

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Potenciál rozvoje mikrokogenerace v České republice

Autor práce: **Ondřej Bůžek**
Vedoucí práce: **Ing. Lenka Raková, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej BŮŽEK**
Osobní číslo: **E19B0129P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Potenciál rozvoje mikrogenerace v České republice**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Popište princip mikrogeneračních jednotek.
2. Posuďte jejich výhody a nevýhody oproti ostatním decentralizovaným zdrojům energie.
3. Zhodnoťte jejich současné využití v ČR a posuďte jejich možný budoucí potenciál využití s ohledem na plánovaný rozvoj chytrých sítí.
4. Posuďte možnost budoucího využití mikrogeneračních jednotek pro regulaci frekvence a napětí v elektrizační soustavě.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Dvorský, Emil a Hejtmánková, Pavla. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
2. Povýšil, Roman a kol. Mikrokogenerace –efektivní nástroj stability a bezpečnosti dodávek energie. MPO, Publikace Programu EFEKT 2011, 2011. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e1fa66875530f33e8a/mikrokogenerace.pdf>
3. Krbek, Jaroslav a Polesný, Bohumil. Kogenerační jednotky – zřizování a provoz. Praha: GAS, 2007. GAS. ISBN 978-80-7328-151-9.
4. Špale, Jan. Wave120 – kogenerační ORC jednotka na dřevní štěpku v kontejnerovém provedení. All for Power, Praha, leden 2021. ISSN 1802-8535. Dostupné z: <https://allforpower.cz/obnovitelne-zdroje/wave120-kogeneracni-orc-jednotka-na-drevni-stepku-v-kontejnerovem-provedeni-322>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Raková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**





Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Hlavním cílem této bakalářské práce je posouzení možnosti rozvoje mikrokogenerace v České republice a jejího využití pro regulaci frekvence a napětí v elektrizační soustavě. Na začátku práce je vysvětlen princip regulace napětí a frekvence v elektrizační soustavě. Druhá část práce má za úkol objasnit princip obecně kogeneračních jednotek, kde je provedené porovnání primárních jednotek a jsou zde i uvedeny jejich parametry. Jelikož se budoucnost energetiky ubírá cestou decentralizované výroby, kam řadíme mikrokogenerační jednotky a obnovitelné zdroje energie, tak třetí část se věnuje vzájemnému porovnání těchto technologií. Následující část práce obsahuje současné využití mikrokogeneračních jednotek a plánovaný budoucí rozvoj těchto jednotek. V závěru této bakalářské práce je provedena počítačová simulace, s jejíž pomocí je analyzována možnost regulace napětí a frekvence v elektrizační soustavě za pomoci mikrokogeneračních jednotek.

Klíčová slova

Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie, mikrokogenerační jednotka, decentralizovaná výroba, obnovitelné zdroje energie, elektrizační soustava, regulace frekvence a napětí, statické frekvenční a napěťové charakteristiky, Smart Grid

Abstract

The main goal of this bachelor thesis is to assess the possibility of developing micro-cogeneration in the Czech Republic and its use for frequency and voltage regulation in the power system. At the beginning of the thesis, the principle of frequency and voltage regulation in the electrical system is explained. The second part of the thesis aims to clarify the principle of generally cogeneration units, where a comparison of primary units and their parameters are formed. As the future of energy heads towards to decentralized production, which includes micro-cogeneration units and renewable energy sources, the third part of the thesis is devoted to the mutual comparison of these technologies. The following part of the thesis consists of the current use of micro-cogeneration units and the planned future development of these units. In the conclusion of this bachelor's thesis, a computer simulation is performed, which analyses the possibility of voltage and frequency regulation in the power system using micro-cogeneration units.

Key Words

Combined heat and power generation, microcogeneration unit, decentralized production, renewable energy, electrical system, frequency and voltage regulation, static frequency and voltage characteristics, Smart Grid

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval paní Ing. Lence Rakové, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, trpělivost, přínosné rady a její čas, který si na mne vždy našla. Také bych chtěl poděkovat panu Doc. Ing. Emilovi Dvorskému, CSc. za poskytnutí obrázků, které přispěly k lepšímu estetickému dojmu z této práce.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Elektrizační soustava.....	- 2 -
1.1 Statické charakteristiky.....	- 3 -
1.2 Regulace napětí v elektrizační soustavě	- 6 -
1.3 Regulace frekvence v elektrizační soustavě	- 8 -
2 Princip kogenerace	- 10 -
2.1 Využití primárních zdrojů.....	- 10 -
2.2 Obecné výhody kombinované výroby elektrické a tepelné energie	- 11 -
2.3 Trigenerace	- 11 -
3 Energetické parametry a pojmy.....	- 12 -
4 Rozdělení kogeneračních jednotek.....	- 15 -
4.1 Konstrukční provedení.....	- 15 -
4.2 Instalovaný výkon.....	- 16 -
4.3 Kogenerační systémy	- 16 -
4.4 Kogenerační technologie	- 17 -
4.5 Primární jednotky kogeneračních soustrojí	- 18 -
5 Primární mikrokogerační jednotky s přímou transformací	- 20 -
5.1 Palivové články.....	- 20 -
6 Primární mikrokogerační jednotky s vnějším spalováním.....	- 24 -
6.1 Parní turbíny	- 24 -
6.2 Organický Rankinův cyklus.....	- 26 -
6.3 Plynové turbíny.....	- 28 -
6.4 Mikroturbíny	- 29 -
6.5 Stirlingův motor.....	- 30 -
7 Primární mikrokogerační jednotky s vnitřním spalováním.....	- 32 -
7.1 Spalovací motory	- 32 -
8 Porovnání primárních jednotek pro mikrokogerační jednotky.....	- 35 -
8.1 Porovnání primárních jednotek.....	- 35 -
8.2 Parametry primárních jednotek.....	- 37 -

9	Potencionální oblasti využití mikrokogenerace	- 38 -
10	WAVE120.....	- 40 -
10.1	Historie projektu WAVE	- 40 -
10.2	Technické parametry projektu WAVE120	- 41 -
10.3	Investiční náklady	- 43 -
11	Ostatní decentralizované zdroje energie	- 44 -
11.1	Fotovoltaické panely a tepelné kolektory	- 45 -
11.2	Větrné elektrárny	- 46 -
11.3	Vodní elektrárny	- 49 -
11.4	Srovnávací tabulka KJ s OZE.....	- 53 -
12	Potenciál využití mikrokogeneračních jednotek v ČR.....	- 54 -
12.1	Současné využití mikrokogeneračních jednotek.....	- 54 -
12.2	Budoucí využití mikrokogeneračních jednotek	- 55 -
13	Regulace frekvence a napětí v ES pomocí mikrokogenerace	- 60 -
13.1	Regulace výstupního výkonu mikrokogenerační jednotky na konstantní hodnotu	- 62 -
13.2	Regulace výstupního výkonu mikrokogenerační jednotky dle změny zatížení	- 65 -
	Závěr	- 70 -
	Seznamy	- 71 -
	Literatura	- 74 -
	Přílohy	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
<i>CS</i>	Centralizované systémy	
<i>CZT</i>	Centrální zásobování tepla	
<i>DCS</i>	Decentralizované systémy	
<i>DS</i>	Distribuční soustava	
<i>ES</i>	Elektrizační soustava	
<i>f</i>	frekvence	(Hz)
<i>FVE</i>	Fotovoltaická elektrárna	
<i>I</i>	Elektrický proud	(A)
<i>KJ</i>	Kogenerační jednotka	
<i>KoPaT</i>	Kondenzační turbína	
<i>KS</i>	Kogenerační systémy	
<i>KVET</i>	Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie	
<i>KZ</i>	Kogenerační zařízení	
<i>MT</i>	Mikroturbína	
<i>NN</i>	Nízké napětí	
<i>ODV</i>	Oddělená výroba	
<i>ORC</i>	Organický Rankinův cyklus	
<i>OZE</i>	Obnovitelné zdroje energie	
<i>PaT</i>	Parní turbíny	
<i>PC</i>	Palivový článek	
<i>PJ</i>	Primární jednotka	
<i>PR</i>	Primární regulace	
<i>PrPaT</i>	Protitlaká turbína	
<i>PZ</i>	Primární zdroj	
<i>Q</i>	Jalový elektrický výkon	(VAr)
<i>Q</i>	Teplo	(J)
<i>R</i>	Elektrický odpor (rezistivita)	(Ω)
<i>RC</i>	Rankinův oběh	
<i>s</i>	Entropie	(kJ/kg.K)
<i>SM</i>	Pístové spalovací motory	
<i>SR</i>	Sekundární regulace	
<i>StM</i>	Stirlingův motor	
<i>T</i>	Absolutní teplota	(K)
<i>TO</i>	Tepelný oběh	
<i>TR</i>	Transformátor	
<i>TR</i>	Terciární regulace	
<i>U</i>	Elektrické napětí	(V)
<i>VE</i>	Vodní elektrárna	
<i>VN</i>	Vysoké napětí	
<i>VVN</i>	Velmi vysokého napětí	
<i>X</i>	Reaktance (jalový odpor)	(Ω)
<i>Z</i>	Impedance	(Ω)
<i>t</i>	Čas	(s)
<i>RC</i>	Rankinův oběh	
<i>X</i>	Reaktance (jalový odpor)	(Ω)
$P = P_E$	Činný elektrický výkon	(W)
<i>m</i>	Hmotnost	(kg)

k_p	Koeficient frekvenční statické charakteristiky	(-)
k_q	Koeficient napět'ové statické charakteristiky	(-)
\bar{S}	Komplexní zdánlivý výkon	(-)
σ	Modul teplotenské výroby	(-)
n	Otáčky	(ot/min)
p	Počet pólových dvojic	(-)
ph	Pohotovost	(-)
P_T	Tepelný výkon	(W)
η	Účinnost	(-)

Úvod

Elektrická energie je nejuniverzálnější formou energie, je možné jí transformovat na veškeré známé druhy energie a také ji relativně snadno vyrobit a transportovat k místu spotřeby. Současné elektrárenské a teplárenské zdroje je potřeba neustále modernizovat a provádět retrofit jejich zařízení. Způsob řešení energetické krize cestou inovace současných zdrojů není z dlouhodobého pohledu, vzhledem ke snižování zásob fosilních paliv a značné ekonomické a technologické náročnosti jejich modernizace, zcela ideální. V současné době je to však nezbytné. Proto se za klasické elektrárny a teplárny hledá náhrada, popřípadě je snaha co nejdéle prodloužit dobu jejich provozuschopnosti. Na nové, ale i stávající, zdroje jsou kladeny stále větší ekologické a technologické nároky, což vede k velkým investičním nákladům a dlouhé době výzkumů. Jedním z optimálních řešení je kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie.

