magnetohydrodynamické přeměny je závislá na rychlosti proudícího ionizovaného média \mathbf{v} o objemu V , dále pak na hustotě indukovaného proudu \mathbf{J} a indukci magnetického pole \mathbf{B} . Vstupní energií, bez uvažování pomocných provozů, je pak dána teplem, které je proudícímu médiu dodáno. Lze ji vyjádřit následujícím vztahem [22]:

$$\eta_{mhd} = \frac{|\mathbf{v} \cdot (\mathbf{J} \times \mathbf{B})| \cdot V}{m \cdot c \cdot \Delta T}. \quad (3.15)$$

Typická účinnost přeměny energie v samotných MHD generátorech je zhruba od 10 do 20 % [23] a to převážně kvůli vysoké teplotě výstupních spalin. Proto je vhodné tyto generátory předřadit Rankin-Clausiově cyklu, výsledná účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou může být až 65 % [23].

Bezespornou výhodou MHD generátorů je absence točivých částí, odpadají tedy mechanické ztráty třením a nutnost pravidelné údržby. Dále pak jsou tyto generátory schopné rychlejší a větší regulace výkonu. Při již zmíněném spojení s klasickou turbínou a generátorem dochází k lepšímu využití paliva, než je tomu doposud. Naopak mezi nevýhody patří především požadavek na konstrukční materiály, které musí odolávat vysoké teplotě (2000 °C a více) a i nadzvukovým rychlostem proudícího ionizovaného média. Dochází také k zanášení elektrod struskou a ionizačními přísadami. Používání MHD generátorů mimo experimenty je spíše výhled do budoucna (např. při řízené termojaderné fúzi).

3.2 Nepřímá přeměna energií na elektrickou

Při nepřímých přeměnách různých druhů energií na elektrickou je nejprve výchozí energie ze zdroje transformována na jakýsi mezidruh (může být jeden ale i více) a následně je pak vhodný druh energie přímo přeměněn na energii elektrickou. Celková účinnost je dána součinem všech účinností dílčích přeměn – viz vztah 3.16. Způsob výroby elektřiny přes nepřímé přeměny je v dnešní elektroenergetice dominantní, nepřímými přeměnami energie se tak například vyrábí

energie v tepelných elektrárnách nebo ve větrných elektrárnách. Hlavní používané postupy nepřímé přeměny energií na elektrickou s vyjádřením jejich celkové účinnosti jsou popsány v následujících kapitolách.

$$\eta_c = \prod_{i=1}^n \eta_i . \quad (3.16)$$

3.2.1 Nepřímá přeměna tepelné energie na elektrickou realizována využitím tepelného oběhu

Tepelný oběh je posloupnost dílčích termodynamických změn, kdy pracovní látka opakovaně prochází dílčími termodynamickými stavy [24]. Při tom umožňuje tento děj konat práci (vytvářet ušlechtilou formu energie z přivedeného tepla). Vztah mezi prací, kterou vykoná pracovní látka v tepelném oběhu a přijatým teplem, je dán II. termodynamickým zákonem, který lze formulovat následovně: „*Není možné vytvořit takové cyklické děje, jejichž jediným výsledkem by bylo odebrání tepla ze zdroje a jeho úplná přeměna v práci.*“ (W. Thompson, lord Kelvin, 1851) [2]. Matematicky tento zákon vyjadřuje vztah 3.17, ve kterém je ΔS změna entropie.

$$\Delta S \geq 0 . \quad (3.17)$$

Vstupní energií do tepelného oběhu je tedy tepelná energie, jejímž zdrojem může být například chemická energie spalovaného paliva, jaderná energie nebo energie koncentrovaného slunečního záření. Výstupem je pak mechanická práce turbíny, která vzniká využitím tepelného spádu v tepelném oběhu. Dále je mechanická energie turbíny přenášena hřídelí k elektrickému generátoru, kde pomocí jevu elektromagnetické energie dochází k výrobě elektrické energie.

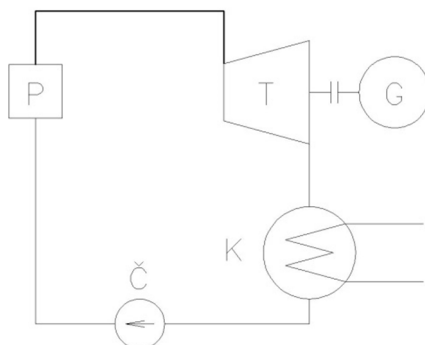
Teoretickou účinnost přeměny tepelné energie v mechanickou práci vyjadřuje Carnotův vztah (3.18), kde T_1 , T_2 jsou termodynamické teploty, při nichž je teplo do oběhu přivedeno resp. odvedeno.

$$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} . \quad (3.18)$$

Tato teoretická účinnost podle Carnota platí pro oběh s dokonalým plynem a nemůže nikdy být rovna 1, protože by to znamenalo buď $T_1 = \infty$ nebo $T_2 = 0$ K, což není proveditelné. Dále je Carnotova účinnost snížena odchylkami, které vznikají při skutečném tepelném oběhu. Tyto odchylky jsou způsobeny zejména použitím přehřáté páry a procesem plné kondenzace. Skutečný tepelný oběh využívaný v energetice se nazývá Clausiův-Rankinův (viz obr. 3-12) a jeho účinnost je dána následujícím vztahem.

$$\eta_{to} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} , \quad (3.19)$$

kde Q_1 , Q_2 je po řadě teplo do oběhu přivedené a teplo z oběhu odvedené.



Obr. 3-12: Schéma Rankin-Clausiova tepelného oběhu. P - parogenerátor, T - turbína, G - elektrický generátor, K - kondenzátor, Č - napájecí čerpadlo

Celkovou účinnost η_{tc} přeměny tepelné energie na elektrickou je možné vyjádřit součinem účinnosti výroby tepla η_{vq} (tj. jaká část tepla které je k dispozici z daného zdroje je převedena na teplo pracovní látky), dále účinnosti tepelného oběhu η_{to} (tj. jakou část tepelné energie ze vstupu lze přeměnit na mechanickou energii), vnitřní termodynamické účinnosti turbíny η_{tdi} (tj. účinnosti zařízení které převádí využitelnou tepelnou energii na mechanickou), účinnosti generátoru η_g (tj. účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou) a účinnosti mechanické η_m (zahrnuje tření v ložiskách). Souhrnně celkovou účinnost vyjadřuje vztah 3.20.

$$\eta_{tc} = \eta_{vq} \cdot \eta_{to} \cdot \eta_{tdi} \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot \quad (3.20)$$

Číselně mohou jednotlivé účinnosti dosahovat následujících hodnot: $\eta_{vq} = 0,86$ (uvažován kotel v klasické tepelné elektrárně), $\eta_{to} = 0,6$ (v případě uvažování paroplynového tepelného oběhu), $\eta_{tdi} = 0,85$, $\eta_g = 0,98$ a $\eta_m = 0,98$ [25]. V tomto případě je celková účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou $\eta_{tc} = 0,42$.

Dále je třeba dodat, že účinnost výroby tepla závisí převážně na způsobu jeho výroby. Při výrobě tepelné energie spalováním dochází k uvolňování chemické energie paliva a účinnost výroby tepelné energie je tak podíl měrného tepla a výhřevnosti paliva. Výhřevnost udává maximální získané množství tepla při spálení dané látky. Proces spalování ale není zcela vhodným prostředkem k uvolnění větší části klidové energie dané látky, naopak při výrobě tepla jadernými reakcemi dochází k většímu využití klidové energie látky.

3.2.2 Větrné elektrárny

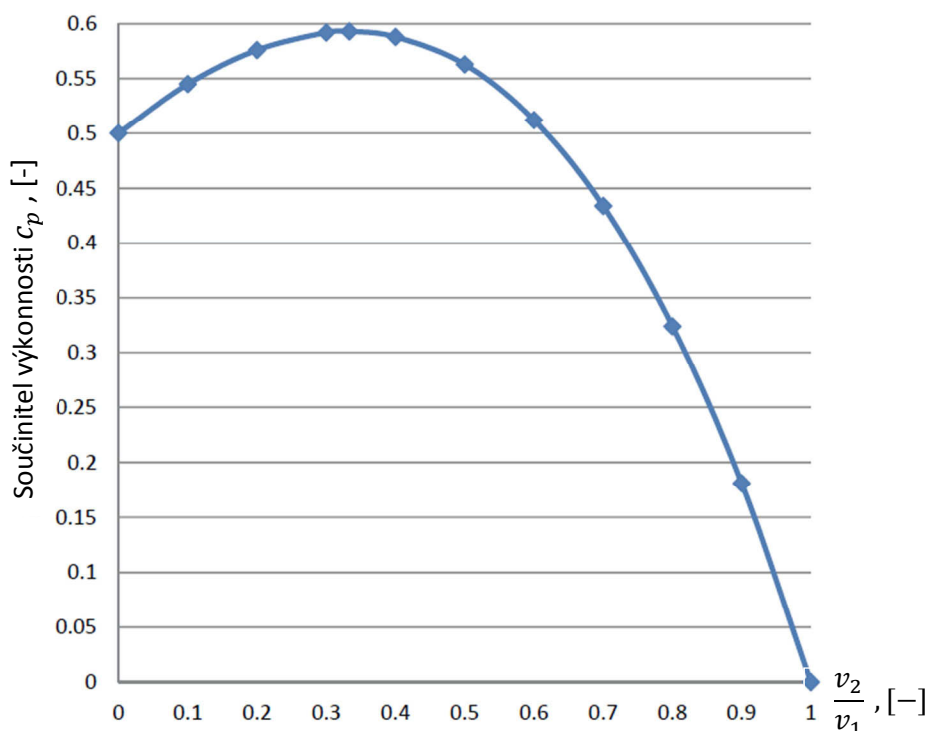
Využití větrné energie patří k mnoha způsobům jak nepřímo využít energii původem ze Slunce k přeměně na elektrickou energii. Více o větrné energii se zmiňuje kapitola 2.1.5. Pro energetiku nejúčelnějším zařízením na přeměnu energie větru jsou větrné turbíny. Jsou to rotační stroje, které mění kinetickou energii proudících mas vzduchu na mechanickou energii na hřídeli elektrického generátoru. Ten následně přeměňuje tuto energii na elektrickou. Teoretický dosažitelný výkon větrné turbíny je popsán vztahem 3.21. Výkon, který může proudění větru odevzdat turbíně je dán vztahem 3.22 [26].

$$P_t = c_p \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot A \cdot \quad (3.21)$$

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \quad (3.22)$$

V těchto vztazích vyjadřuje c_p součinitel výkonnosti, ρ je hustota proudících mas vzduchu, v značí rychlost těchto mas a A je plocha, na kterou vítr působí.

V detailu je hodnota součinitele výkonnosti c_p závislá na poměru rychlosti proudění větru těsně za turbínou a rychlosti před turbínou (v neovlivnitelné vzdálenosti před rotorem). Matematicky toto vyjadřuje Betzovo pravidlo, podle kterého je maximální výkon turbíny při zmíněném poměru rychlostí 1/3. Hodnota součinitele výkonnosti je v tomto případě rovna 0,59 [26]. U reálných turbín však tento součinitel dosahuje nižších hodnot cca okolo 0,4 [26]. Funkční závislost součinitele výkonnosti na poměru rychlostí je na obr. 3-13.



Obr. 3-13: Závislost součinitele výkonnosti na poměru rychlostí za turbínou a před ní. Maxima součinitel dosahuje při poměru rychlostí 1/3. Modifikováno z [26].

Teoreticky dosažitelný výkon větrné elektrárny je výkon rotoru této elektrárny. Tento mechanický výkon se převádí na elektrický pomocí elektrického generátoru spojeného s hřídelí turbíny skrze převodovou skříň (některé nové typy na trhu pracují i bez převodovky). Obě tyto zařízení lze reprezentovat jejich účinnostmi – po řadě η_g a η_p . Elektrický výkon větrné elektrárny je pak vyjádřen vztahem 3.23.

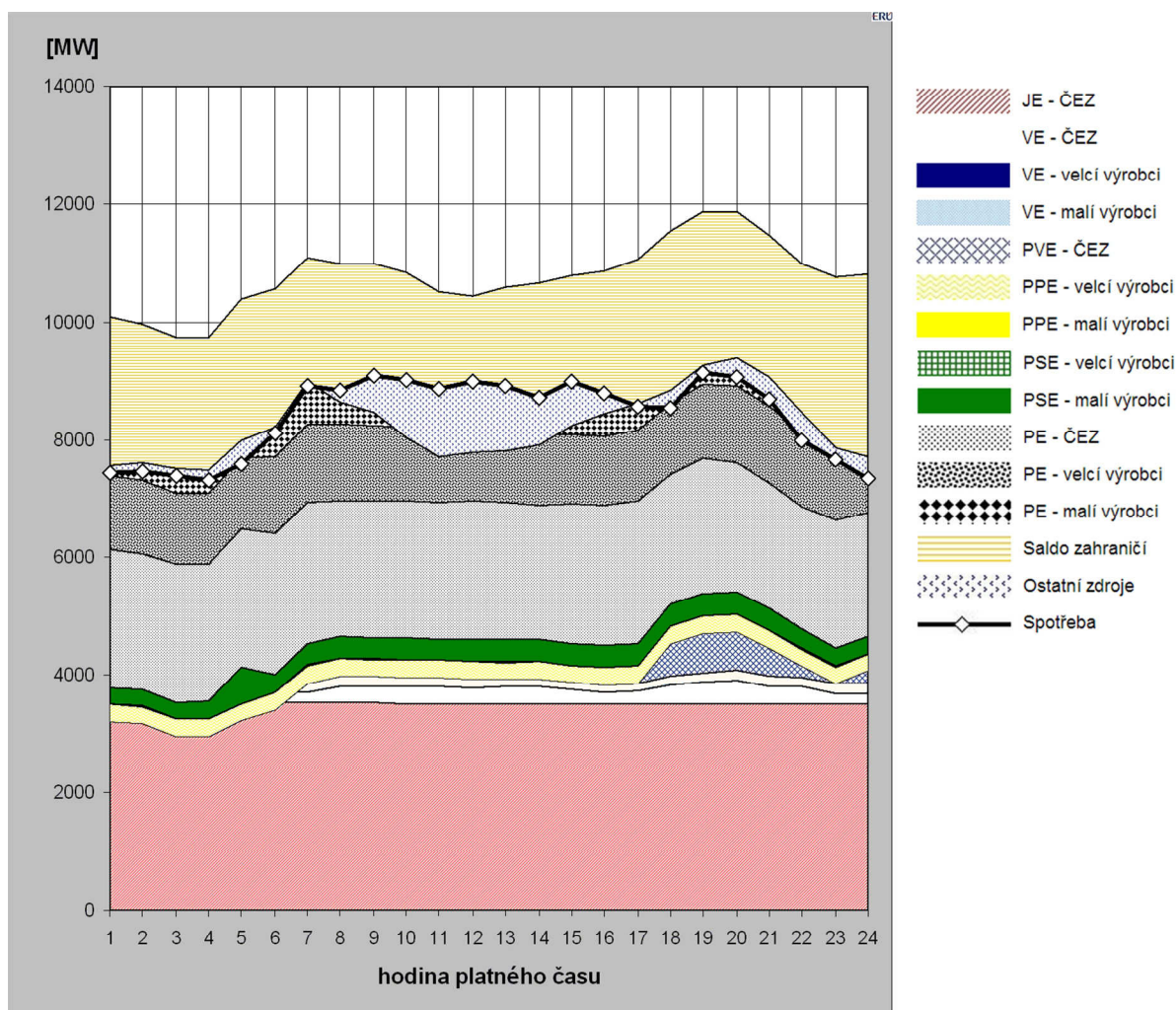
$$P_e = \eta_g \cdot \eta_p \cdot P_t = \eta_g \cdot \eta_p \cdot c_p \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot A. \quad (3.23)$$

Účinnost přeměny kinetické energie větru na elektrickou můžeme formulovat jako podíl elektrického výkonu (vztah 3.23) a výkonu větru (vztah 3.22). Ze vztahu 3.24 pak vyplývá, že při dané rychlosti větru je účinnost závislá pouze na součiniteli výkonnosti a účinnostech generátoru a převodovky. V praxi běžně dosahují větrné elektrárny účinnosti $\eta = 0,3$.

$$\eta = \frac{P_e}{P_v} = \frac{\eta_g \cdot \eta_p \cdot c_p \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot A}{\rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot A} = \eta_g \cdot \eta_p \cdot c_p. \quad (3.24)$$

4 MOŽNOSTI AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Průběh spotřeby elektrické energie se během dne mění (příklad je uveden na obr. 4-1). Tento fakt vychází zejména z rozložení spotřeby energie domácností a průmyslové výroby v průběhu dne. Pro velikost spotřeby elektrické energie platí, že v daném okamžiku je přibližně rovna velikosti její výroby. Výkon elektráren je tedy nutné podle potřeb regulovat. Možnosti regulace výroby elektrické energie se liší od typu dané výroby a tak například jaderné elektrárny, které spadají do základního pásma zatížení, svůj výkon mění minimálně. Naopak výkon fotovoltaických a větrných elektráren je závislý na aktuálních klimatických podmínkách.



Obr. 4-1: Průběh spotřeby elektrické energie v ČR ve třetí středu v měsíci březnu (20.3.2013) Modifikováno z [27]

Akumulace elektrické energie umožňuje v případě převisu výroby energie nad spotřebou tuto energii uložit a v případě zvýšené spotřeby ji využít. Hlavní problém je v uložení elektrické energie, protože doposud neexistuje žádná technologie uchovávající přímo elektrickou energii při dostatečné hustotě energie [$\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$] v rámci velké energetiky. Proto jsou nyní k akumulaci využívány převážně přeměny elektrické energie na jiné formy, které se pak snáze a s velkou účinností transformují zpět na elektrickou energii. Tato kapitola rozděluje možnosti akumulace elektrické energie na základě fyzikálních a chemických principů.

4.1 Fyzikální principy

Tyto principy vycházejí z přeměny elektrické energie na mechanickou. Energie je tak uchovávána ve formě potenciální polohové nebo tlakové nebo ve formě kinetické energie.

4.1.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Princip přečerpávací vodní elektrárny je založen dvou nádržích v různých nadmořských výškách, které jsou propojeny potrubím. Při dolní nádrži je ve většině případů reverzní turbína. V době přebytku elektrické energie pracuje turbína jako čerpadlo a voda z dolní nádrže je čerpána do horní. Naopak v době špičkového pásma zatížení je tok vody obrácený a turbína pohání elektrický generátor.

Uchování elektrické energie ve formě potenciální polohové energie je z pohledu energetické soustavy zatím nejlépe technicky zvládnutelný způsob uchování energie. V ČR největší přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně disponuje instalovaným výkonem 650 MW a je schopna ho dodávat 6 hodin [28]. Nutno také podotknout, že doba najetí přečerpávacích elektráren na maximální výkon se pohybuje v rozmezí desítek sekund až jednotek minut. Nevýhodou těchto elektráren jsou poměrně velké investiční náklady a pro jejich efektivní provoz je nutný výškový spád hladin. Je tedy vhodné, je realizovat v horských oblastech, kde jejich budování je výrazným zásahem do krajiny.

Účinnost celého cyklu lze určit jako součin účinností čerpadlového a turbínového chodu (viz rovnice 4.1). V obou členech je už zahrnuta účinnost přeměny elektrické energie na mechanickou a naopak. Číselně se účinnost celého cyklu pohybuje do 80 %. To znamená, že například pro uchování 1 kWh užitečné energie je třeba přečerpat 4,6 m³ vody do výšky 100 m. Hustota energie pak samozřejmě závisí na konkrétním provedení přečerpávací elektrárny.

$$\eta = \eta_c \cdot \eta_t \quad (4.1)$$

4.1.2 Systém stlačeného vzduchu

Systémy stlačeného vzduchu (anglicky compressed air energy storage - CAES) jsou další možností jak akumulovat větší množství přebytečné elektrické energie. Princip jejich fungování je podobný jako u přečerpávacích vodních elektráren. V době nadbytku elektrické energie je poháněn kompresor, který stlačuje vzduch do objemných a utěsněných prostor jako jsou například velké dutiny po vytěžené ropě nebo opuštěné doly. Takto akumulovaná potenciální energie tlaková se pak v případě potřeby elektrické energie uvolní přiváděním stlačeného vzduchu na lopatky plynové turbíny, která je spojena s elektrickým generátorem.

Nevýhodou uchování energie ve stlačeném vzduchu jsou především tepelné ztráty, které vznikají při práci kompresoru. U zařízení, která tuto tepelnou energii nijak nevyužívají, se pohybuje účinnost cyklu do 50 %. Existují však zařízení, která odpadní teplo z kompresoru ukládají a následně při obráceném toku výkonu toto teplo použijí k ohřátí vzduchu před expanzí v turbíně. Účinnost cyklu takových systémů se očekává až 75 % [29].

4.1.3 Setrvačníky

Posledním zmíněným způsobem akumulace elektrické energie mechanickými principy jsou setrvačníky, které ukládají energii ve formě kinetické energie rotujícího tělesa (viz vztah 4.2). Používají se dva typy setrvačnicků. Ten první využívá těles s velkým momentem setrvačnosti J o

relativně malých otáčkách (do 8000 min^{-1}). Tělesa s velkým momentem setrvačnosti mají obvykle buď velkou hmotnost, nebo rozměr, což se dá pokládat za nevýhodu tohoto typu. Druhým typem jsou setrvačníky s menším momentem setrvačnosti (tedy menší hmotností) pracující při vysokých otáčkách až $100\,000 \text{ min}^{-1}$. Takto vysoké otáčky požadují uložení rotoru setrvačníku v magnetických ložiskách a ve vakuu aby se zamezilo sebemenšímu tření [28].

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 . \quad (4.2)$$

V oblasti energetiky tyto setrvačníky nenacházejí příliš velké uplatnění, maximálně jsou známy aplikace jako záložní zdroj elektrické energie (výkony desítek kW) v provozech s požadavkem na nepřerušovanou dodávku. Setrvačník je v tomto případě připojen na elektromotor a při přerušení dodávky přejde motor do generátorického režimu. Náběhová doba setrvačníků je velmi krátká (omezena jen výkonovou elektronikou) a výkon mohou poskytovat až do úplného zastavení. Větší využití nacházejí setrvačníky v oblasti dopravy u lokomotiv a automobilů. Existují i tzv. gyrobusy, tedy autobusy se setrvačníkem, který vždy na zastávce nabíjí elektrickou energii z troleje a ta jim vystačí k dojetí do další zastávky.

Účinnost celého cyklu setrvačníku je velmi vysoká a pohybuje se i nad 90 %. Je omezena třením v ložiskách a účinností elektrického generátoru při uvažování přeměny energie zpět na elektrickou. Jejich výhodou jsou také nízké pořizovací náklady a vysoká hustota energie okolo $100 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ [29].

4.2 Elektrochemické principy

Při těchto principech je elektrická energie akumulována ve formě energie chemické. Výjimku tvoří superkapacity, které uchovávají elektrickou energii fyzikálně elektrostatickou silou na povrchu elektrod. Svou konstrukcí a elektrolytem jsou však podobné akumulátorům. Posledním zmiňovaným typem uchovávání elektrické energie je vodíkové hospodářství.

4.2.1 Elektrochemické akumulátory

Obecně se elektrochemické akumulátory skládají ze dvou elektrod z různých materiálů mezi nimiž je elektrolyt. Nejstarším typem je olověný akumulátor, který nachází hojněho využití i dnes především díky nízké hustotě výkonu ($30\text{--}40 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$) [29] a dostupnosti olova. Dalšími známými typy akumulátorů jsou Ni-MH, Li-ion nebo NiCd. Použití některých vyžaduje dodržování provozních podmínek a likvidace.

Akumulátor se nabíjí nabíjecím proudem, který převádí produkty chemických reakcí na původní reaktanty. Při vybíjení pak probíhá chemická reakce mezi reaktanty a vzniká tak elektrická energie. Účinnost celého cyklu se pohybuje okolo 90 %. Hustota energie je závislá především na typu akumulátoru, obecně pro levnější typy platí, že je malá. Další jejich nevýhodou je samovybíjení. To může být i 30 % za měsíc (u Ni-MH). Při úplném vybití akumulátoru pak může dojít k nevratné změně na elektrodách a kapacita akumulátoru se tak snižuje. Výhodou elektrochemických akumulátorů je dobře zvládnutá technologie výroby a nízká cena. Nevýhodou je nízký počet nabíjecích cyklů (např. 800 cyklů pro olověné akumulátory [31]).

Elektrochemické akumulátory se v energetice používají například pro ukládání přebytečné energie z obnovitelných zdrojů nebo jako zdroje v ostrovním provozu. Dále mají využití v elektromobilech. Zde se se zavedením konceptu Smart Grid uvažuje, že by akumulátory

v elektromobilech, které by byly v daném okamžiku připojeny do elektrické sítě, mohly sloužit k akumulaci elektrické energie v případě jejího nadbytku a naopak [32].