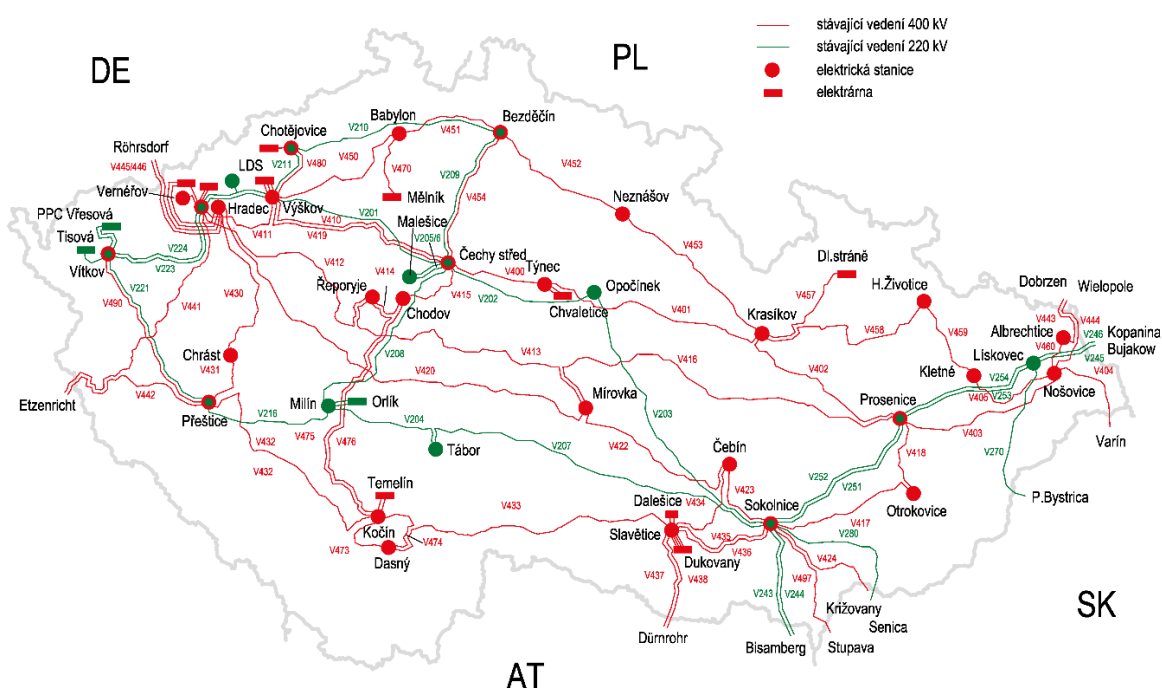
Kombinovaná výroba elektřiny a tepla dosahuje poměrně vysoké účinnosti přeměny energie primárního paliva na elektrickou a tepelnou energii, díky čemuž se jeví jako nejlepší možný kandidát na náhradu za stávající klasické elektrárenské a teplárenské zařízení. Tento fakt ještě víc umocňuje vzrůstající trend ceny emisních povolenek, které jsou rok od roku vyšší. V současné době hrají ve výrobě elektřiny a tepla největší roli fosilní paliva. Bohužel zásoby fosilních paliv na světě nejsou neomezené, proto se výhledově počítá s odstavením zdrojů spalujících tyto paliva. Budoucnost energetiky by měly formovat obnovitelné zdroje energie.

Zařízení produkující zároveň tepelnou a elektrickou energii nazýváme kogenerační jednotky. Tyto jednotky jsou velice všestranné, mohou využívat primární jednotky založené na palivových článcích, fosilních palivech, zemědělském odpadu, skládkových plynech, dřevní štěpce a mnohých dalších. Díky této skutečnosti by kogenerační jednotky mohly zvýšit podíl množství vyrobené (transformované) elektřiny a tepla z obnovitelných zdrojů energie, ne-li kompletně nahradit zdroje spalující fosilní paliva. Do budoucna se počítá s větším rozvojem menších energetických zařízení v bezprostřední blízkosti místa spotřeby, což výrazně omezí ztráty vzniklé při dopravě a přenosu jednotlivých forem energií. Menší kogenerační jednotky, které toto umožňují, označujeme jako mikrokogenerační jednotky.

Předpokládá se, že se mikrokogenerační jednotky budou podílet na regulaci napětí a frekvence v elektrizační soustavě, která by měla být doplněna v blízké době o takzvanou technologii chytrých sítí, což povede k větší spolehlivosti elektrizační soustavy při větším rozvoji decentralizace výroby elektřiny a tepla.

1 Elektrizací soustava

Elektrizací soustava (ES) je propojený systém, který je tvořen zařízeními nezbytnými pro výrobu, přenos a distribuci elektrické energie. Přenosová soustava propojuje jednotlivé elektrárny s transformačními stanicemi, které jsou spojovacím článkem mezi soustavami o různých napěťových hladinách. Pro českou přenosovou soustavu jsou charakteristické napěťové hladiny 400 a 220 kV. Distribuční soustavy (DS), které rozvádějí elektrinu až ke koncovým zákazníkům, pracují s nižšími napěťovými hladinami. V transformovnách se napětí přenosové soustavy transformuje na nižší hodnotu napětí a elektrina je distribuována dále k zákazníkům. [1]



Obrázek 1: Schéma přenosové soustavy České republiky [2]

Energetické systémy můžeme rozdělit na základě vzdálenosti mezi výrobou a spotřebou na:

- centralizované systémy - dálkové,
- decentralizované systémy - lokální.

Centralizované systémy (CS) využívají ekonomické výhody velkokapacitní výroby energií. Jedná se o centrální energetické zdroje, kdy se celkové náklady významně snižují s velikostí produkce. Energetické výrobní jsou umístěny blízko výskytu primárního zdroje (PZ), což umožňuje transformaci PZ na jinou formu energie, která je lépe dopravitelná k místu spotřeby.

Decentralizované systémy (DCS) jsou umístěny bezprostředně k místu spotřeby. Mohou být provozovány energetickými výrobci či dodavateli nebo samotnými spotřebiteli. Energetické výrobní pracující do těchto systémů se označují za decentralizované energetické zdroje. [3]

Systémové služby jsou činnosti ČEPS zajišťující kvalitu a spolehlivost dodávky elektřiny na úrovni přenosové soustavy a plnění mezinárodních závazků a podmínek propojení ES ČR. Kvalitou se rozumí zejména parametry frekvence a napětí. Spolehlivostí dodávky se rozumí nepřerušenosť dodávky v místech odběrů.

Podpůrné služby jsou prostředky pro zajištění **systémových služeb**. Pomocí podpůrných služeb je možno korigovat rozdíly mezi odběrem a výrobou, a to změnami spotřeby či výroby. Subjekty připojené do ES mají právo nabízet podpůrné služby, pokud splňují technické a obchodní podmínky stanovené provozovatelem přenosové soustavy. Podpůrné služby dělíme na:

- služby výkonové rovnováhy – používané k zajištění výkonové bilance,
- ostatní podpůrné služby (nefrekvenční služby) – používáme k zajištění kvality napětí a provozu přenosové soustavy. [4]

1.1 Statické charakteristiky

Pro zachování jmenovité hodnoty napětí a frekvence v ES musí být zachována výkonová bilance, viz rovnice (1). Při nedodržení výkonové bilance může dojít k zvýšení či snížení toku jalového nebo činného výkonu jak na straně výroby, tak na straně spotřeby, což má za následek změnu frekvence a napětí v ES.

$$\overline{S}_V(t) = \overline{S}_S(t) + \overline{S}_Z(t) + \overline{S}_A(t) \quad (-) \quad (1)$$

Kde:

$\overline{S}_V(t)$ – okamžitá hodnota komplexního vyrobeného zdánlivého výkonu (-),

$\overline{S}_S(t)$ – okamžitá hodnota komplexního spotřebovaného zdánlivého výkonu (-),

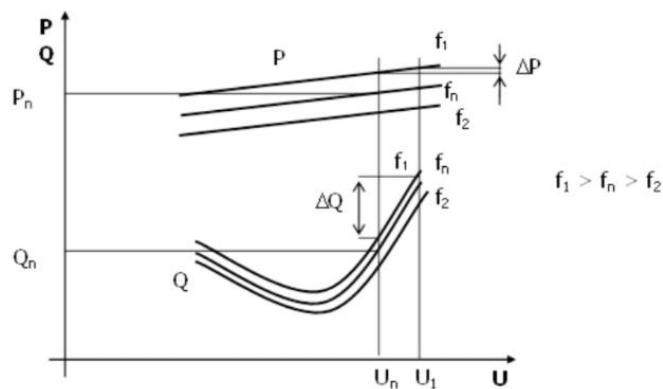
$\overline{S}_Z(t)$ – okamžitá hodnota komplexního ztrátového zdánlivého výkonu (-),

$\overline{S}_A(t)$ – okamžitá hodnota komplexního akumulovaného zdánlivého výkonu (-).

Pro udržení výkonové bilance v ES slouží regulace výkonů na straně výroby a spotřeby. Jedním z možných řešení, jak regulovat ES na straně výroby, jsou kogenerační jednotky. Touto možností regulace se bude tato práce zabírat v Kapitole 13. Nutnou podmínkou pro realizaci regulace je dostatečné množství regulačního výkonu. Výkony na

straně spotřeby mohou být regulovány za pomoci hromadného dálkového ovládání, akumulčního zařízení nebo smluvními tarify danými distributory elektrické energie.

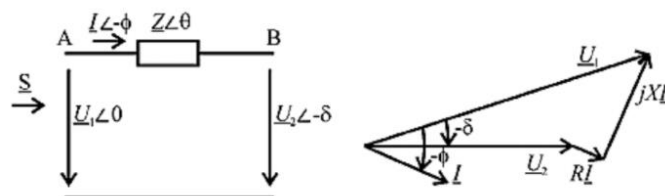
Provozní vlastnosti neregulované ES jsou v ustáleném stavu určeny statickými charakteristikami. Činný i jalový výkon má vliv na hodnotu napětí i frekvence v ES. Frekvence je globálním parametrem ES, protože ve všech místech ES máme stejnou frekvenci. Oproti tomu napětí je lokálním parametrem, což znamená, že napěťové hladiny na různých místech ES se mohou lišit. Statické charakteristiky rozlišujeme na charakteristiky zdrojů, zátěže a elektrizační soustavy.



Obrázek 2: Statické charakteristiky zátěže [5]

Z Obrázku 2 vyplývá, že při narušení bilance činného výkonu dochází ke změně frekvence a při narušení toku jalového výkonu dochází k odchylce od jmenovité hodnoty napětí.

V ES na hladině vysokého napětí (VN) i velmi vysokého napětí (VVN), kde převládá jalová složka impedance sítě ($X \gg R$), ovlivňuje činný výkon P hodnotu frekvence f v síti a jalový výkon Q velikost napětí U . Toto tvrzení je patrné v následujících rovnicích, které popisují přenos komplexního zdánlivého výkonu \bar{S} mezi zdrojem a místem připojení k síti (Obrázek 3).