4.2.2 Superkapacitory

Princip fungování superkapacitorů je prakticky stejný jako u klasických kondenzátorů. Základem je rozprostření elektrického náboje na povrchu elektrod. U superkapacitorů je tento povrch tvořen práškovým uhlíkem, jehož plocha je asi $2\,000\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ [28]. Elektrody jsou pak odděleny polypropylenovou fólií a prostor je vyplněn tekutým elektrolytem. Nabíjení superkapacitorů probíhá stejnosměrným napětím, pro akumulaci energie při vyšším napětí se jednotlivé články řadí sériově. Nespornou výhodou superkapacitorů je velice rychlá akumulace energie a životnost až 10^6 cyklů. Naopak jejich nevýhodou je samovybíjení. To je výrazně závislé na teplotě – např. při teplotě 25 °C klesne za 20 dní kapacita na 85 % [33]. Hustota energie se pohybuje do $30\text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ a celková účinnost cyklu je větší než 90 %.

Superkapacitory jsou nyní běžně využívány v elektromobilech a hromadné dopravě, kde rekuperací kinetické energie při brždění elektromobilu se nabíjejí a při akceleraci vozu rychle dodávají potřebnou energii. Do budoucna se předpokládá, že superkapacitory najdou další nové možnosti využití. Například v oblasti fotovoltaiky jako vyrovnávací akumulátory elektrické energie.

4.2.3 Vodíkové hospodářství

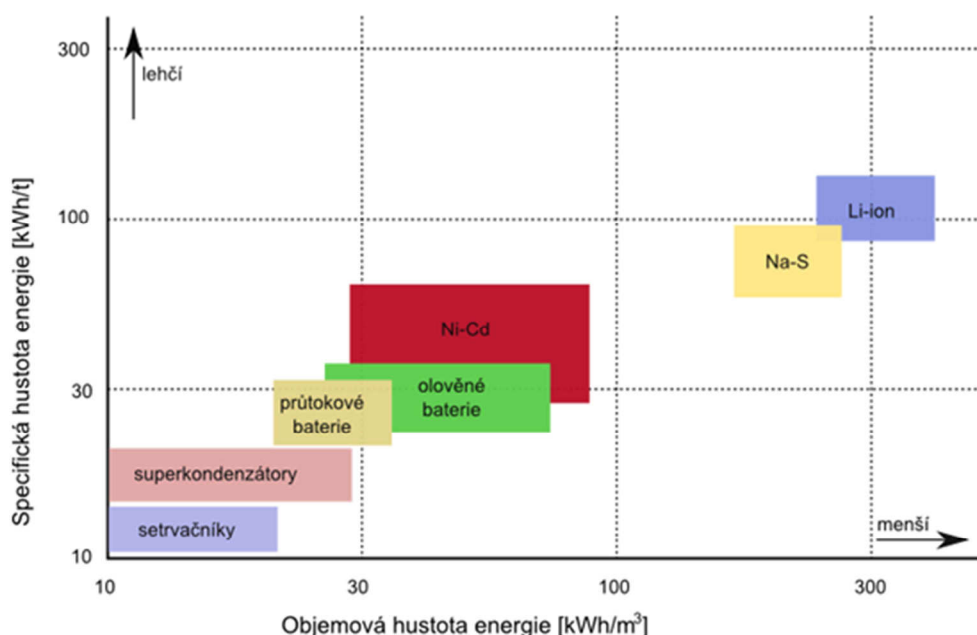
Princip vodíkového hospodářství akumuluje přebytečnou elektrickou energii ve výrobě vodíku. Vodík je totiž výborným úložištěm energie hlavně z důvodu snadné konverze na elektrickou energii v palivových článcích a také kvůli vysoké výhřevnosti (asi $100\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) pro případ jeho spalování. Tento postup se nazývá vodíkovým hospodářstvím. Vyrobený vodík je uchováván ve speciálních nádobách v plynném nebo kapalném stavu. Jako příklad vodíkového hospodářství můžeme uvést instalaci elektrolyzérů a palivového článku při fotovoltaické elektrárně. V době nadbytku elektrické energie v soustavě je veškerý výkon fotovoltaických panelů přiveden do elektrolyzérů. A naopak během špičkového zatížení vyrobený je vodík přeměňován v palivovém článku na elektrickou energii.

Při využití vodíkového hospodářství jako akumulátoru elektrické energie lze celkovou účinnost cyklu stanovit součinem dílčích zařízení podílejících se na přeměnách podle vztahu 3.16. Konkrétně se jedná o účinnost elektrolyzérů (90 % [28]), účinnost palivového článku (50 % - viz kapitola 3.1.2.) a účinnosti střídače (95 %) v případě požadavku střídavého napětí na výstupu z palivového článku. Při zkapalňování vodíku v průběhu procesu je nutné uvážit i účinnost tohoto zařízení. Účinnost cyklu vodíkového hospodářství se tak pohybuje lehce nad 40 %. Při využití odpadního tepla z palivových článků k regeneračnímu ohřevu v tepelném oběhu tepelné elektrárny by byla tato hodnota účinnosti samozřejmě vyšší.

4.3 Porovnání způsobů akumulace elektrické energie

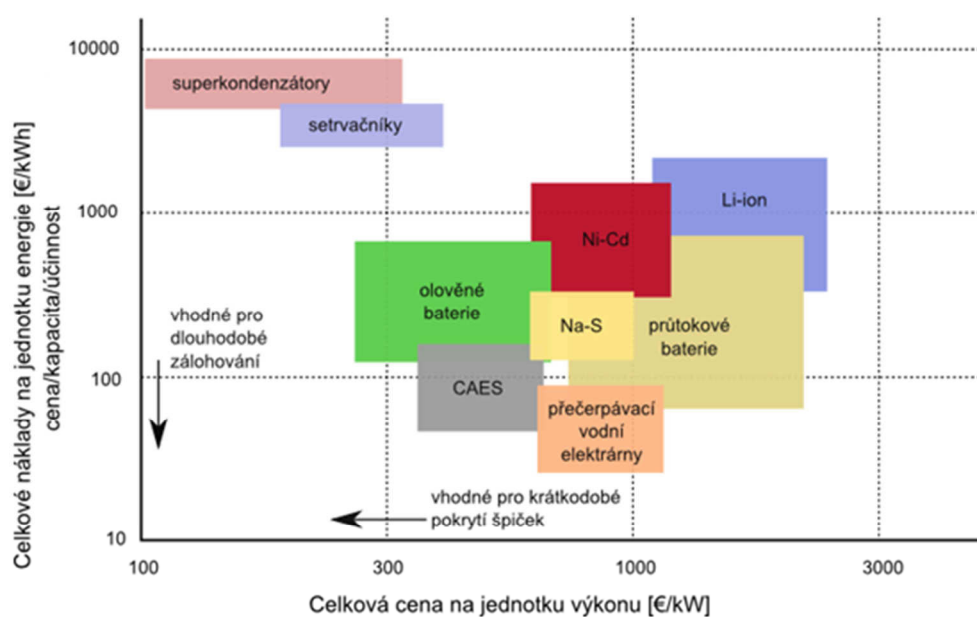
V předchozích podkapitolách jsme získali přehled o možnostech akumulace elektrické energie. Samotný výčet možností akumulace by byl neúčelný, a proto dále uvedeme jejich názorné porovnání podle tří kritérií. Prvním kritériem bude objemová hustota energie v akumulátoru [kWh/m^3], potažmo specifická hustota energie [kWh/t]. Toto porovnání je uvedeno na obrázku 4-2, kde například největší objemovou hustotu nabízí elektrochemické akumulátory typu Li-ion (okolo $300\text{ kWh}/\text{m}^3$). Kdybychom chtěli do tohoto obrázku umístit

akumulaci v přečerpávací elektrárně Dlouhé stráně, tak by její souřadnice byly asi $1,56 \text{ kWh/m}^3$ a $1,56 \text{ kWh/t}$ (zdroj dat pro následný výpočet [28]). Navzdory tomu však přečerpávací vodní elektrárny disponují jinými vhodnějšími parametry, jako je např. cena na jednotku energie (viz další porovnání).



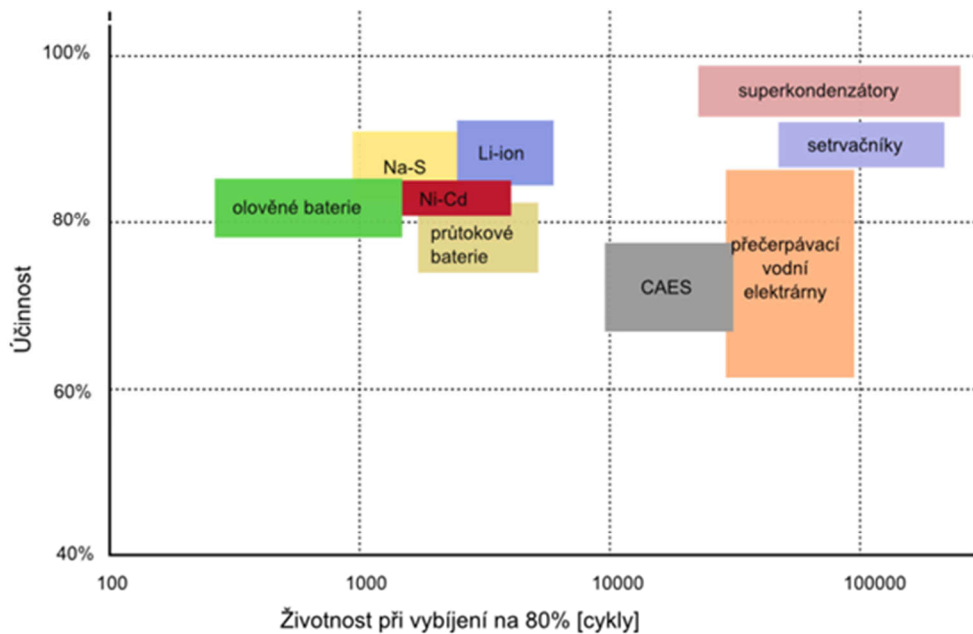
Obr. 4-2: Porovnání možností akumulace elektrické energie podle závislosti specifické hustoty energie na objemové hustotě energie [30].

Druhým kritériem porovnání budou celkové náklady na jednotku energie a na jednotku výkonu. Názorně to ukazuje následující obrázek, kdy blíže počátku schématu se nacházejí možnosti vhodnější pro dlouhodobé zálohování a krátkodobé pokrytí špiček. Akumulátor, který by jednoznačně splňoval obě tyto podmínky najednou, zde není. Pro dlouhodobé zálohování jsou nejvýhodnější přečerpávací vodní elektrárny a naopak superkondenzátory jsou vhodné pro pokrytí špiček.



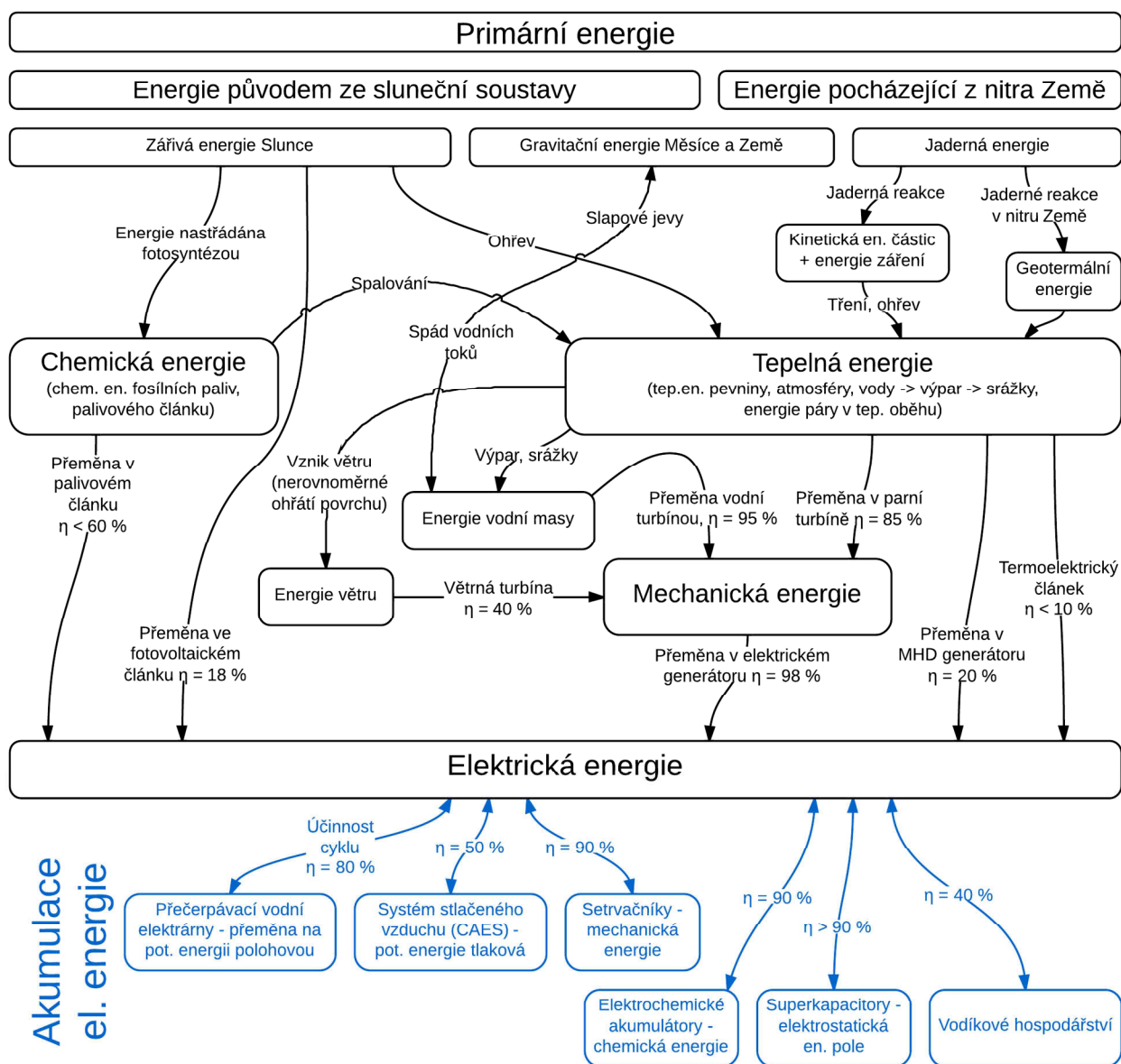
Obr. 4-3: Porovnání možností akumulace elektrické energie podle nákladů na jednotku energie a na jednotku výkonu [30].

Posledním zmíněným porovnávacím kritériem bude účinnost vs. životnost akumulátorů. Porovnání je uvedeno na dalším obrázku a názorně je v něm ukázána velká nevýhoda elektrochemických akumulátorů – malá životnost.



Obr. 4-4: Porovnání možností akumulace elektrické energie z hlediska účinnosti a životnosti [30].

5 DIAGRAM PŘEMĚNY ENERGIÍ VČETNĚ AKUMULACE



Obr. 5-1: Diagram přeměny energií včetně způsobů její akumulace

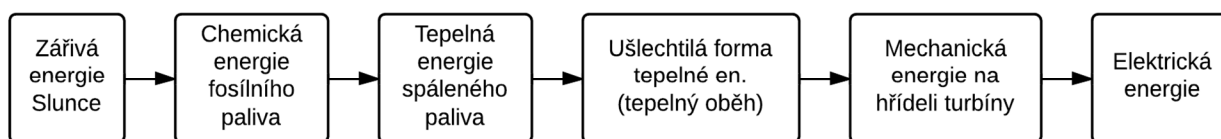
6 MATEMATICKÝ POPIS VYTVOŘENÉHO DIAGRAMU PŘEMĚN ENERGIÍ

V této kapitole jsou popsány jednotlivé procesy přeměn různých druhů energií na elektrickou z matematického hlediska. Základním zdrojem pro tuto kapitolu je Diagram přeměn energií z obr. 5-1. Každému z procesů přeměn je vyhrazena jedna z podkapitol, jejímž výstupem je vždy rovnice popisující přeměnu energie pomocí účinností dílčích přeměn a obrázek daného procesu přeměny energií s názorně vyznačenou hladinou energie v dílčím kroku procesu. Závěrem této kapitoly pak je upravený Diagram přeměn energií s vyznačenými zmíněnými procesy přeměn a dále nový diagram složený ze závěrečných obrázků s vyznačenými hladinami energie ze závěrů jednotlivých podkapitol, který přehledně zobrazuje účinnosti jednotlivých přeměn. Oba diagramy jsou obsaženy v přílohách A a B.

6.1 Přeměna zářivé energie Slunce přes chemickou, tepelnou a mechanickou energii na elektrickou energii (klasická tepelná elektrárna)

Fosilní paliva vznikla uhelnatěním biologických zbytků, které vznikly fotosyntézou před stovkami milióny let (viz kapitola 2.1.2). Jejich spalování v klasických tepelných elektrárnách je dobře známý a doposud nejvyužívanější proces výroby elektrické energie. Uvolňuje se tak ovšem pouze část celkové energie látky (literatura [4] uvádí $5 \cdot 10^{-9}$ %), a proto je pro účely této práce vhodné dále uvažovat, že na vstupu do celého procesu je k dispozici množství energie reprezentované výhřevností spalovaného paliva. Výhřevnost udává, jaké množství tepelné energie se uvolní úplným spálením jedné jednotky paliva (uvádí se v $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ nebo v $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$).

Tepelná energie na vstupu je nejprve omezena účinností kotle, který nepředá tepelnému oběhu všechno teplo vzniklé spálením. V tepelném oběhu se tato energie dále přeměňuje na její ušlechtilou formu, která je dále transformovatelná na mechanickou energii. Tuto přeměnu provádí parní turbína. Mechanická energie se mění na elektrickou v elektrickém generátoru. Podrobněji je přeměna tepelné energie na elektrickou skrze tepelný oběh popsána v kapitole 3.2.1. Samotný proces v této podkapitole shrnuje obr. 6-1.



Obr. 6-1: Proces přeměny zářivé energie Slunce na elektrickou energii v klasické tepelné elektrárně

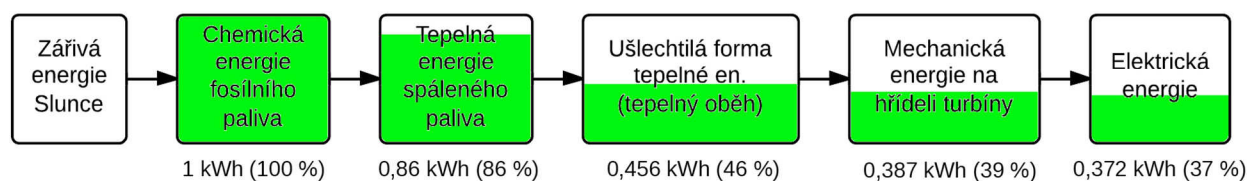
S pomocí vztahu 3.20 (vyjadřuje celkovou účinnost nepřímé přeměny tepelné energie na elektrickou – více viz kapitola 3.2.1) můžeme vtahem 6.1 vyjádřit množství získané elektrické energie E_e ze zařízení přeměňující energii paliva E_p . V rovnici dále značí η_k účinnost kotle, η_{to} účinnost tepelného oběhu, η_{tdi} vnitřní termodynamickou účinnost turbíny, η_g účinnost elektrického generátoru a η_m mechanickou účinnost, která reprezentuje ztráty třením v ložiskách.

$$E_e = \eta_k \cdot \eta_{to} \cdot \eta_{tdi} \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot E_p \quad (6.1)$$

Mějme tedy na vstupu do zařízení (klasické tepelné elektrárny) 1 kWh energie v palivu, kterou lze uvolnit jeho spálením. Budeme uvažovat následující číselné hodnoty účinností $\eta_k = 0,86$ (uvažován kotel v klasické tepelné elektrárně), $\eta_{to} = 0,53$, $\eta_{tdi} = 0,85$ (podle [25]), $\eta_g = 0,98$ (podle kapitoly 3.1.4) a $\eta_m = 0,98$ (podle [25]). Číselně je tedy elektrická energie na výstupu

$$E_e = 0,86 \cdot 0,53 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 1 \text{ kWh} = 0,372 \text{ kWh} . \quad (6.2)$$

Z této rovnice pak vychází následující obrázek 6-2, na kterém je zobrazen celý proces přeměny zářivé energie Slunce uchované v chemické energii fosilního paliva na energii elektrickou. Zelenou barvou je zvýrazněno, jak v průběhu procesu ubývá množství energie přeměnitelné na elektrickou energii.



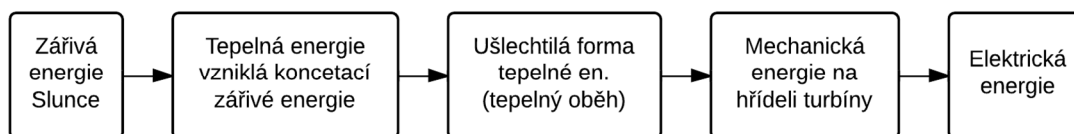
Obr. 6-2: Proces přeměny zářivé energie Slunce na elektrickou energii v klasické tepelné elektrárně s vyznačenou hodnotou energie v jednotlivých fázích.

Ačkoliv je proces přeměny energie uvedený v této podkapitole dnes nejpoužívanějším k výrobě elektrické energie, je jeho celková účinnost přeměny malá. Z obrázku 6-2 je patrné, že hlavním úskalím tohoto procesu je tepelný oběh, ve kterém dochází k největšímu úbytku energie využitelné k přeměně na elektrickou energii. Hlavní důvodem je odvod nízkopotenciálního tepla z tepelného oběhu, které není jednoduché využít k dalším přeměnám na elektrickou energii. Zvýšení účinnosti tepelného oběhu je možné hned několika způsoby – například zvýšením parametrů admisní páry, přehříváním nebo regeneračním ohřevem. I zde však platí materiálové a ekonomické limity, které stanovují parametry páry na 590 °C při 28 MPa, přehřívání nejvýše dvakrát a u regeneračního ohřevu napájecí vody se jeví jako ekonomické ne víc než 10 ohříváků [3]. Lepšího využití energie paliva pak lze dosáhnout kombinovanou výrobou elektřiny a tepla.

6.2 Přeměna zářivé energie Slunce přes tepelnou a mechanickou energii na elektrickou energii (solární elektrárna, kolektory)

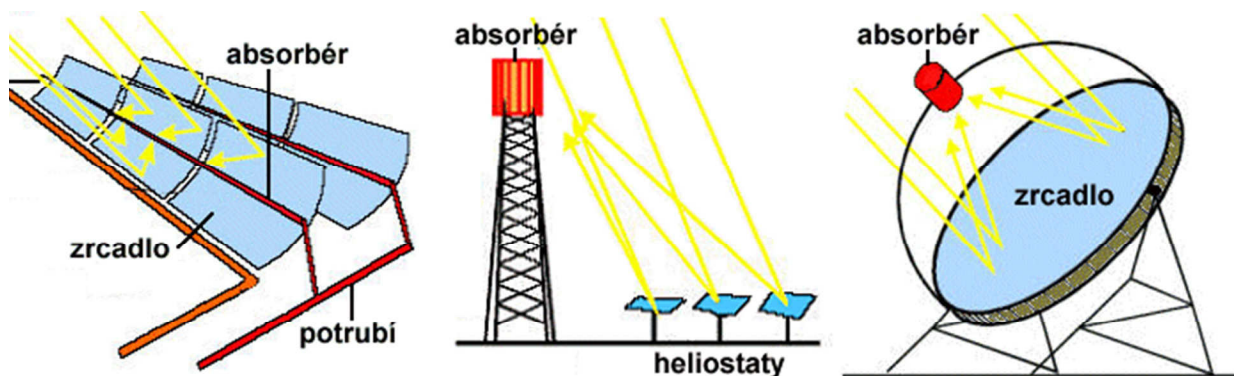
Přeměna zářivé energie Slunce na elektrickou energii v tzv. solárních elektrárnách neboli též koncentrátorových solárních elektrárnách (KSE) je z většiny stejná jako přeměna energií v klasické tepelné elektrárně (KTE). Ten hlavní rozdíl se nachází ve zdroji tepelné energie. Kotel v KTE tak nahrazuje důmyslná soustava zrcadel, která koncentruje sluneční záření do jednoho bodu (ohniska), kde je umístěný absorber pohlcující tuto energii záření. Dále je pak toto teplo využito k výrobě páry pro tepelný oběh.

Pro uvažování matematického popisu tohoto procesu bude nejprve třeba si vyjádřit účinnost přeměny energie slunečního záření na tepelnou energii. Zbylá část procesu (tj. tepelný oběh, parní turbína, el. generátor) je stejná jako v předchozím procesu v KTE. Celý proces přeměny v KSE je znázorněn na obrázku 6-3.