Obrázek 3: Schéma pro odvození statických charakteristik [5]

$$\bar{S} = P + jQ = \overline{U_1 \cdot I^*} = \frac{U_1^2}{Z} \cdot e^{j\theta} - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z} \cdot e^{j(\theta+\delta)} \quad (2)$$

Kde:

P - činný elektrický výkon (W),

Q - jalový elektrický výkon (VAr),

U_1 - hodnota napětí u zdroje (V),

U_2 - hodnota napětí v místě připojení (V),

Z - impedance příslušného úseku sítě (Ω),

θ - úhel impedance sítě (rad),

δ - zátěžný úhel (rad).

$$P = \frac{U_1^2}{Z} \cdot \cos \theta - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z} \cdot \cos(\theta + \delta) \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_1^2}{Z} \cdot \sin \theta - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z} \cdot \sin(\theta + \delta) \quad (4)$$

Dosazením impedance (5) do rovnic (3) a (4) a jejich matematickou úpravou je lze upravit na výrazy (6) a (7)

$$Z \cdot e^{j\theta} = R + jX \quad (5)$$

$$U_2 \cdot \sin \delta \cong \frac{X \cdot P - R \cdot Q}{U_1} \quad (6)$$

$$U_1 - U_2 \cdot \sin \delta \cong \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U_1} \quad (7)$$

Za předpokladu převažující jalové složky impedance nad reálnou složkou impedance sítě ($X \gg R$) je možné reálnou složku impedance zanedbat. Pokud je zátěžný úhel malý, můžeme provést tyto úpravy $\sin \delta = \delta$ a $\cos \delta = 1$. Rovnice (6) a (7) lze upravit na rovnice (8) a (9).

$$\delta \cong \frac{X \cdot P}{U_1 \cdot U_2} \quad (8)$$

$$U_1 - U_2 \cong \frac{X \cdot Q}{U_1} \quad (9)$$

Z rovnic (8) a (9) je vidět frekvenční závislost mezi množstvím činného výkonu a závislost mezi změnou toku jalového výkonu a velikostí napětí. Výsledné statické frekvenční a napětěvé charakteristiky je možné formulovat vztahy:

$$f - f_0 = -k_p \cdot (P - P_0) \quad (10)$$

$$U - U_0 = -k_q \cdot (Q - Q_0) \quad (11)$$

Kde:

f - frekvence (Hz),

k_p - koeficient frekvenční statické charakteristiky (-),

k_q - koeficient napětěvé statické charakteristiky (-).

Koeficienty příslušných statických charakteristik lze vypočítat jako podíl dovolené odchylky frekvence (napětí) a příslušné odchylky činného (jalového) výkonu od jmenovitých hodnot, jejich velikost určuje sklon charakteristik. [5]

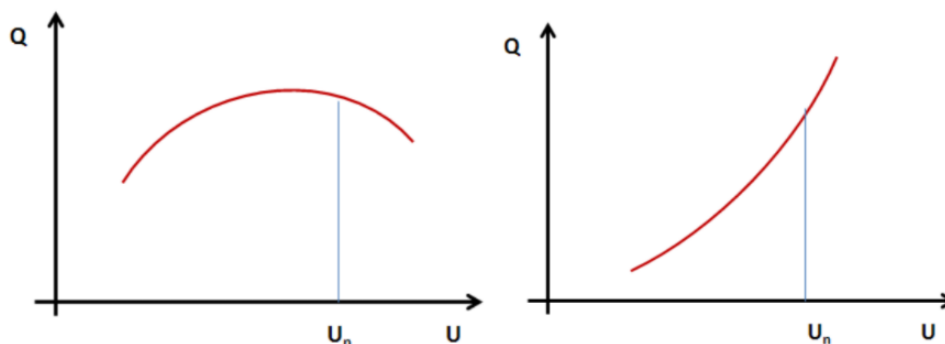
1.2 Regulace napětí v elektrizační soustavě

Napětí v ES lze řídit změnou impedance sítě, jalového výkonu a hladiny napětí. Mezi konkrétní příklady regulace napětí v ES řadíme:

- zapínání, vypínání a přepojování vedení a transformátorů,
- zapínání, vypínání a regulace odběrů elektřiny,
- zapínání, vypínání elektrárenských bloků,
- zapínání, vypínání a proměnné dodávky ostatních zdrojů elektřiny,
- zapínání, vypínání kompenzačních prostředků,
- změnu odboček regulačních transformátorů,
- poruchy (zkraty apod.) a tranzitní toky v síti.

Statické napěťové charakteristiky zdrojů

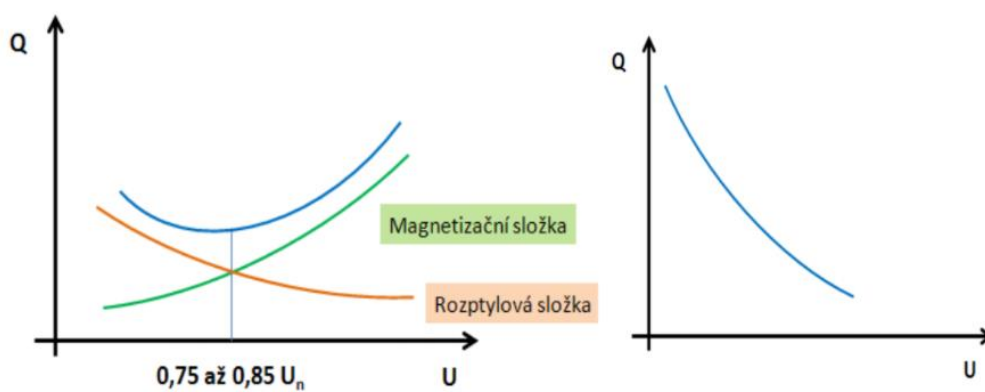
V ES jsou hlavními zdroji jalového výkonu synchronní generátory, kondenzátorové baterie, synchronní kompenzátory, synchronní motory a vedení VVN. Na Obrázku 4 je vyobrazena, v levé části, statická charakteristika typická pro generátory, synchronní kompenzátory a motory. Naproti tomu v pravé části Obrázku 4 je statická charakteristika kondenzátorů a vedení VVN. Výsledná statická charakteristika zdrojů je součtem všech dílčích charakteristik zdrojů, která se však nejvíce podobá statické charakteristice generátorů, protože právě oni se nejvíce podílejí na tvorbě jalového výkonu v ES.



Obrázek 4: Statické napěťové charakteristiky zdrojů [5]

Statické napěťové charakteristiky zatížení

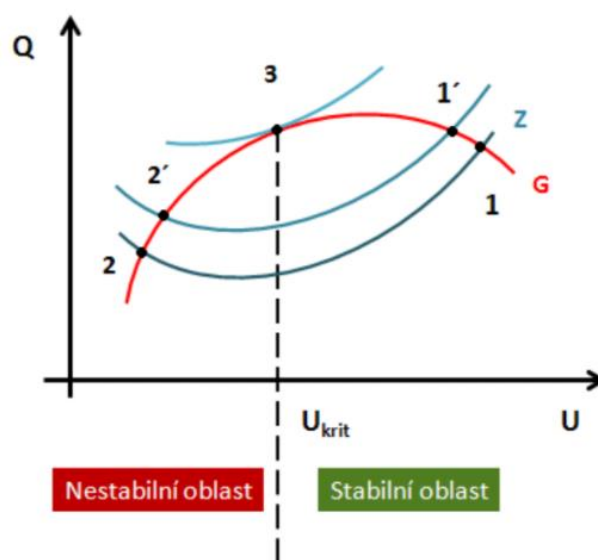
Mezi hlavní spotřebitele jalového výkonu v ES řadíme transformátory (60 % až 70 %), asynchronní motory, kompenzační tlumivky a vedení VN. Větší část odebíraného jalového výkonu slouží pro vytvoření magnetického pole u točivých i netočivých elektrických strojů. Zbylá část je tvořena ztrátami v magnetických rozptylech. Výsledný odebíraný jalový výkon je dán součtem magnetizační a rozptylové složky. Z toho plyne, že výsledná statická charakteristika zátěže má minimum při 75 % až 85 % U_n . Statická charakteristika vedení má podobný průběh jako rozptylová složka u transformátorů a motorů. Tento fakt je viditelný na Obrázku 5, z toho lze vyvodit, že při poklesu napětí rostou jalové ztráty vzniklé na vedení. Opět je výsledná statická napěťová charakteristika dána součtem jejich dílčích charakteristik.



Obrázek 5: Statické napěťové charakteristiky: a) transformátory a motory, b) vedení [5]

Statické napěťové charakteristiky elektrizační soustavy

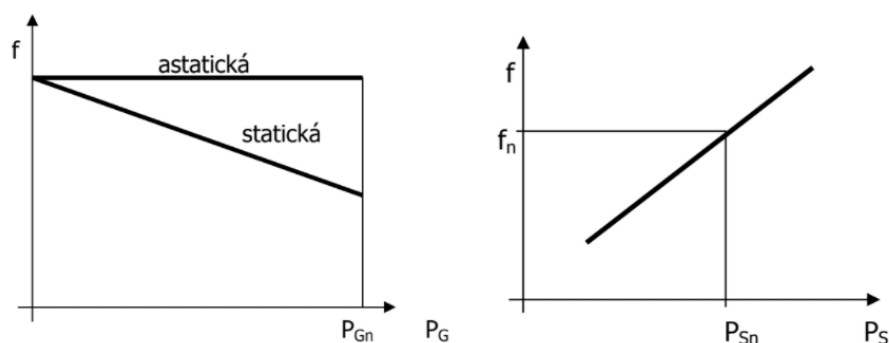
Ustálený provozní stav ES je dán průsečíkem statické napěťové charakteristiky zdrojů a zátěže viz Obrázek 6. Při zvýšení zatížení ES (posun z bodu I do bodu I') dochází k poklesu napětí a nárůstu odběru jalového výkonu. Při překročení kritické hodnoty napětí U_{krit} dojde v daném místě ES k zhroucení napětí. Při tomto jevu hovoříme o tzv. **napěťové lavině**. V nestabilní části poklesem napětí vzniká deficit jalového výkonu na straně zdrojů. Dodávka jalového výkonu je možná pouze v regulačním rozsahu daného zdroje. [5], [6]



Obrázek 6: Stabilita elektrizační soustavy [5]

1.3 Regulace frekvence v elektrizační soustavě

Tak jako u napěťových statických charakteristik, i u frekvenčních statických platí, že výsledná charakteristika soustavy je rovna součtu charakteristik zdrojů a zátěží, které jsou rovněž dány, jako součet jednotlivých dílčích charakteristik.



Obrázek 7: Frekvenční statická charakteristika: a) zdrojů, b) zátěží [7]

Výkonové číslo soustavy nám říká, kdy dojde ke změně frekvence o 1 Hz při změně velikosti výkonů na straně zdroje nebo zátěže.

Výkonový součinitel zatížení (zdrojů) je směrnici přímky, jež definuje poměrnou změnu zatížení (zdrojů) vztahenou k poměrné změně frekvence v okolí jmenovitého kmitočtu.