Obr. 6-3: Proces přeměny zářivé energie Slunce na elektrickou energii v koncentrátorové solární elektrárně

K soustředění záření se komerčně se používají tři konfigurace zrcadel [34]. Jmenovitě to je podélná, věžovitá a parabolická (talířová) konfigurace. Nyní stručně o jednotlivých konfiguracích. Při podélné konfiguraci soustředí lineární parabolická zrcadla záření do v ohnisku umístěné trubice (absorbéru). U věžovitého uspořádání se pomocí pole zrcadel sledujících polohu slunce koncentruje záření v ohnisku, které je umístěné na věži. Parabolická konfigurace pak využívá zrcadel tvaru paraboloidu, v jejichž ohnisku je opět umístěný absorbér. Názorně tyto tři konfigurace ukazuje následující obrázek 6-4. Jinou variací koncentrace záření než parabolickými zrcadly je použití Fresnelových reflektorů, které jsou ploché, a tedy na rozdíl od parabolických zrcadel dokáží koncentrovat větší množství energie vztážené na plochu. Navíc jsou také levnější než parabolická zrcadla, to vše ale bohužel za cenu menší optické účinnosti.



Obr. 6-4: Názorná ukázka zmíněných konfigurací solárních koncentračních elektráren. Vlevo je podélné uspořádání s lineárními parabolickými zrcadly, uprostřed je znázorněno věžovité uspořádání a vpravo parabolické (talířové) uspořádání. Modifikováno z [35].

Při určování účinnosti přeměny energie slunečního záření na tepelnou energii budeme principiálně vycházet ze zdroje [34]. Účinnost vyjádříme podílem využitelného výkonu (skládajícího se z výkonu absorbovaného P_a a výkonu ztrátového P_z) a výkonu soustředěného slunečního záření P_s .

$$\eta_a = \frac{P_a - P_z}{P_s}. \quad (6.3)$$

Dále můžeme jednotlivé výkony vyjádřit takto:

- Jako absorbovaný výkon budeme uvažovat takový, který odpovídá přeměně výkonu celého spektra elektromagnetického záření na tepelný výkon omezený pouze absorpční schopností absorbéru tepla v ohnisku umístěném – tedy absorpčním koeficientem α (bezrozměrný).

$$P_a = \alpha \cdot P_s. \quad (6.4)$$

- Ztrátový výkon, je část výkonu z P_a , který se v procesu dále nepředá tepelnému oběhu. Může být způsobený zpětným tepelným zářením, vedením či prouděním z oblasti

absorbéru. Budeme-li uvažovat teplotu v ohnisku, potažmo absorbéru nad 1000 K, je ztrátový výkon způsobený převážně zářením a ostatní odvozy tepelného výkonu můžeme zanedbat [34]. Výkonové ztráty zářením určíme pomocí Stefan-Boltzmannova zákona, kde A je plocha kolektoru, ε je emisivita povrchu kolektoru, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, T_1 značí termodynamickou teplotu kolektoru a T_2 termodynamickou teplotu okolí.

$$P_z = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4). \quad (6.5)$$

Pro další výpočty je vhodné zanedbat tepotu okolí která, ačkoliv je umocněna na čtvrtou, při teplotách absorbéru 1000 K nezpůsobí změnu v řádu v celkovém rozdílu. Potom přejde vztah 6.5 do následujícího tvaru

$$P_z = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4. \quad (6.6)$$

- c) Výkon koncentrovaného slunečního záření určíme pomocí intenzity záření I a plochy A na kterou dopadá (absorbér). Navíc je nutné ve vztahu uvažovat, kolikrát je sluneční záření v ohnisku koncentrovanější oproti záření nekoncentrovanému. Tuto skutečnost vyjadřuje tzv. solární koncentrační poměr C . Nutno je také uvažovat účinnost koncentračních zařízení (optiky) η_{opt} .

$$P_s = \eta_{opt} \cdot I \cdot C \cdot A. \quad (6.7)$$

Po dosazení dílčích vztahů 6.4, 6.6 a 6.7 do vztahu 6.3 získáme výsledný vztah účinnosti přeměny energie slunečního záření na tepelnou energii

$$\eta_a = \frac{\alpha \cdot \eta_{opt} \cdot I \cdot C \cdot A - A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4}{\eta_{opt} \cdot I \cdot C \cdot A} = \alpha - \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4}{\eta_{opt} \cdot I \cdot C}. \quad (6.8)$$

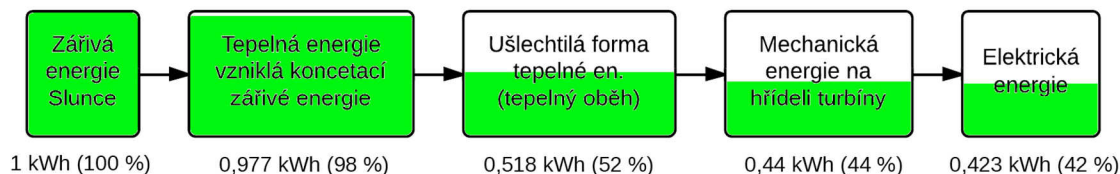
Ze slunce získaná tepelná energie tvoří vstup do tepelného oběhu, a jak již bylo zmíněno, další postup přeměny energií je stejný jako v případě klasické tepelné elektrárny. Na základě této podobnosti můžeme při určení výsledného množství elektrické energie na konci procesu vycházet ze vztahu 6.1. Upravená rovnice pak bude namísto účinnosti kotle η_k zmiňovat účinnost absorbéru η_a .

$$E_e = \eta_a \cdot \eta_{to} \cdot \eta_{tdi} \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot E_s. \quad (6.9)$$

Na vstupu zařízení (koncentrátorové solární elektrárna) tedy mějme, stejně jako v předchozí podkapitole, 1 kWh energie slunečního záření. Pro další výpočet budeme uvažovat ideální absorbér slunečního záření s absorpčním koeficientem $\alpha = 1$, emisivitou povrchu $\varepsilon = 1$ o termodynamické teplotě $T_1 = 1000$ K (vstupní teplota do tepelného oběhu je menší, protože oběhové médium potřebuje jiné parametry než médium v absorbéru). Dále budeme uvažovat účinnost optických zařízení jako ideální, tedy $\eta_{opt} = 1$. Předpokládaná intenzita slunečního záření $I = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a solární koncentrační poměr obvyklý pro věžovité systémy $C = 2500$ [34]. Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. Další účinnosti ve vztahu budeme uvažovat stejně velké jako v kapitole 6.1. Číselně tedy $\eta_{to} = 0,53$, $\eta_{tdi} = 0,85$, $\eta_g = 0,98$ a $\eta_m = 0,98$,

$$E_e = \left(1 - \frac{1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot (1000 \text{ K})^4}{1 \cdot 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 2500}\right) \cdot 0,53 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 1 \text{ kWh} = 0,4228 \text{ kWh} . \quad (6.10)$$

Z rovnice 6.10 pak vychází následující obrázek 6.5, na kterém je zeleně znázorněno, jak v průběhu celého procesu ubývá množství energie přeměnitelné na elektrickou energii.



Obr. 6-5: Znáznornění procesu přeměny zářivé energie Slunce v solárních elektrárnách s vyznačenou hodnotou energie v jednotlivých fázích.

Při porovnání procesu uvedeného v této podkapitole s procesem v podkapitole 6.1 (Přeměna zářivé energie Slunce přes chemickou, tepelnou a mechanickou energii na elektrickou energii) vidíme, že konečná účinnost přeměny výchozí energie na elektrickou je o málo vyšší pro KSE (v uvedených příkladech). Pro energetiku mají však KSE kromě pozitivních ekologických aspektů dvě hlavní negativa, se kterými je nutno počítat. Prvním negativem je omezení výroby energie v závislosti na tom jak dlouho a jakou intenzitou září Slunce během dne. Vhodnější pro stavbu KSE jsou tedy oblasti do 30° zeměpisné šířky [34], v Evropě pak její jižní část (Španělsko), kde je intenzita slunečního záření vyšší. Dodávka elektrické energie i v nočních hodinách se dá u KSE zajistit velkými tepelnými zásobníky. Ty většinou pracují na principu roztavených solí a ve slunečné části dne akumulují teplo. Za druhé (dá se říct ekonomické) negativum KSE jsou považovány vysoké investiční náklady oproti nákladům při stavbě jiných elektráren. Jako příklad lze uvést, že pro nahrazení jaderné elektrárny Temelín solárními elektrárnami Andasol 1 (ve Španělsku) by bylo asi 132 krát dražší [36]. Na druhou stranu je pak samotný provoz KSE minimální, protože není třeba uvažovat náklady na palivo.

6.3 Přeměna zářivé energie Slunce na elektrickou energii přímo (fotovoltaická elektrárna)

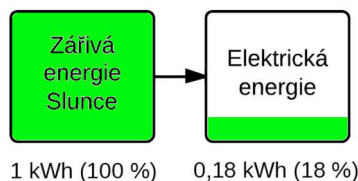
Přeměna zářivé energie Slunce na elektrickou energii je na rozdíl od předchozích uvedených procesů přímá a je prováděna ve fotovoltaických článcích. Detailněji se touto přeměnou zabývá kapitola 3.1.1 zmiňující parametry, na kterých je závislá účinnost přeměny energií, a maximální účinnost přeměny danou Shockley–Queisserovým limitem. Pro účely matematického modelu je pak důležitá konkrétní hodnota účinnosti přeměny ve fotovoltaickém článku. Z přímé přeměny energií vyplývá následující vztah pro elektrickou energii E_e na výstupu ze zařízení přeměňujícího zářivou energii Slunce E_s s účinností η_f

$$E_e = \eta_f \cdot E_s . \quad (6.11)$$

Dosadíme-li číselně do vztahu 6.11 energii na vstupu $E_s = 1 \text{ kWh}$ a účinnost přeměny energií ve fotovoltaickém článku stejnou jako v diagramu přeměn energií (obr. 5-1) $\eta_f = 0,18$ (fotovoltaický článek z krystalického křemíku) můžeme psát

$$E_e = 0,18 \cdot 1 \text{ kWh} = 0,18 \text{ kWh} . \quad (6.12)$$

Pro názornost ještě uvedeme obrázek znázorňující proces přeměny energií s vyznačenými hladinami energie na vstupu a výstupu.



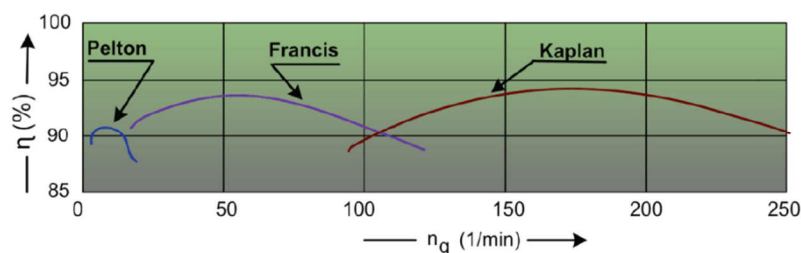
Obr. 6-6: Znázornění procesu přeměny zářivé energie Slunce ve fotovoltaických elektrárnách s vyznačenou hodnotou energie v jednotlivých fázích

Z obrázku a vztahu 6.12 vyplývá, že ačkoli se zde jedná o přímou přeměnu energií, její účinnost je asi poloviční oproti účinnostem nepřímých přeměn využívajících tepelnou energii. U starších fotovoltaických článků nebo těch z jiných materiálů může být účinnost přeměny energií ještě nižší (běžně i pod 9 %). Podstatnou nevýhodou fotovoltaických elektráren je malá hustota výkonu vztažená na zastavěnou plochu, která může být i více než 1000-krát menší než u jaderné elektrárny. Na druhou stranu pro specifické aplikace (aplikace na střechy domů) může být tato přeměna energií vhodným způsobem výroby elektrické energie, protože s masovým nasazením zdrojů samozřejmě klesá jejich pořizovací cena, která zmíněné negativa kompenzuje.

6.4 Přeměna mechanické energie vodních toků na elektrickou energii (vodní elektrárna)

Přeměna mechanické energie vodních toků na elektrickou energii je dalším využitím energie původem ze slunečního záření (viz zdroje energie kap. 2.1.4). Využít tak lze kinetickou a potenciální energii vodního toku. K jejich přeměnám na mechanickou práci se pak využívají hydraulické motory (vodní turbíny), které se díky vysokým účinnostem dají považovat za technicky nejdokonalejší motory vůbec – to je samozřejmě dáno tím, že přeměňují mechanickou energii vodního toku na opět mechanickou na hřídeli motoru. Ze hřídele motoru je energie dále transformována na elektrickou v el. generátoru. Souhrnně se soustrojí vodní turbíny a el. generátoru nazývá turbogenerátor.

Nejprve provedeme základní rozbor účinnosti turbíny. Ta je závislá na třech dílčích účinnostech – hydraulické (vyjadřuje hydraulické ztráty například následkem viskózního tření uvnitř toku vody nebo ztráty změnu průřezu), objemové (zahrnují např. ztráty vzniklé netěsnostmi) a mechanické (vyjadřuje např. ztráty v ložiskách) [25]. Jejich velikost se odvíjí především od průtoku vody turbínou a od její měrné energie – de facto tedy od velikosti měrných otáček n_q turbíny, které tyto dvě veličiny určují. Součin hydraulické, objemové a mechanické účinnosti pak definuje celkovou účinnost turbíny, jejíž závislost na měrných otáčkách je znázorněna na 6-7.



Obr. 6-7: Závislost celkové účinnosti vodní turbína na měrných otáčkách pro tři typy turbín. Převzato z [10].

Pro účely matematického popisu přeměny nebude třeba uvažovat typ vodní elektrárny a ani využitelnost vodního toku. Na vstupu do zařízení (vodní elektrárna obecně) budeme totiž opět předpokládat $E_{vt} = 1 \text{ kWh}$ energie a to ať už ve formě kinetické nebo potenciální energie vodního toku. Tato energie pak vstupuje do turbogenerátoru, jehož výstupem je elektrická energie. Hlavními parametry této přeměny energie tedy jsou účinnosti vodní turbíny, el. generátoru a mechanická. Účinnost vodní turbíny byla v základně rozebrána v předchozím odstavci a pro účely matematického popisu ji budeme podle předchozího obrázku (obr. 6-7 – Francisova vodní turbína při optimálních měrných otáčkách, kdy je její účinnost nejvyšší) uvažovat $\eta_v = 0,93$. O účinnostech generátorů již také bylo psáno (kapitola 3.1.4) a budeme ji uvažovat $\eta_g = 0,98$. Mechanická účinnost $\eta_m = 0,98$. Elektrická energie na výstupu pak bude dána následující rovnicí:

$$E_e = \eta_v \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot E_{vt} \quad (6.13)$$

Dosadíme-li číselně do této rovnice, tak obdržíme celkovou hodnotu elektrické energie na výstupu, je-li na vstupu zařízení 1 kWh:

$$E_e = 0,93 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 1 \text{ kWh} = 0,893 \text{ kWh} \quad (6.14)$$



Obr. 6-8: Proces přeměny kin. a pot. energie vodního toku na elektrickou energii s vyznačeným aktuálním množstvím energie v dílčím kroku.

V této podkapitole bylo ukázáno, že přeměna kinetické a potenciální energie vodního toku na elektrickou energii probíhá s vysokými účinnostmi – viz obrázek 6-8. Když nebudeme uvažovat účinnost, s jakou dochází k přeměně zářivé energie Slunce na tepelnou energii vody (výpar → srážky), která je těžko vyčíslitelná, je tento proces v porovnání s procesem v klasických tepelných elektrárnách mnohem účinnější. Způsobuje to hlavně to, že energie vodního toku je z pohledu přeměny na mechanickou energii skoro stoprocentním zdrojem exergie. Stavby nových vodních elektráren se tedy mohou jevit jako velmi efektivní. Na druhou stranu však dochází k zásadním zásahům do přírody a ty je nutné minimalizovat. Dalším omezením vodních elektrárenských děl je malý výskyt lokalit vhodných k jejich výstavbě. Například v ČR tak možnosti využití potenciálu vodní energie dosahují limitního stavu.

6.5 Přeměna kinetické energie větru na elektrickou energii (větrná elektrárna)

Dalším, v matematickém popisu diagramu zmíněným, způsobem přeměny energie slunečního záření na elektrickou energii, je využití energie větru. O tom jak tato energie vzniká a jaký je její potenciál je psáno v kapitole 2.1.5. Samotným rozbořením účinností přeměny kinetické energie větru na elektrickou energii se pak detailněji zabývala kapitola 3.2.2. Proto zde v části matematického popisu diagramu budeme uvažovat, stejně jako v podobných kapitolách, pouze zařízení přeměňující kinetickou energii větru (větrná elektrárna) s typickou účinností transformace energie a na vstupu do tohoto zařízení bude dostupná energie o velikosti 1 kWh.

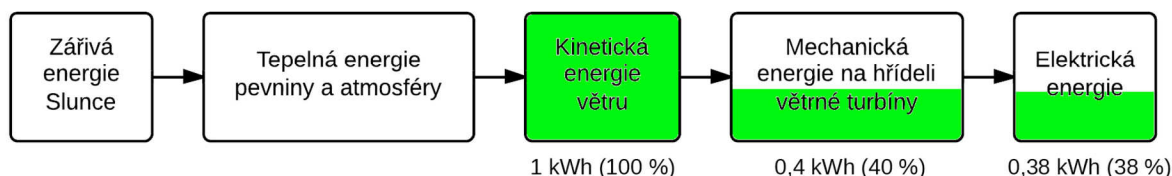
Podle kapitoly 3.2.2 tak můžeme sestavit rovnici pro velikost elektrické energie na výstupu zařízení:

$$E_e = c_p \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot E_v \quad (6.15)$$

kde c_p je součinitel výkonnosti větrné turbíny, η_p je účinnost převodovky a η_g je účinnost elektrického generátoru na konci tohoto procesu. Pro číselné dosazení budeme uvažovat součinitel výkonnosti $c_p = 0,4$, který odpovídá moderní třílisté větrné turbíně [26]. Účinnost převodovky $\eta_p = 0,97$ (orientačně) a účinnost generátoru stejně jako v předchozích případech $\eta_g = 0,98$. Na základě těchto údajů můžeme číselně dosadit do vztahu 6.15:

$$E_e = 0,4 \cdot 0,97 \cdot 0,98 \cdot 1 \text{ kWh} = 0,38 \text{ kWh} \quad (6.16)$$

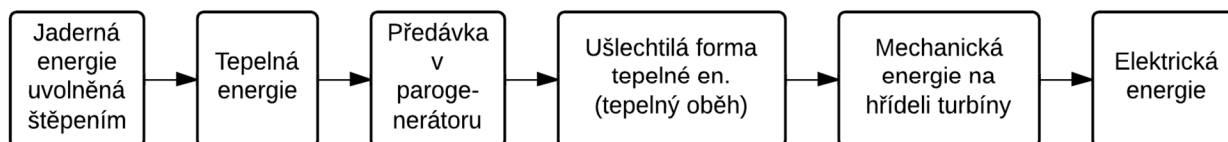
V podkapitole jsme názorně ukázali, s jakou účinností může probíhat transformace kinetické energie větru, která je z části také původem z energie Slunečního záření, na energii elektrickou. Účinnost okolo 38 % je tak srovnatelná s účinností s jakou se přeměňuje energie v klasické tepelné elektrárně. Na obrázku 6-9 můžeme pozorovat, že k největšímu omezení v procesu využití energie větru dochází při přeměně kinetické energie větru na větrné turbíně. Hlavní zásluhu na tom má součinitel výkonnosti c_p , který vystihuje přeměnitelné množství energie větru je. Z pohledu přeměny energií tedy součinitel výkonnosti představuje jakousi exergetickou konstantu této přeměny. Při jeho maximální hodnotě, $c_p = 0,59$, by byla účinnost přeměny energie větru na elektrickou energii $\eta = 0,57$. Za zmínku také stojí, že větrná energie je obnovitelný zdroj, ovšem pro její využití je třeba uvažovat vhodné lokality s vyšší rychlostí větru (ideálně $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ podle [10]). Navíc je třeba stejně jako při jiných energetických stavbách uvažovat konfrontaci zařízení s okolní přírodou.



Obr. 6-9: Proces přeměny kinetické energie větru na elektrickou energii s vyznačenými aktuálními velikostmi hladiny energie v jednotlivých krocích

6.6 Přeměna jaderné energie skrz tepelnou a mechanickou energii na elektrickou energii (jaderná elektrárna)

Přeměna jaderné energie paliva na elektrickou energii je jedním z procesů, který využívá mezipřeměny na tepelnou a mechanickou energii. Existují dvě možnosti uvolnění jaderné energie - a to syntézou a štěpením. Protože současná energetika ještě nevyužívá jaderné syntézy, budeme dále hovořit pouze o uvolňování energie jaderným štěpením. Při štěpení jaderného paliva dochází k rozpadu jádra atomu chemického prvku paliva na odštěpky, které se vlivem jaderných sil vzájemně velmi silně odpuzují. Odpuzované částice tak získají velkou rychlost. Okolní prostředí tyto částice třením brzdí a jejich kinetická energie se přeměňuje na tepelnou. Při reakci vzniká také vysokoenergetické záření a neutrony, taktéž s vysokou energií. Jejich energie se přeměňuje na teplo, které se v souhrnu dál předává tepelnému oběhu. Další postup přeměny energií je shodný s přeměnou v klasických tepelných elektrárnách. Celý proces přeměny energie názorně ukazuje obrázek 6-10.



Obr. 6-10: Proces přeměny jaderné energie na elektrickou v jaderné elektrárně

Pro účely matematického popisu této přeměny bude vhodné si nejdříve vyjádřit účinnost výroby tepelné energie v jaderném reaktoru (přesněji přeměny jaderné energie na tepelnou). Přesné vyjádření této účinnosti je však složité (závisí například na typu reaktoru a stáří paliva v něm) a přesahuje rámec této práce. Proto účinnost výroby tepelné energie určíme pouze orientačně ze statisticky vypočítaných energií, které se uvolní při štěpné jaderné reakci. Budeme uvažovat štěpení ^{235}U , které je častým případem štěpení a uvolní se při něm asi $E_j = 200$ MeV energie [37]. Následující tabulka ukazuje statistické rozdělení energií při jednom štěpení ^{235}U .

Tab. 6-1: Průměrné rozdělení energií z jednoho štěpení ^{235}U [37]

Druh energie E_x	E_x , [MeV]	$\frac{E_x}{E_j}$, [%]
Kinetická energie odštěpků	165,4	82,7
Energie volných neutronů	6,0	3,0
Energie okamžitého záření γ	6,0	3,0
Energie neutrin	11,1	5,6
Energie záření γ při rozpadu (zpožděné záření)	5,0	2,5
Energie záření β při rozpadu	5,0	2,5
Jiné druhy energie	1,5	0,7

Podílem získané tepelné energie a celkové energie uvolněné při jaderném štěpení můžeme orientačně vypočítat účinnost výroby tepla v jaderném reaktoru. Získaná tepelná energie E_t je výsledkem úplné přeměny kinetické energie odštěpků (mechanická energie je z pohledu přeměny na tepelnou energii stoprocentní energií). Dále se na tepelnou energii může přeměnit část energie záření γ a β (absorpcí ať už okamžitého nebo zpožděného záření). Jelikož se však jedná o vysokoenergetická záření, tak se na tepelnou energii nepřemění zcela a ve výpočtu budeme uvažovat, že na tepelnou energii se přemění 6 MeV ze 16 MeV. Dále při uvažované reakci vznikají 2-3 neutrony, které je nutno moderátorem zpomalit na energii $\approx 0,5$ MeV. Rozdíl energie neutronu před a za moderátorem se plně přemění na tepelnou energii – tj. $\approx 4,5$ MeV. Energie neutrin nemůže být využita, díky malému účinnému průřezu totiž projdou vším materiálem bez jakékoliv interakce. Na základě tohoto odstavce pak můžeme vypočítat teoretickou účinnost přeměny jaderné energie na tepelnou ve štěpném jaderném reaktoru

$$\eta_r = \frac{E_t}{E_j} = \frac{165,4 \text{ MeV} + 6 \text{ MeV} + 4,5 \text{ MeV}}{200 \text{ MeV}} = 0,8795 \doteq 0,88. \quad (6.17)$$

Z reaktoru získaná tepelná energie může být dále předávána tepelnému oběhu nebo je už přímo součástí tepelného oběhu, odvíjí se to od toho jak je elektrárna koncepčně řešena (resp. kolik tepelných okruhů obsahuje). V této práci budeme uvažovat častou dvouokruhovou koncepci, kde je předávka tepelné energie z jaderného reaktoru uskutečněna v parním generátoru. V procesu přeměny energií je tedy třeba uvažovat i účinnost parogenerátoru, kterou budeme dále uvažovat $\eta_{pg} = 0,9$.