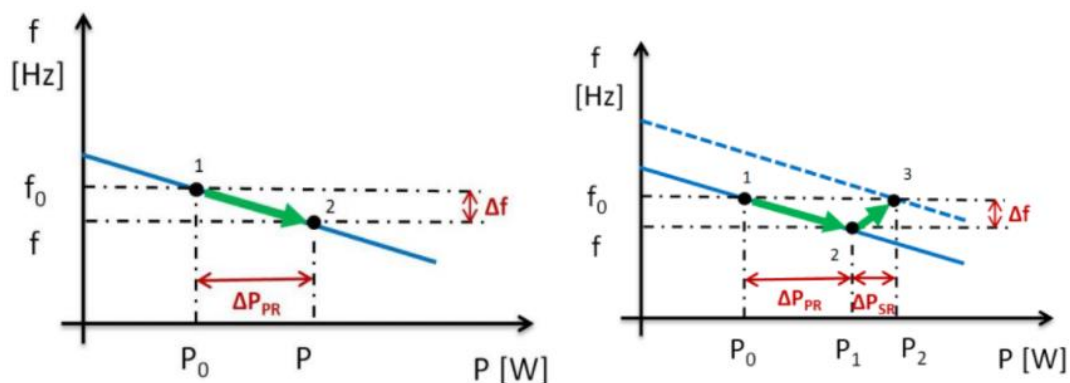
Regulace frekvence má hierarchický charakter. Dělí se do tří stupňů: primární, sekundární a terciální regulace. [6]

Primární regulace (PR), také známá jako princip solidarity, je realizována na úrovni elektrárenského bloku. V případě výpadku elektrárenského bloku o výkonu ΔP , převezmou

jeho výkon ostatní synchronně pracující generátory v závislosti na elektrické vzdálenosti generátoru od místa výpadku, čímž je zajištěná výkonová bilance. Pro zbylé elektrárny spolupracující s ES se na straně pohybové rovnice (popisující otáčky generátoru) objeví brzdící moment, který způsobí zpomalování generátorů a rovněž pokles frekvence v ES. Právě na tento pokles reagují primární regulátory turbín, které dají signál k většímu otevření regulačních ventilů. Změna výkonu turbíny je úměrná odchylce frekvence od jmenovité hodnoty. Tato regulace může být rovněž provedená snížením zatížení ES.

Sekundární regulace (SR) má za úkol odstranění odchylky napětí a frekvence od jmenovité hodnoty, čehož se docílí zvýšením či snížením dodávaného jalového a činného výkonu do ES. Tímto způsobem se parametry sítě vrátí do jmenovitých hodnot

Na činnost SR navazuje **terciární regulace (TR)**, která slouží pro nahrazení vyčerpané sekundární regulační zálohy (výkon použitý na SR). Pro TR se využívá točivá rezerva na blocích poskytující podpůrné služby. Pro podpůrné služby se využívají zejména vodní a parní elektrárny.



Obrázek 8: Frekvenční statická charakteristika: a) PR, b) PR a SR [7]

Na Obrázku 8 je znázorněn průběh PR frekvence při zvýšení zatížení (posun z bodu 1 do bodu 2). PR zajistila obnovení výkonové bilance, díky navýšení ΔP_{PR} . SR (posun z bodu 2 do bodu 3) odstranila odchylku frekvence od jmenovité hodnoty. [6], [7]

V dnešní době je v ČR provozovatelem české přenosové soustavy (ČEPS, a.s.) pro regulaci frekvence využívána následující terminologie:

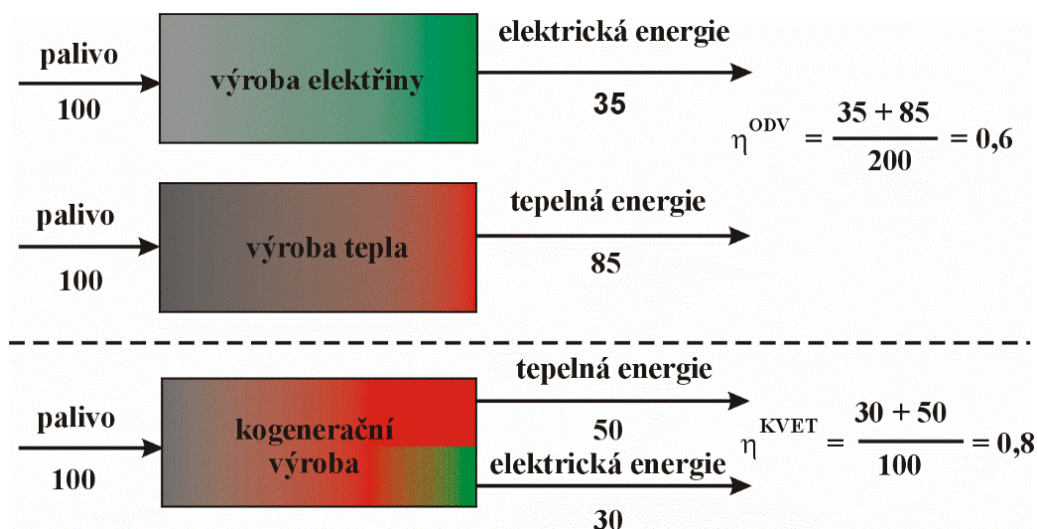
- PR – je dnes označována jako: **Proces automatické regulace frekvence (FCP)**
- SR – je dnes označována jako: **Automaticky ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy (AFRP)**
- TR – je dnes označována jako: **Ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy (MFRP5, MFRP15+, MFRP15-)**

2 Princip kogenerace

Význam slova kogenerace pochází z anglického slova co-generation, což se dá doslovně přeložit do českého jazyka jako spolu-výroba. Jedná se tedy o kombinovanou výrobu více druhů energie. Nejčastěji je tento pojem spojován s kombinovanou výrobou elektrické a tepelné energie (KVET). KVET probíhá v zařízeních, které se nazývají kogenerační jednotky (KJ).

2.1 Využití primárních zdrojů

V dnešní době, kdy se kladou velké nároky na emisní povolenky, jsou KJ jedním z nejlepších možných řešení pro snížení spalování PZ, které jsou z drtivé většiny tvořeny fosilními palivy a biomasou. KVET oproti oddělené výrobě (ODV) energie dosahuje větší účinnosti, díky využívání jednoho PZ pro výrobu energie. Tato skutečnost je patrná na Obrázku 9 a z rovnice (12) a (13), kde je provedené porovnání účinností ODV energie s KVET. Pro názornost uvažujeme účinnost ODV elektrické energie 35 % a tepelné 85 %. U KVET předpokládáme účinnost elektrické výroby 30 % a tepelné 50 %. Zvýšení účinnosti transformace PZ vede ke snížení negativních dopadů doprovázejících výrobu energií a úsporám PZ. [3]



Obrázek 9: Výrobní řetězec transformace primárního zdroje [3]

$$\eta^{ODV} = \frac{\eta_E^{ODV} + \eta_T^{ODV}}{Q_{PAL} + Q_{PAL}} = \frac{35 + 85}{200} = 0,6 \quad (-) \quad (12)$$

$$\eta^{KVET} = \frac{\eta_E^{KVET} + \eta_T^{KVET}}{Q_{PAL}} = \frac{30 + 50}{100} = 0,8 \quad (-) \quad (13)$$

Kde:

η^{ODV} - účinnost ODV (-),

η_E^{ODV} - účinnost elektrické výroby při ODV (-),

η_T^{ODV} - účinnost tepelné výroby při ODV (-),

Q_{PAL} - množství tepelné energie uložené v palivu (J),

η^{KVET} - účinnost KVET (-),

η_E^{KVET} - účinnost elektrické výroby při KVET (-),

η_T^{KVET} - účinnost tepelné výroby při KVET (-).

2.2 Obecné výhody kombinované výroby elektrické a tepelné energie

Mezi obecné výhody patří zejména:

- zvýšená účinnost využití PZ při společné výrobě elektrické a tepelné energie,
- možnost umístění KJ blízko místa spotřeby energie, což snižuje ztráty vzniklé při přenosu a distribuci elektrické energie,
- snížení znečištění životního prostředí,
- snížení pokrytí spotřeby z neobnovitelných zdrojů a zvýšení podílu obnovitelných zdrojů na krytí spotřeby energie,
- snadné napojení na již stávající a plánované technologie v průmyslových aplikacích, komerčním a bytovém sektoru. [3]

2.3 Trigenerace

Trigenerace je speciální modifikací kogenerace. Označuje společnou výrobu elektřiny, tepla a chladu. Trigenerace vzniká spojením KJ a chladicí jednotky, díky tomuto spojení je možné i v letním období, kdy skoro neexistuje poptávka po tepelné energii, efektivně využívat teplo vyprodukované KJ. Tím výrazně prodlužuje dobu společné výroby elektřiny a tepla KJ, a umožňuje efektivnější využití zařízení. Pojem **výroba chladu** není z fyzikálního hlediska korektní, je však krátký a výstižný. Jedná se o přípravu chladné vody, která je uživatelská všude, kde je potřeba klimatizovat určité místnosti či objekty. [8]

3 Energetické parametry a pojmy

Úkolem této kapitoly je přiblížit a stručně vysvětlit základní energetické parametry a pojmy týkající se problematiky spojené s provozem KJ.

Diagram zatížení je celková vyrobená elektrická energie E_T za dobu provozu T . Je dána velikostí plochy pod křivkou elektrického zatížení. Tento vztah platí i pro celkovou vyrobenou tepelnou energii $Q_{UV,T}$ za dobu provozu T . [3]

Elektrický výkon $P_E(t)$ je okamžitá hodnota, kterou je KJ schopna dodávat do zátěže. Hodnota elektrického výkonu je proměnlivá, nabývá minimální hodnoty $P_{E,min}$ až do maximální hodnoty $P_{E,max}$ (toto pásmo nazýváme regulační rozsah), aby byla KJ schopna pokrýt diagram zatížení. Maximální účinnosti výroby elektrické energie dosahujeme při jmenovitém výkonu $P_{E,n}$, kdy je provoz KJ nejehospodárnější. V praxi se můžeme často setkat s případem, kdy je hodnota jmenovitého výkonu shodná s maximální hodnotou výkonu ($P_{E,n} = P_{E,max}$). Tento jev se týká převážně mikrokogeneračních jednotek. [3]

Tepelný výkon $P_T(t)$ je okamžitá hodnota, kterou lze z KJ užitečně využít pro dodávku tepla. Množství možného odebíraného tepelného výkonu je závislé na množství vyráběného elektrického výkonu. Pokud KJ nemá odběr pro tepelnou energii při výrobě elektrické energie, je nutné zajistit odvod vyrobeného tepla mimo KJ do okolního prostředí. [3]

Modul teplárenské výroby σ je definovaný rovnicí (14) jako vzájemný poměr požadované spotřeby elektrické ku tepelné energii. To znamená, že pokud bude teplárenský modul roven jedné, vyrobí KJ stejně množství elektrické i tepelné energie. [3]

$$\sigma = \frac{P_E}{P_T} = \frac{P_{E,\%}}{P_{T,\%}} = \frac{E_{\%}}{Q_{UV,\%}} \quad (-) \quad (14)$$

Kde:

P_E - elektrický výkon (W),

P_T - tepelný výkon (W),

$P_{E,\%}$ - procentní zastoupení elektrického výkonu v celkovém výkonu KJ (%),

$P_{T,\%}$ - procentní zastoupení tepelného výkonu v celkovém výkonu KJ (%),

$E_{\%}$ - procentní zastoupení vyrobené elektrické energie v celkovém výkonu KJ (%),

$Q_{UV,\%}$ - procentní zastoupení využití tepelné energie v celkovém výkonu KJ (%).