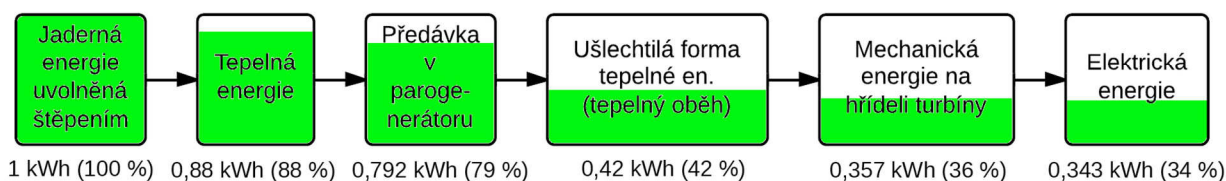
Další postup přeměny získané tepelné energie je shodný s přeměnami, které probíhají v klasické tepelné elektrárně za kotelním zařízením. Můžeme tedy vytvořit rovnici popisující množství elektrické energie na výstupu ze zařízení s jadernou energií na vstupu:

$$E_e = \eta_r \cdot \eta_{pg} \cdot \eta_{to} \cdot \eta_{tdi} \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot E_{jr} \quad (6.18)$$

kde η_{to} značí účinnost tepelného oběhu, η_{tdi} vnitřní termodynamickou účinnost turbíny, η_g účinnost elektrického generátoru, η_m mechanickou účinnost a E_{jr} je energie získaná jadernou reakcí. Mimo již zmíněné číselné hodnoty účinnosti reaktoru $\eta_r = 0,88$ a parogenerátoru $\eta_{pg} = 0,9$ budeme uvažovat účinnost $\eta_{to} = 0,53$, $\eta_{tdi} = 0,85$ (podle [25]), $\eta_g = 0,98$ (podle kapitoly 3.1.4) a $\eta_m = 0,98$ (podle [25]). Vstupní energie E_{jr} je stejně jako v předchozích případech uvažována $E_{jr} = 1$ kWh. Po dosažení je elektrická energie na výstupu rovna:

$$E_e = 0,88 \cdot 0,9 \cdot 0,53 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 1 \text{ kWh} = 0,343 \text{ kWh} \quad (6.19)$$

což graficky vyjadřuje následující obrázek:



Obr. 6-11: Proces přeměny jaderné energie na elektrickou energii s aktuálními velikostmi hladiny energie v jednotlivých částech procesu

Z uvedeného pak vyplývá, že celková účinnost přeměny v jaderných tepelných elektrárnách je nižší, než je tomu u klasických tepelných elektráren. V uvedeném případě to je dáno vložením parogenerátoru do procesu přeměn. Jaderný reaktor tak bezpečně pracuje při nižších teplotách a vyšších tlacích chladiva (u tlakovodních reaktorů) nebo pracuje jinými chladivy, jako je například sodík nebo hélium a generátor vodní páry je tedy nutností. Bezespornou výhodou jaderných tepelných elektráren je velká hustota výkonu vzhledem k zastavěné ploše a nulové imise skleníkových plynů do ovzduší. Navíc, vzhledem k tomu že se jedná o relativně novou technologii, jsou jaderné reaktory stále ve vývoji a účinnost celého procesu přeměny energií se zvyšuje. Navzdory tomu v posledních letech zažívá jaderná energetika krizi spojenou s jadernými haváriemi.

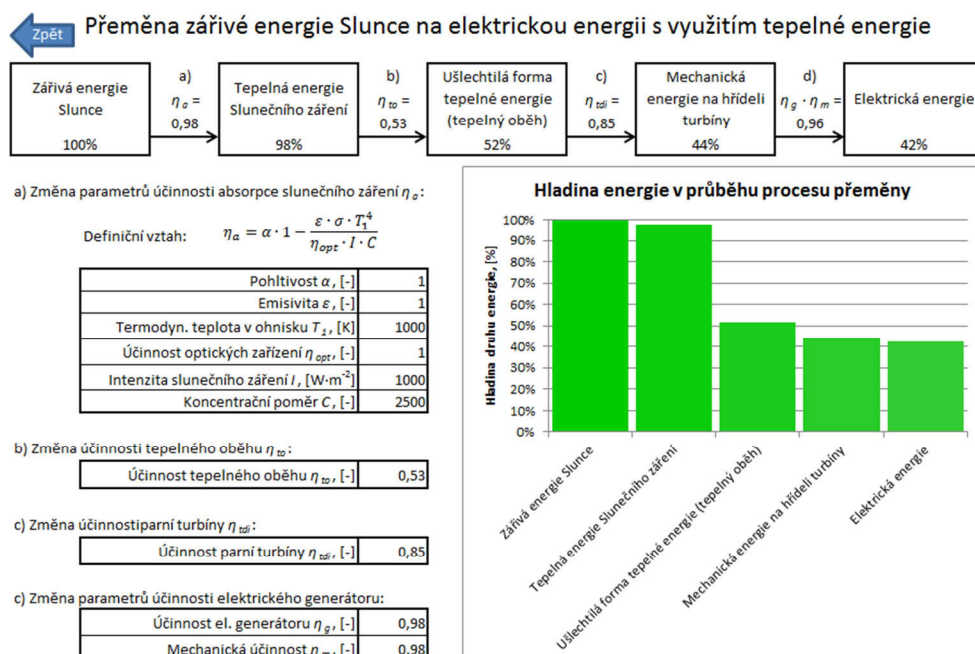
7 NÁVRH SIMULAČNÍHO PROGRAMU PRO DEMONSTRACI TOKU ENERGIE DIAGRAMEM

V předchozích částech práce jsme uvažovali, že přeměny energií probíhají vždy se specifickou účinností, která je závislá na dílčích veličinách. Tyto veličiny nebo i samotné účinnosti poté byly v části matematického popisu diagramu přeměn energií uvažovány buď jako typicky se v praxi vyskytující, nebo jako ideální. U konkrétního zařízení vyrábějícím elektrickou energii však mohou tyto veličiny nabývat jiných hodnot. Nebo také technickým vývojem může dojít ke zlepšení účinností přeměn. Proto, nejen z posledních dvou důvodů, se jeví jako vhodné měnit parametry přeměn energií a názorně tak ukázat provázanost diagramu. Sedmá kapitola této práce tedy navazuje na vytvořený diagram přeměn energií (obr. 5-1) a na předchozí kapitolu matematického popisu části diagramu. Cílem je návrh programu, který demonstruje tok energie při přeměnách uvedených v kapitole 6.

7.1 Funkce programu a volba programovacího nástroje

Možné funkce programu a volba programovacího nástroje jsou prvními kroky návrhu programu. Hlavní funkce programu bude změna účinností dílčích přeměn energií. V některých případech pak změna dílčích veličin definujících danou účinnost. Adekvátně ke změně hodnot účinností se změní i velikost výstupní energie. Další funkcí programu může být zobrazení hladiny energie v průběhu přeměny. Uživatel tak dostane názorný přehled o největším úskalí celé přeměny.

Co se týče programovacího nástroje, ve kterém může být simulační program vytvářen, je na výběr široká nabídka. Jmenovitě např. Microsoft Excel, Wolfram Mathematica nebo Matlab Simulink. Dá se říct, že nejdostupnějším a nejjednodušším nástrojem je Microsoft Excel. Změna účinností tak může být provedena v tabulkách, které jsou provázány s diagramem přeměny. Velikosti energie v průběhu procesu pak mohou být zdrojem dat pro zobrazení hladiny energie v jednotlivých fázích. Grafická ukázka možného řešení v Microsoft Excel je na následující obrázku, programová ukázka v tomtéž nástroji je obsažena v příloze této práce.



Obr. 7-1: Ukázka simulačního programu v Microsoft Excel podle vytvořeného návrhu.

8 ZÁVĚR

S rostoucím využíváním elektrické energie nabývá významu účinnost její výroby, přesněji řečeno účinnost přeměny energie zdroje na elektrickou energii. V úvodu práce byly energetické zdroje rozděleny podle jejich původu. Z rozdělení pak vyplývá, že nejvíce dostupné energie pochází ze Slunce. K přeměnám na energii elektrickou tak může být využita například energie slunečního záření, tepelná energie tohoto záření nebo také energie vzniklé následkem interakce slunečního záření a pohybu Země – větrná a vodní. Z energií původem ze Země jsme zmínili využití geotermální energie a dále prvky s využitelnou jadernou energií (ať už uvolnitelnou štěpením nebo syntézou).

Na přehled zdrojů energií jsme navázali rozborem účinností přeměn různých druhů energií na elektrickou energii. Zvlášť jsme se zabývali přímými a nepřímými přeměnami. Potenciál přímých přeměn spočívá v relativní jednoduchosti zařízení a celého procesu přeměny energií. Nejúčinnější z uvedených přímých přeměn energií je přeměna mechanicko-elektrická, která probíhá v elektrickém generátoru. Pro velké výkony tak v praxi může účinnost přeměny energií dosahovat až 99 % [21]. Další nejúčinnější zařízení jsou fotovoltaické články, jejichž maximální teoretická účinnost (pro články s nekonečným počtem vrstev) je 86 % [13] (v případě koncentrátorových vícevrstvých článků). V praxi se ale používají články daleko jednodušší (nejčastěji křemíkové jednovrstvé) a tomu také odpovídá účinnost přeměny energií okolo 16 %, která navíc časem klesá. Palivové články mají velikost teoretické účinnosti přeměny skoro stejně velkou jako fotovoltaické články, přibližně 83 % [10]. Jejich praktická účinnost přeměny energií ale dosahuje až 60 % [10], což je podstatě více v porovnání s fotovoltaickými články. Nejmenší účinnosti přeměn dosahují zařízení využívající tepelnou energii jako zdroj. Jmenovitě to jsou MHD generátory a termoelektrické články. Jejich účinnost je závislá na vlastnostech proudícího média (u MHD generátorů), resp. na rozdílu teplot (u termoelektrických článků). Praktická hodnota účinnosti se pak pohybuje do 20 % [23] u MHD generátorů a do 10 % u termoelektrických článků.

Nepřímé přeměny na rozdíl od přímých přeměn vyžadují více dílčích zařízení přeměňujících energie. Zmíněný byl nejvíce využívaný proces přeměny energií, na jehož vstupu je tepelná energie a ta se dále transformuje skrze tepelný oběh na energii mechanickou a elektrickou. Celková účinnost této posloupnosti přeměn se pohybuje v praxi okolo 40 %, což není zrovna mnoho. Jako hlavní úskalí celého procesu se dá označit tepelný oběh, který převádí vstupní tepelnou energii na její ušlechtilou formu (exergii) dále přeměnitelnou na mechanickou energii. Tepelné oběhy jsou navíc známy několik staletí, a ačkoliv od dob prvních parních strojů se jejich účinnost výrazně zvýšila (z 10 % na dnešních asi 53 %), lze přemýšlet o tom, jestli dnešní technologie přeměny tepelné energie na mechanickou nenarazila na limitní hodnotu účinnosti danou II. termodynamickým zákonem. Řešením pak mohou být například vícenásobné parní cykly, kombinovaný proces s plynovou a parní turbínou nebo předřazení MHD generátoru elektrárenskému paroplynovému cyklu. Další zmíněná nepřímá přeměna vstupní energie na elektrickou pak souvisí s využitím větrné energie. Účinnost takového zařízení je sice malá (běžně 35 %), ale vzhledem k tomu, že se jedná o obnovitelný zdroj a účinnosti dosahují cca 60 % teoretického maxima, je tento fakt přehlížen.

Na rozbor účinností přeměn různých druhů energií na elektrickou energii jsme dále navázali možnostmi akumulace elektrické energie. V podstatě se jedná o opačný proces přeměny energií, kdy je výchozím zdrojem elektrická energie, která se ukládá v případě přebytku do jiného druhu energie a v případě její potřeby je proces obrácený. Ze zmíněných způsobů akumulace elektrické

energie mají největší účinnost cyklu superkapacitory ($\eta_c > 90 \%$), elektrochemické akumulátory ($\eta_c = 90 \%$) a přečerpávací vodní elektrárny ($\eta_c = 80 \%$). Důležitým faktorem akumulace elektrické energie není jen účinnost cyklu, ale také i ekonomika provozu a měrné náklady. Tomuto pak je věnován závěr čtvrté kapitoly, který možnosti akumulace porovnává podle objemové hustoty energie, celkových nákladů, životnosti akumulátoru a samozřejmě účinností cyklu akumulace.

V návaznosti na výrobu a akumulaci elektrické energie byl sestaven Diagram přeměn energií, který mapuje účinnosti přeměn energií. Část tohoto diagramu (zejména přeměny v praxi nejužívanější) byly matematicky popsány a v závěru byl vytvořen nový diagram, který tyto konkrétní přeměny zobrazuje jak číselně, tak graficky. Protože je snaha, aby bylo možné v diagramu měnit účinnosti dílčích přeměn nebo přidávat další možnosti přeměny energií, byl v závěru práce vytvořen návrh simulačního programu. Tento program by pak měl mít za účel ukázat toky energií a provázanost celého diagramu přeměn energií.

S výhledem do budoucna by mohla být práce rozšířena. V sekci energetických zdrojů by tak například mohla být rozšířena problematika geotermální energie s ohledem na využití k přeměnám na elektrickou energii. Kapitola přeměn energií by mohla zmínit například přeměnu kinetické energie plynu na elektrickou energii (anglicky: electrogas dynamic generation), piezoelektrický jev nebo by mohl být zmíněn Strlingův motor pro přeměnu tepelné energie na mechanickou. Prostor k rozšíření práce se také nachází v části možností akumulace elektrické energie. Podle předchozích aktualizací by samozřejmě bylo nutné aktualizovat také část matematického popisu přeměn a již vytvořené diagramy. Finálním krokem by do budoucna bylo vytvoření simulačního programu pro demonstraci toků energie podle návrhu této práce.

Závěrem této práce můžeme obhájit snahu o vyšší účinnost přeměny energií tím, že nesouvisí jen s ekologickými požadavky dnešní doby, ale také s ekonomickou situací budoucnosti. Cena energetických zdrojů se totiž odvíjí od jejich dostupnosti. Například je tedy jasné, že při nehospodárném využívání ztenčujících se zásob fosilních zdrojů, jejich cena jen rychleji poroste.

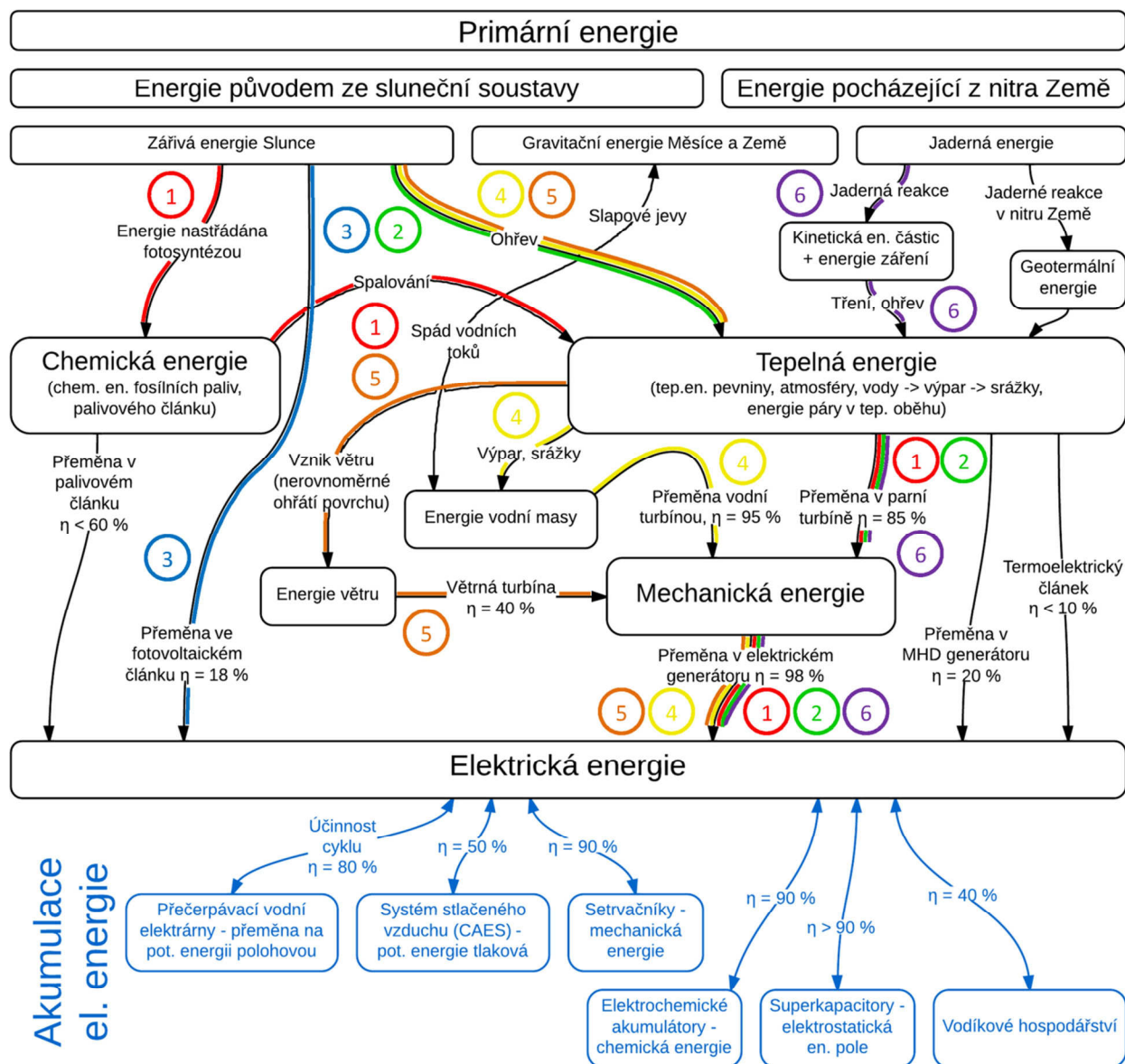
POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Global Energy Statistical Yearbook 2012. *Enerdata* [online]. 2012 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://yearbook.enerdata.net/electricity-domestic-consumption-data-by-region.html>
- [2] TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ. *Odmaturuj! z fyziky*. Vyd. 2. Brno: Didaktis, c2006, 224 s. Odmaturuj!. ISBN 80-735-8058-6.
- [3] KUBÍN, Miroslav. *Energetika: perspektivy - strategie - inovace v kontextu evropského vývoje*. Brno: Jihomoravská energetika, 2003, 540 s. ISBN 80-239-0587-2.
- [4] LIBICH, Vladimír. *Zdroje a přeměna energie*. 3. přeprac. vyd. Brno: VUT, 1990, 195 s. ISBN 80-214-0170-2.
- [5] Zkroťte sílu větru, bude pracovat pro vás. MÁCA, Josef, Pavel ABRAHAM a Petr BAČA. *HW.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-11-12]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/zkrotte-silu-vetru-bude-pracovat-pro-vas.html>
- [6] The Inconstant Sun. NASA. *NASA SCIENCE* [online]. 2003 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/17jan_solcon/
- [7] HANSLIAN, David, Jiří HOŠEK a Josef ŠTEKL. *Odhad realizovatelného potenciálu větrné energie na území ČR* [online]. Praha, 2008 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.ufa.cas.cz/files/OMET/potencial_ufa.pdf. Studie. Ústav fyziky atmosféry AV ČR.
- [8] Uran. *Periodická tabulka* [online]. 2009 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/92.html>
- [9] Fotovoltaika: Solární (fotovoltaické) články. KUSALA, Jaroslav. ČEZ. *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 2012-11-12]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [10] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [11] Jak fotovoltaická elektrárna funguje. *Slatinsky.eu* [online]. 2008 [cit. 2012-11-14]. Dostupné z: <http://www.slatinsky.eu/jak-elektrarna-funguje.html>
- [12] Benda, Vítězslav: Fotovoltaické systémy - úvod do fotovoltaiky, sborník ze semináře
- [13] Historie a perspektivy OZE: fotovoltaika, méně rozšířené technologie. BECHNÍK, Bronislav. *Tzbinfo: technické zařízení budov* [online]. 2009 [cit. 2012-11-12]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>
- [14] PORŠ, Zdeněk. ÚSTAV JADERNÉHO VÝZKUMU ŘEŽ. *Palivové články* [online]. 2002 [cit. 2012-11-26]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [15] Fuel cell. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012, 2012-11-19 [cit. 2012-11-26]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell
- [16] SVOBODA, Karel, Miloslav HARTMAN a Otakar TRNKA. Vysokoteplotní palivové články, vhodná paliva a možnosti jejich využití (I). BECHNÍK, Bronislav. *Tzbinfo*:

- technické zařízení budov* [online]. 2009 [cit. 2012-11-12]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1837-vysokoteplotni-palivove-clanky-vhodna-paliva-a-moznosti-jejich-vyuziti-i>
- [17] Palivové články. DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Hytep.cz: Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2012-11-26]. Dostupné z: <http://hytep.cz/?loc=article&id=5>
- [18] Thermoelectric effect. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-12-02]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect
- [19] KOZÁK, Jan. *TERMOELEKTRICKÝ GENERÁTOR* [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-12-02]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42227. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Radek Valach.
- [20] Význam termoelektrických generátorů rychle roste. KABEŠ, Karel. *ELEKTRO: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2012 [cit. 2012-12-02]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=43318
- [21] Electrical Machines: Generators. WOODBANK COMMUNICATIONS LTD. *Electropaedia* [online]. 2005 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/generators.htm>
- [22] MITCHNER, M. a Charles H. KRUGER, JR. Magnetohydrodynamics. *Partially Ionized Gases* [online]. 1973, s. 214-230 [cit. 2013-01-09]. Dostupné z: <http://www-hgtl.stanford.edu/PIG/Partially%20Ionized%20Gases.pdf>
- [23] Magnetohydrodynamic (MHD) Power Generation. WOODBANK COMMUNICATIONS LTD. *Electropaedia* [online]. 2005 [cit. 2013-01-09]. Dostupné z: http://www.mpoweruk.com/mhd_generator.htm
- [24] RAČEK, Jiří. *Technická mechanika: mechanika tekutin a termomechanika*. Vyd. 4. Brno: Novpress, 2009, 236 s. ISBN 978-80-214-3881-1.
- [25] RAČEK, Jiří. *Strojní zařízení elektráren: podklady pro cvičení*. Vyd. 3. Brno: Zdeněk Novotný, 2007. ISBN 80-214-3389-2.
- [26] RAGHEB, Magdi a Adam M. RAGHEB. Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio. *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power* [online]. InTech, 2011-07-05 [cit. 2013-04-25]. DOI: 10.5772/21398. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/wind-turbines-theory-the-betz-equation-and-optimal-rotor-tip-speed-ratio>
- [27] Měsíční zpráva o provozu - březen 2013. *Eru.cz* [online]. 2013 [cit. 2013-01-13]. Dostupné z: http://eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/mesicni_zpravy/2013/brezen/page39.htm
- [28] Akumulace elektrické energie. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2011, č. 2 [cit. 2013-01-13]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>
- [29] HELLER, Ondřej. *Akumulace energie z OZE: Accumulation of Energy from Renewable Energy Sources* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010 [cit. 2013-01-13]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26904. Diplomová práce. Vedoucí práce Petr Mastný.

- [30] DVOŘÁK, Petr, Petr BAČA a David PLÉHA. Akumulace elektřiny. *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2013-01-13]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [31] Lead–acid battery. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-01-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery
- [32] DUDUC, Vlado, Tim SCHRÖDER, Urs FITZE a Christian BUCK. Inteligentní elektřina pro 21. století. *VISIONS*. 2012, č. 3.
- [33] Gateway to a New Thinking in Energy Management - Ultracapacitors. MAXWELL TECHNOLOGIES. *IEEE* [online]. 2005 [cit. 2013-01-13]. Dostupné z: http://ewh.ieee.org/r6/scv/pses/ieee_scv_pses_jan05.pdf
- [34] STEINFELD, Aldo a Robert PALUMBO. Solar Thermochemical Process Technology. *Encyclopedia of physical science and technology*. San Diego: Academic Press, 2001, Vol. 15, s. 237-256. ISSN 0-12-227410-5. Dostupné z: http://pre.ethz.ch/publications/0_pdf/books/Solar_Thermochemical_Process_Technology.pdf
- [35] Odeillo a spol. KUSALA, Jaroslav. *Solární energie: Součást vzdělávacího programu SVĚT ENERGIE* [online]. 2006 [cit. 2012-11-12]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k23.htm>
- [36] NEJEDLÝ, Petr. Sluneční high-tech Andasol 1. In: SIČ, Petr. *Blog.idnes.cz* [online]. 2009 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://nejedly.blog.idnes.cz/c/93035/Slunecni-high-tech-Andasol-1.html>
- [37] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.

PŘÍLOHA A – DIAGRAM PŘEMĚN ENERGIÍ S VYZNAČENÍM PŘEMĚN, KTERÉ JSOU V PRÁCI ROZEBÍRÁNY



- ① - Přeměna zářivé energie Slunce na elektrickou energii přes chemickou energii fosilních paliv (kap. 6.1)
- ② - Přeměna zářivé energie Slunce na elektrickou energii s využitím tepelné energie (kap. 6.2)
- ③ - Přeměna zářivé energie Slunce na elektrickou energii přímo (kap. 6.3)
- ④ - Přeměna mechanické energie vodních toků na elektrickou energii (kap. 6.4)
- ⑤ - Přeměna kinetické energie větru na elektrickou energii (kap. 6.5)
- ⑥ - Přeměna jaderné energie skrz tepelnou a mechanickou energii na elektrickou (kap. 6.6)

PŘÍLOHA B – ZÁVĚREČNÝ DIAGRAM KAPITOLY 6