Elektrická účinnost η_E^{KVET} je dle vztahu (15) účinnost transformace energie přivedené v PZ na elektrickou. [3]

$$\eta_E^{KVET} = \frac{E}{Q_{pal}} = \frac{E}{m_{pal} \cdot Q_i} = \frac{P_E}{M_{pal} \cdot Q_i} \quad (-) \quad (15)$$

Kde:

E - elektrická práce, energie (Ws),

Q_{pal} - energie paliva (J),

m_{pal} - hmotnost nebo objem paliva (kg, m³),

Q_i - energie v objemové nebo hmotnostní jednotce paliva (J/kg, J/m³),

M_{pal} - hmotnostní nebo objemový průtok paliva (kg/s, m³/s).

Tepelná účinnost η_T^{KVET} je účinnost transformace energie obsažené v přivedeném palivu na užítivatelnou tepelnou energii, viz rovnice (16). [3]

$$\eta_T^{KVET} = \frac{Q_{UV}}{Q_{pal}} = \frac{Q_{UV}}{m_{pal} \cdot Q_i} = \frac{P_T}{M_{pal} \cdot Q_i} \quad (-) \quad (16)$$

Kde:

Q_{UV} - energie dodávaného tepla (J)

Celková účinnost η_C^{KVET} je dle rovnice (17) definována jako, účinnost transformace energie obsažené v PZ na užitečnou energii. Je dána součtem dílčích účinností. [3]

$$\eta_C^{KVET} = \eta_E^{KVET} + \eta_T^{KVET} \quad (-) \quad (17)$$

Pohotovost ph určuje provozuschopnost KJ během určitého časové období T , viz vztah (18). Ve většině případů uvažujeme $T = 1 rok$. **Doba pohotovosti T_{ph}** je menší než T , protože na reálné KJ musí být prováděny pravidelné údržby a zároveň se KJ může porouchat, což nepříznivě snižuje dobu pohotovosti. [3]

$$ph = \frac{T_{ph}}{T} = \frac{T - (T_{OD,pln} + T_{OD,npln})}{T} \quad (-) \quad (18)$$

Kde:

$T_{OD,pln}$ - doba pro plánované odstávky KJ pro servisní účely (hod),

$T_{OD,npIn}$ - doba pro neplánované odstávky KJ způsobené poruchami (hod).

4 Rozdělení kogeneračních jednotek

4.1 Konstrukční provedení

KJ vyrobené v současné době, různými výrobci, se od sebe markantně neliší. Z různých vývojových variant řešení KJ našly uplatnění pouze tyto:

- **modulové uspořádání,**
- **stavebnicové uspořádání.**

Modulové uspořádání je charakteristické pro KJ menších výkonů. Zařízení jsou soustředěna do jednoho modulu, aby byla co nejbližší k sobě. KJ v modulárním provedení je možné snadno propojovat.

Výhody modulárního uspořádání:

- úspora investičních nákladů,
- snadné zapojení do kogeneračního systému (KS),
- dodávka KJ od jednoho dodavatele bez nutnosti kontroly možnosti napojení jednotlivých částí KJ.

Jednotlivé moduly musí splňovat předepsané normy pro provoz technologických celků. Instalace je rychlá a provoz je vysoce automatizovaný. Veškeré vývody a přívody mají své určité zapojení, které je nutné dodržet pro správný chod KJ, toto zapojení je uvedené v přípojovacích podmínkách od výrobce. Může se například jednat o vyústění přírub pro připojení otopného okruhu, plynu, spalin, ventilačního vzduchu, vyvedení elektrického výkonu, a zároveň parametry jednotlivých médií. KJ v modulovém uspořádání lze umístit do vnitřních i venkovních prostor. V případě realizace KJ mimo vnitřní prostory je dostupné i kontejnerové provedení. Některé KJ jsou opatřeny protihlukovými kryty, aby byla omezena jejich hlučnost.

Oproti modulovému uspořádání je **stavebnicové uspořádání** charakteristické pro vyšší výkony. Při volbě stavebnicového uspořádání je KJ zákazníkovi dodána rozložená na základní části, avšak může být složená z částí od více specializovaných výrobců. Instalace je provedena podle stavebního a technologického projektu, který respektuje podmínky KS. Jako jednou z výhod tohoto uspořádání se můžou jevit relativně nízké výrobní náklady dodavatele, jejichž odrazem by měla být i přiměřeně nižší cena jednotky. Bohužel toto snížení nákladů je relativní, protože pro zákazníka tím plynou další povinnosti. Zákazník musí vyřešit vypracování projektu, stavební úpravy, odvod odpadního tepla a další práce

spojené s realizací projektu. V ceně zpravidla nebývá započtený ani protihlukový kryt, protože ten se musí naprojektovat až podle konkrétního uspořádání KJ. [3]

4.2 Instalovaný výkon

Jedním z nejčastěji zohledňovaných parametrů je instalovaný elektrický výkon kogeneračních zařízení (KZ). Podle něhož by se daly KZ rozdělit do tří základních skupin.

Mikrokogenerace - Mikrokogenerační jednotky slouží převážně pro účely zásobování energií jednotlivých budov, popřípadě menších skupin budov. Pro tyto typy KJ se nejčastěji využívají primární jednotky (PJ) se spalovacími motory, mikroturbínami, Stirlingovými motory a s palivovými články (PC). Řadí se sem KJ s instalovaným elektrickým výkonem do 50 kW_e.

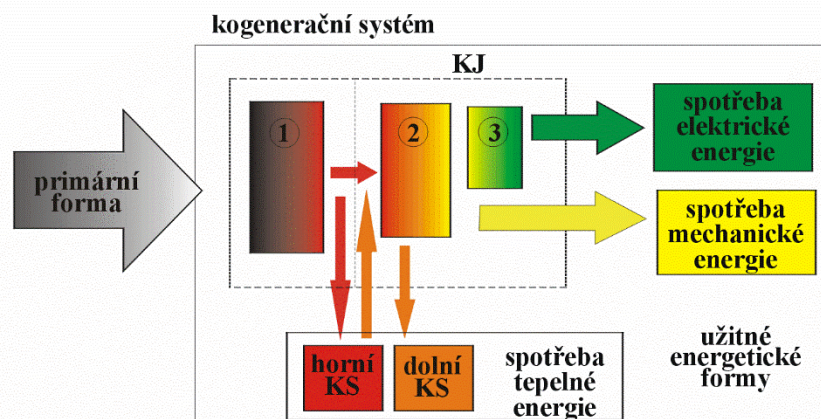
Malá kogenerace - KZ s instalovaným elektrickým výkonem od 50 kW_e do 1 000 kW_e nacházejí své uplatnění v průmyslových podnicích, ale také v systémech centrálního zásobování tepla (CZT). Pro malou kogeneraci jsou typické PJ se spalovacími motory.

Velká kogenerace - KZ s instalovaným elektrickým výkonem nad 1 MW_e. Využívají se v průmyslových aplikacích s tepelnými centrály nebo spalovnami. Zajišťují dodávku tepla do soustav CZT. I zde jsou používány PJ se spalovacími motory velkých výkonů a parní turbíny středního i velkého výkonu. [8]

4.3 Kogenerační systémy

Dalším ze zkoumaných parametrů je pořadí využívání produkovaných energií. Tyto kogenerační systémy (KS) se dělí do dvou skupin, viz Obrázek 10:

- **horní kogenerační systémy,**
- **dolní kogenerační systémy.**



Obrázek 10: Uspořádání kogeneračních systémů [3]

U **horních KS** probíhá nejdříve získávání tepelné energie v energetickém zařízení ① (Obrázek 10). Teplo o vysokých parametrech je dále zužitkováno pro technologické procesy úzce svázané s tepelnými procesy např. ocelářské nebo sklářské pece, pece na výrobu cementu. Poté je zbytkové teplo přivedeno do tepelného motoru ②, kde se získává mechanická práce, která se dále transformuje na elektrickou energii v generátoru ③. U tohoto typu KS jsou využívány vyšší teploty.

U **dolních KS** se nejdříve realizuje výroba elektrické energie. Užitečné teplo odvádíme z tepelného oběhu (TO) a využíváme ho pro tepelné účely. Tento typ KS je více využíván než horní KS, protože u dolních KS nedochází k odvádění tepla ještě před výrobou elektrické energie, což má za následek vyšší hodnotu tepla vstupujícího do tepelného motoru, a tudíž vyšší efektivitu výroby elektrické energie. [3]

4.4 Kogenerační technologie

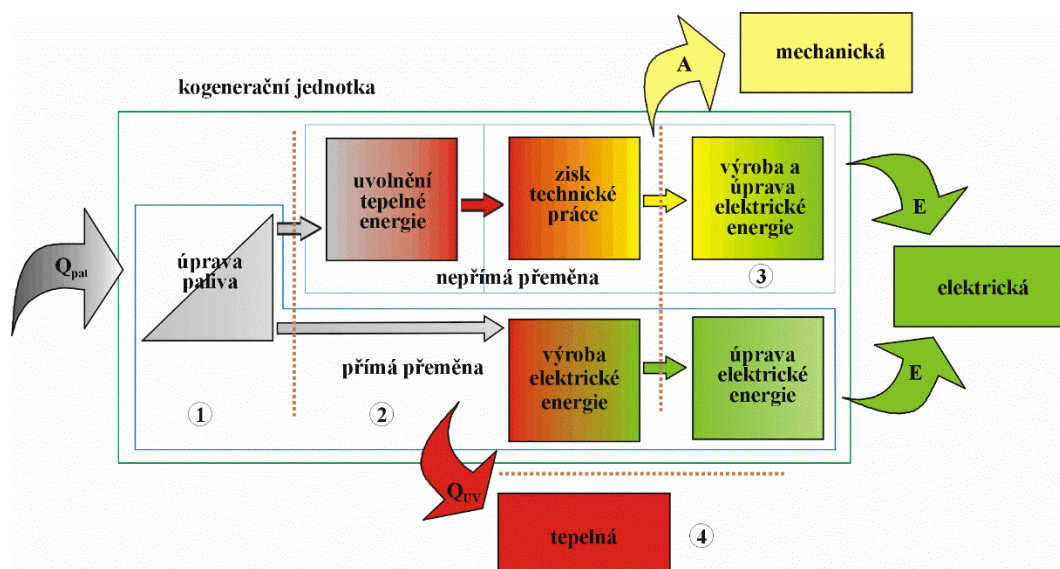
Existuje mnoho cest, jak přeměňovat energii obsaženou v PZ na elektrickou a tepelnou energii. Tyto způsoby se označují kogenerační technologie. Tyto technologie lze z fyzikálního hlediska rozdělit podle počtu transformací do dvou hlavních skupin, závislých na momentu, kdy se přeměna energie provádí:

- **nepřímý způsob,**
- **přímý způsob.**

Při **nepřímém způsobu** dochází k více energetickým transformacím než u **přímého způsobu**. V současnosti je nejvíce využíván způsob zahrnující tři transformace. Nejprve dochází k uvolnění tepelné energie obsažené v palivu. Dále se v tomto cyklu tepelná energie přeměňuje na technickou práci, kterou lze využít pro mechanický pohon spotřebičů.

V posledním kroku transformujeme mechanickou energii na elektrickou energii, u které lze upravovat výstupní hodnoty jejích parametrů.

U **přímého způsobu** se rovnou provádí přeměna energie paliva na elektrickou energii (viz Obrázek 11). Stejně jako u **nepřímého způsobu** (viz Obrázek 11) lze upravovat výstupní veličiny KJ. Můžeme například ovládat napětí, proud nebo frekvenci sítě. Používání KJ založených na přímé transformaci energie je jedna z perspektivních možností, která prochází neustálým vývojem. [3]



Obrázek 11: Transformace primární energie v kogeneračních jednotkách [3]

4.5 Primární jednotky kogeneračních soustrojí

Největší roli při posuzování využití KJ hraje primární jednotka, její volba pak významným způsobem předdefinovává volbu ostatních částí KJ. V PJ dochází k přeměně energie obsažené v palivu na ušlechtilější formu energie, jedná se zejména o elektrickou, popřípadě mechanickou energii. Spotřebitelé vyžadují formy energií v určité kvalitě, množství a v potřebném čase. Tyto parametry jsou závislé na použité technologii PJ. Pro jednotlivé způsoby transformace může být PJ buď tepelný motor, nebo PC. Tepelný motor je význačný pro kogenerační technologie využívající nepřímý způsob výroby energie. Oproti tomu je PC charakteristický pro přímý způsob výroby energie.

Pro výrobu a úpravu elektrické energie v PJ může být použit **elektrický generátor** nebo **elektrický kondicionér**.

Elektrický generátor transformuje mechanickou energii vyrobenou tepelným motor na elektrickou energii. Zde máme dvě možnosti, jak vyrábět elektrickou energii. První z nich je využití stejnosměrných generátorů, které mohou pracovat samostatně do elektrické zátěže

bez spolupráce s ES. Druhou možností je využití střídavého generátoru, při správném náfázování je zde možnost spolupracovat s ES. Pro jednotky s menším elektrickým výkonem se nejčastěji využívá asynchronní motor v generátorickém režimu. Mezi jeho benefity patří snadné náfázování na ES, nízká pořizovací cena a absence budicího zařízení. Naopak synchronní generátor nachází využití pro KJ velkých elektrických výkonů. Mezi jeho výhody patří možnost v případě nutnosti provozovat dodávku elektrické energie bez spolupráce ES (ostrovní režim), regulace činného a jalového výkonu v závislosti na stejnosměrném budicím proudu, což nám dovoluje řídit napětí a kmitočet v ES. Ovšem synchronní generátor je značně dražší než asynchronní generátor.

Elektrický kondicionér je jiné označení pro elektrický měnič ve střídačovém režimu. Jeho úkolem je provést změnu frekvence nebo transformace stejnosměrného napětí na střídavé. Kondicionér je zařízení skládající se z polovodičových prvků, nejčastěji se jedná o výkonové tranzistory nebo tyristory. [3], [8], [9]

5 Primární mikrokogerační jednotky s přímou transformací

5.1 Palivové články

Palivové články (PC) jsou galvanické články, které mohou transformovat energii uloženou v palivu přímo na elektrickou energii. Zdrojem energie je nejčastěji vodík, při exotermním procesu vodík spolu s kyslíkem mohou vyrábět elektrickou energii prostřednictvím elektrolytu za vzniku vody a vodní páry.

Na anodě pokryté vrstvou katalyzátoru probíhá štěpení vodíku na protony a elektrony. Kladně nabitě protony prochází elektrolytem k záporně nabitě katodě, pokryté katalyzátorem, a reagují tam s adsorbovanými kyslíkovými atomy na vodní páru. Mezitím záporně nabitě elektrony protékají elektricky vodivou anodou a uzavírají elektrický obvod, kterým protéká elektrický proud. [8]

Přímá přeměna energie obsažená v PZ pomocí palivových článků je v dnešní době intenzivně vyvíjena. PC disponují obrovským potenciálem, jelikož se jedná o ekologicky čisté, tiché a vysoce účinné PJ. Lze předpokládat, že v budoucnosti se PC stanou nejvyužívanější PJ pro KJ. Protože náklady na výzkum technologií rozvíjející PC jsou vysoké, provádějí se pouze ve specializovaných velkých světových firmách, které předpokládají jejich brzké komerční využití jako PJ, ale také ve spojení s elektromobilitou.

Přímé PJ (PC) je možno rozdělit podle:

- **použitého elektrolytu,**
- **typu iontové vodivosti,**
- **pracovní teploty.**

V současné době se PC rozdělují do pěti skupin, podle použitého typu **elektrolytu**:

- alkalické články (AFC's – alkaline fuel cells) pracují s elektrolytem tvořeným zředěným hydroxidem draselným (KOH),
- články s tuhými polymery (PEMFC's – proton exchange membrane fuel cells) používají jako elektrolyt tuhý organický polymer,
- články s kyselinou fosforečnou (PAFC's – phosphoric acid fuel cells) mají jako elektrolyt kyselinu fosforečnou (HPO_3),
- články s roztavenými uhličitany (MCFC's – molten carbonate fuel cells) používají jako elektrolyt roztavené uhličitany,

- články s tuhými oxidy (SOFC's – solid oxide fuel cells) mají elektrolyt tvořený z oxidů.

	$\downarrow \text{H}_2$	\xleftarrow{U} \xrightarrow{I}	$\downarrow \text{CO}_2^{\text{v}}$
AFC	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	OH^-	$1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$
PEMFC	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	H^+	$2\text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
PAFC	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	H^+	$2\text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
MCFC	$\text{H}_2 + \text{CO}_2^{\text{v}} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + 2\text{e}^-$	CO_2^{v}	$1/2\text{O}_2 + \text{CO} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_2^{\text{v}}$
SOFC	$2\text{O}^{\text{v}} + 2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	2O_2^{v}	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}_2^{\text{v}}$
	Anoda	Elektrolyt	Katoda

Obrázek 12: Typy palivových článků a jejich chemické reakce [3]

Elektronová vodivost může být:

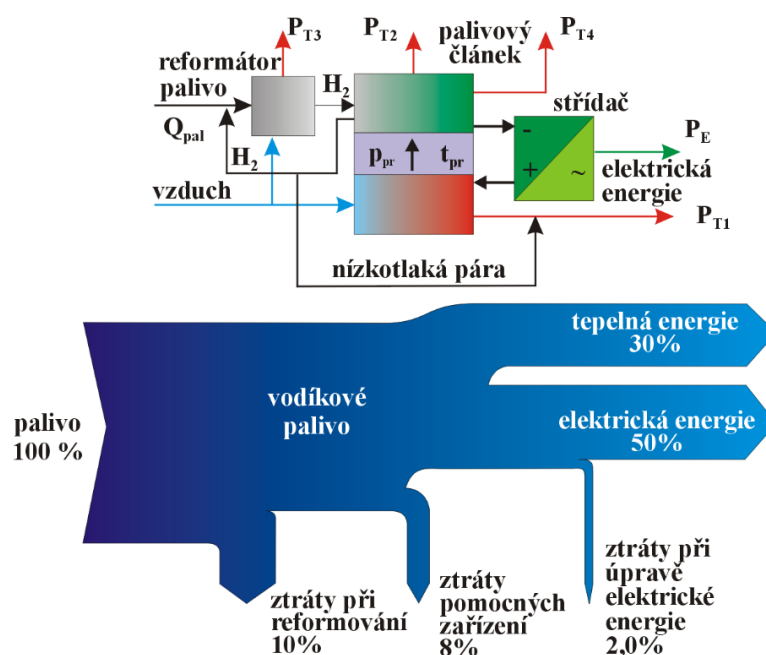
- **kationtová vodivost** - je zapříčiněná průchodem protonů přes elektrolyt a PC založené na protonové vodivosti vytváří vodu na katodě,
- **aniontová vodivost** - je způsobena průchodem aniontů elektrolytem, u těchto článků se vytváří voda na anodě.

Podle **pracovní teploty** rozdělujeme PC na:

- **studené** - PC pracují při teplotě do 200 °C,
- **teplé** - PC dosahují teploty až do 1 000 °C.

Jednotlivé typy PC se skládají ze tří výrobních částí:

- **palivový článek,**
- **palivový procesor,**
- **zařízení pro úpravu elektrického proudu (střídač)** – popsané v Kapitole 4.5. elektrický kondicionér.



Obrázek 13: Schéma KJ s přímou transformací (PC) [3]

Palivový článek je základním prvkem PJ, s přímou transformací, určující možnosti využití. Každý článek pracuje při optimální provozní teplotě udávané výrobcem, která je dána rovnováhou mezi iontovou vodivostí a stabilitou komponent PC.

Tabulka 1: Vlastnosti jednotlivých typů PC [3]

Článek	Typ	Elektrolyt	Pracovní teplota (°C)	Palivo	$\eta_{E, n}$ (-)	Stádium vývoje	Možnost použití
AFC	alkalický	30 % KOH	60-80	velmi čistý vodík	60	komerční výroba	kosmický průmysl
PEMFC	membránový	protonová membrána (polymer)	70-90	vodík, zemní plyn, metanol	40-50	pokusné projekty	motorová vozidla, KJ
PAFC	membránový	kyselina fosforečná	170-200	vodík, zemní plyn, speciální plyn	40-45	komerční příprava	KJ
MCFC	rozemleté karbonáty	alkalické uhličitany	650	vodík, zemní plyn, speciální plyn	55-60	komerční výroba	KJ, elektrárny
SOFC	oxido-keramický	ytrium stabilizované zirkoniem	900-1000	vodík, zemní plyn, speciální plyn	60-70	pokusné projekty	KJ, elektrárny

Palivový procesor (reformátor) je zařízení, které provádí změnu vstupního paliva na vodíkové palivo. KJ pracují s ekonomicky výhodnými a dostupnými palivy, která se speciálně připravují, případně vznikají jako vedlejší produkt jiné výrobní činnosti. Jelikož vodík není dostupný ve formě komerčního paliva, ale získáváme ho z jiných komerčních paliv, má za následek nižší účinnost využití PZ a zvýšení investičních i provozních nákladů.

[3]

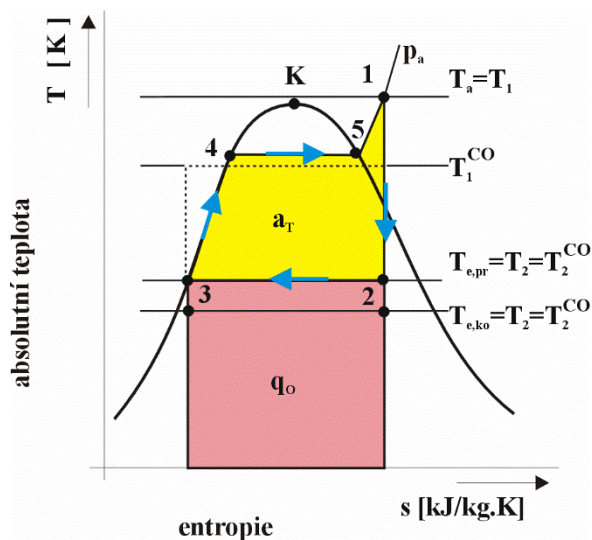
6 Primární mikrokogerační jednotky s vnějším spalováním

6.1 Parní turbíny

Jednou z nejstarších z PJ pro průmyslové KS jsou parní turbíny (PaT). Tepelný oběh, který probíhá v PaT, se nazývá Rankinův oběh (RC). K uvolnění tepelné energie dochází ve spalovací komoře parního generátoru nebo se přivádí z jiného TO, jedná se převážně o TO plynové turbíny. Tato energie se předává vodě o vysokém tlaku vytvořené napájecím čerpadlem, čímž dochází ke skupenské změně vody na páru v parním generátoru. Parametry vstupní admisní páry jsou závislé na teplotě. V případě nižších teplot se pára pohybuje v oblasti mokré páry. Naopak při použití vysokých teplot o ní hovoříme jako o přehřáté páře. Dále vyrobená pára expanduje v parní turbíně, čímž je získána užitečnatelná technická práce. Výstupní emisní pára dále pokračuje do kondenzátoru nebo do tepelného výměníku. Požadavky na kvalitu užitečně využitého tepla určují hodnotu tlaku, při kterém se provádí odběr tepla. S ohledem na místo odběru tepelné energie, pro dodávku tepla a množství páry podílející se na výrobě elektrické energie a tepla, se dají systémy s parními turbínami rozdělit na:

- **protitlaké,**
- **kondenzační.**

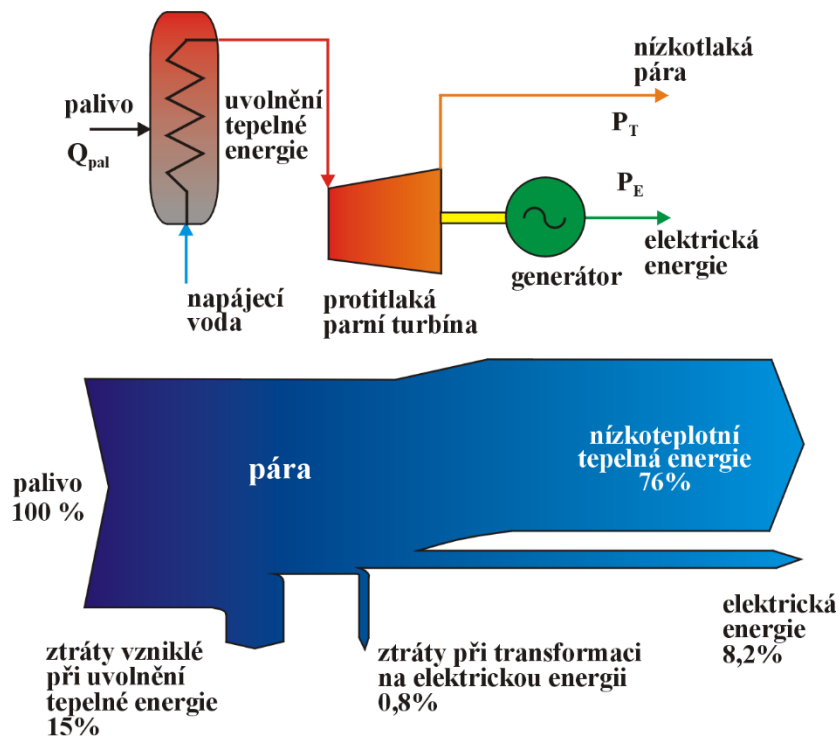
[3]



Obrázek 14: T-s diagram Rankinova cyklu [3]

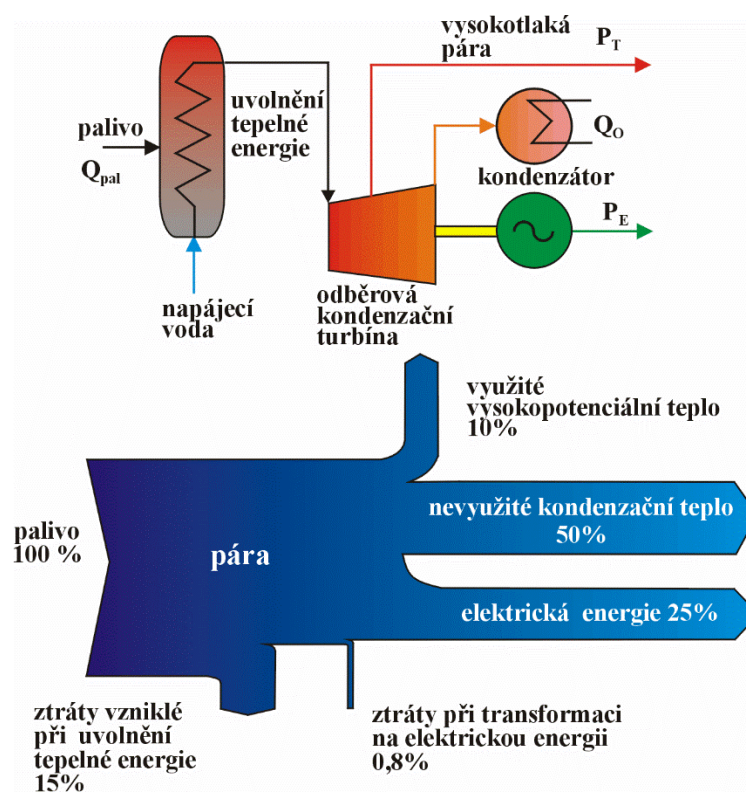
Protitlaká turbína (PrPaT) představuje jeden z nejvíce využívaných zdrojů KVET, tepelný cyklus pro PrPaT vychází z RC. PrPaT využívá pro dodávku tepla veškeré množství

páry použité pro zisk technické práce. Teplo, využívané pro topné účely, se odebrá na výstupu z turbíny. Parametry emisní páry jsou nízké. Čím vyšší jsou nároky na hodnotu tepelného odběru, tím vyšší musí být teplota emisní páry na výstupu z turbíny. Tento fakt snižuje účinnost transformace na elektrickou energii. [3], [10], [11]



Obrázek 15: Schéma KJ s protitlakou parní turbínou [3]

Pro **kondenzační turbínu** (KoPaT) je charakteristická převážně výroba elektrické energie. Emisní pára je z TO odebírána při teplotě okolí, díky čemuž je dosaženo velmi nízké hodnoty tlaku páry z turbíny. Dosahuje se tak maximálního zisku elektrické energie. Protože jsou parametry emisní páry nízké, odváděné teplo se již nedá užitečně využít. Největší nevýhodou KoPaT je vysoká ztráta vyrobeného tepla v kondenzátoru, za účelem dosažení maximální hodnoty technické práce, která je poté v generátoru transformována na elektrickou energii. [3], [12]



Obrázek 16: Schéma KJ s kondenzační turbínou [3]

6.2 Organický Rankinův cyklus

Organický Rankinův cyklus (ORC) má teoreticky TO shodný společně s RC pro PaT. Rozdílem je použití jiné pracovní látky, kterou jsou organické sloučeniny s vhodnými vlastnostmi. Organické látky můžeme používat pokud:

- dosahují nízkých teplot při vstupu do tepelného motoru,
- mají turbínu s nízkým výkonem.

Nízké teploty na vstupu do tepelného motoru, způsobují nízkou účinnost transformace PZ na technickou práci. Toto tvrzení vyplývá z výpočtu účinnosti ideálního Carnotova cyklu.

$$\eta_{cc} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (19)$$

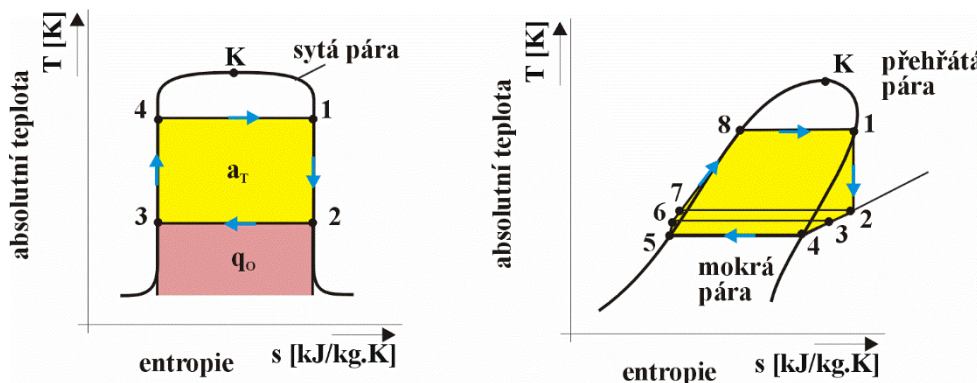
Kde:

η_{cc} - účinnost ideálního Carnotova cyklu (-),

T_2 - teplota výstupního média (K),

T_1 - teplota vstupního média (K).

Pro zvýšení účinnosti se do TO PaT přidávají přehříváky, abychom zvýšili vstupní teplotu páry a zároveň, aby se pára po expanzi v turbíně nedostávala do oblasti mokré páry, protože vznik mokré páry by vedl k nárůstu ztrát způsobených bržděním rychlostního proudu v dýzách (tryskách) turbíny.



Obrázek 17: a) TO s ideální b) TO s organickou pracovní látkou [3]

Pro **turbíny s nízkým výkonem** je nevýhodné používat vysoké rychlosti otáček, proto používáme generátory s větším počtem pólových dvojic, abychom byli schopni zachovat kmitočet ES 50 Hz při menších otáčkách generátoru, nebo je zde možnost využití frekvenčních měničů.

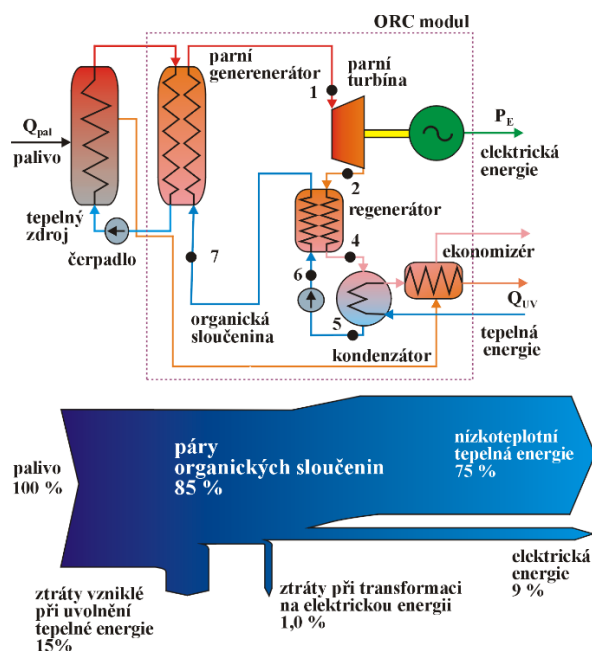
$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (20)$$

Kde:

n - otáčky generátoru (ot/min),

p - počet pólových dvojic (-).

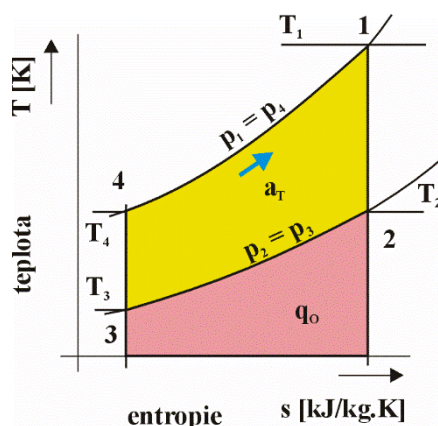
Dále není výhodné dělit expanzi v turbíně do tlakových oddílů, protože je to ekonomicky nákladné. Voda má malou molekulární hmotnost, čímž vznikají velké rychlosti, a je proto nutné využití vícenásobné expanze v turbíně a vysoké rychlosti otáček generátoru. Výhodou organických látek oproti vodě je, že po expanzi v tepelném motoru se tyto látky nedostávají do oblasti mokré páry, ale zůstávají stále v oblasti suché páry. Další výhodou je vysoká molová hmotnost, což dovoluje organickým látkám si zachovat kapalný stav při značně nižším tlaku, než vyžaduje voda. Tlak admisní páry ORC je přibližně 1 MPa. Nejčastěji používané organické látky jsou fluid uhlovodíky (isopetan, iso-oktan), toluen nebo silikonové látky. V minulosti se hojně využívaly látky používané v chladírenské technice (čpavek, freony). [3], [13]



Obrázek 18: Schéma KJ pracující na principu ORC [3]

6.3 Plynové turbíny

Nejrozšířenější PJ kogeneračních systémů jsou plynové spalovací turbíny. Tepelný oběh plynové turbíny se nazývá Braytonův cyklus. Pracovním médiem TO je vzduch, který je nejdříve stlačován kompresorem a poté je vháněn do spalovací komory. Ve spalovací komoře je do vzduchu přidáváno palivo, které je následně přivedeno ke vznícení. Vzduchu tím dodáváme tepelnou energii. V turbíně poté dochází tlakové expanzi, a tudíž i k zisku technicky uživatelné práce. Část technické práce je použita k pohonu kompresoru, který je společně s turbínou umístěn na společné hřídeli, viz Obrázek 20. Zbytek energie lze využít jako zdroj mechanické energie nebo ho lze transformovat na energii elektrickou. [3], [11]



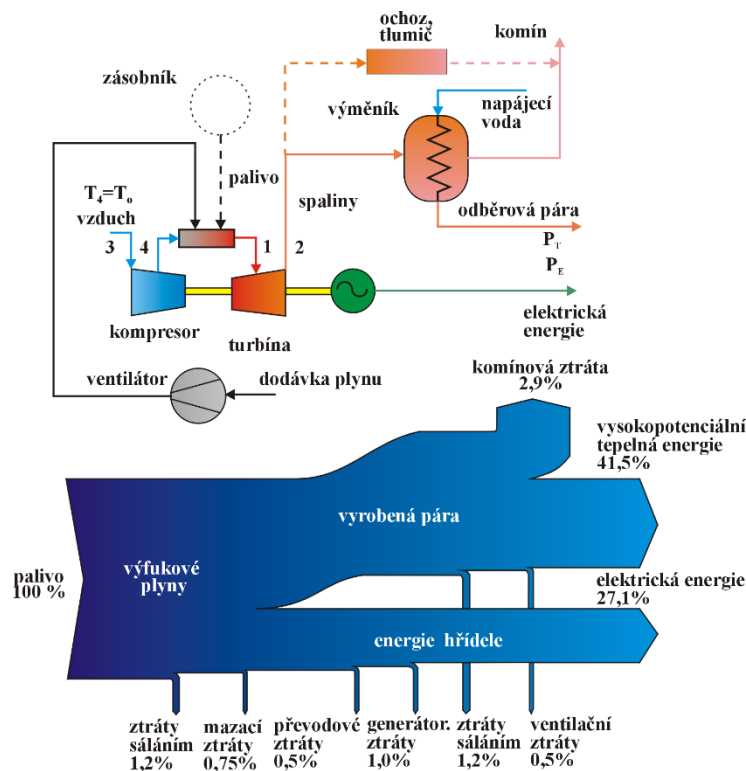
Obrázek 19: Braytonův cyklus [3]

Vstupní a výstupní teplota spalin, u plynových TO, je vysoká (450 - 500 °C), proto jsou zde kladeny větší nároky na použité materiály než u RC. Jak už bylo zmíněno v *Kapitole*

6.1., plynové turbíny lze využít v kombinovaných obězích s parními turbínami. Výstupní teplo plynového oběhu je předáno v kotli, parního TO, vodě, která se dostává do oblasti přehřáté páry, a díky tomu je možné její energii využít pro vykonání práce v parní turbíně. Nevýhodou, tohoto kombinovaného zapojení, je ekonomická náročnost, protože každý TO vyžaduje svůj vlastní generátor elektrické energie a s ním spojená zařízení. Dalšími možnostmi využití vysoko potenciálního tepla plynového oběhu jsou:

- **teplárenská výroba teplé vody,**
- **výroba středotlaké a nízkotlaké páry pomocí regeneračního parního generátoru pro účely vytápění,**
- **přímé spalování a sušení** – spaliny o vysoké teplotě je možno využít v technologických procesech umožňujících přímý kontakt se spaliny, čímž je dosaženo větší tepelné účinnosti, protože zde není třeba další tepelné médium.

[3], [10], [12]

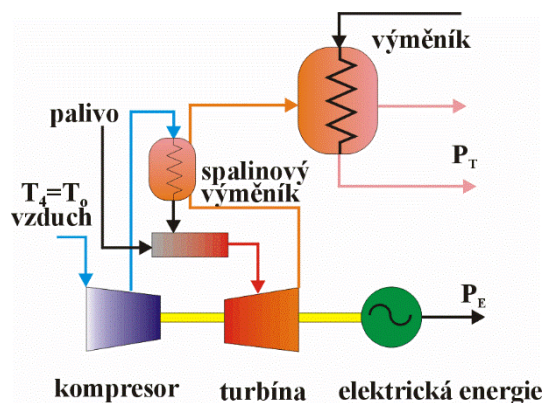


Obrázek 20: Schéma KJ se spalovací turbínou [3]

6.4 Mikroturbíny

Pro mikroturbíny (MT) jsou charakteristické vlastnosti jako malý výkon a vysoké otáčky turbíny. Jedná se o relativně novou technologii, která byla v nedávně době uvedena na trh, díky rozsáhlému výzkumu převážně v materiálové oblasti. MT, stejně jako plynová

turbína, pracuje na principu Braytonova cyklu. Dosahuje však většího tlaku média vstupujícího do turbíny a větších teplot, přičemž teplota vzduchu do kompresoru je co nejnižší. MT využívá olejová nebo vzduchová ložiska na hřídeli, čímž odpadá olejové hospodářství turbíny. MT dosahuje rychlosti otáček okolo 100 000 ot/min, oproti tomu běžná hodnota otáček synchronního generátoru (s jedním pólpárem) je 3 000 ot/min, proto MT používá vysokofrekvenční generátor s následnou úpravou parametrů elektrické energie. Pro provoz MT lze využít dvouhřídelové uspořádání, kdy na jedné hřídeli se nachází kompresor o vysokých otáčkách a na druhé je turbína s generátorem. Výhodou toho zapojení je možnost absence zařízení na úpravu elektrického proudu, ale zároveň musí být využito více rotujících částí. Pracující médium vstupuje do turbíny radiálním prouděním, oproti tomu do klasických vysoko výkonových turbín médium vstupuje axiálně. Díky tomu se dosahuje úspory místa, zmenšení ztrát sáláním a větší účinnosti zisku konečné formy energie. Při využití spalínového výměníku (viz Obrázek 21) pro předehřev spalovacího vzduchu se znatelně zvyšuje účinnost TO, ale snižuje se teplota využitelná pro teplárenské účely. [3], [13]

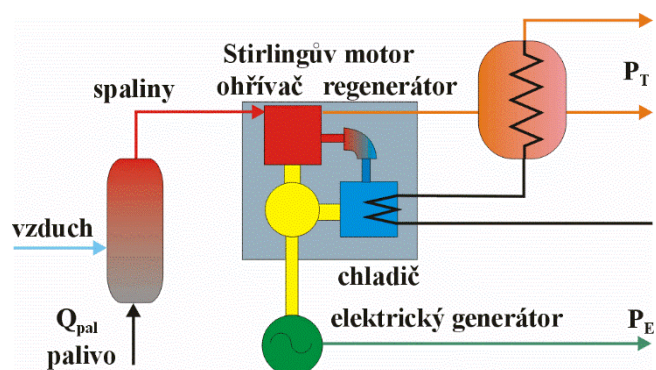


Obrázek 21: Schéma KJ s mikrotrubínou [3]

6.5 Stirlingův motor

Stirlingův motor (StM) je pístový motor s vnějším spalováním. Dochází v něm k uvolnění tepelné energie, která je následně předána pracovní látce TO. Nejčastější pracovní látkou je helium, vzduch, dusík nebo oxid uhličitý. Účinnost TO StM se blíží k účinnosti ideálního Carnotova cyklu, který z fyzikálního hlediska může dosáhnout největší termodynamické účinnosti. Oběh StM je založený na střídavém stlačování látky ve studeném válci a expanzi v horkém válci. Teplo je přiváděno do okruhu vnějšího zdroje přes tepelný výměník. Teplo, odvedené chladicí vodou ve studeném tepelném výměníku (chladič), je možné zužitkovat pro dodávku tepelné energie. Plyn se přenáší z horké zóny do chladiče a

nazpět pomocí regenerátoru. StM není založený na principu explozivního spalování, a proto nemusí mít zapalovací zařízení a s tím spojené aparáty.

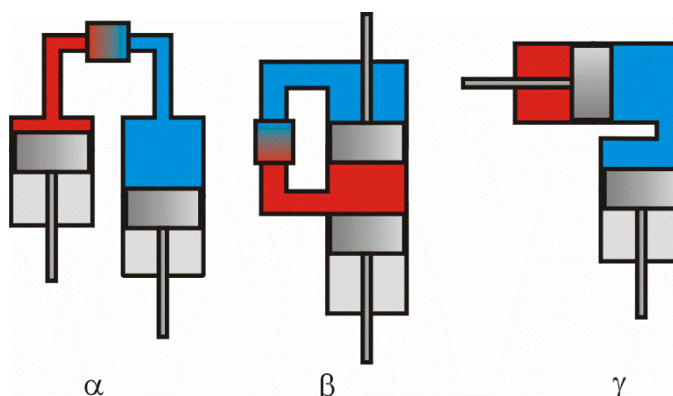


Obrázek 22: Schéma KJ se Stirlingovým motorem [3]

Z konstrukčního hlediska se vyrábějí typy StM:

- **alfa** - dva válce osově souměrné,
- **beta** - dva písty v jednom válci,
- **gama** - dva válce osově nesouměrné.

[3]



Obrázek 23: Typy Stirlingova motoru [3]

7 Primární mikrokogerační jednotky s vnitřním spalováním

7.1 Spalovací motory

Pro motory s vnitřním spalováním je charakteristická oxidace paliva uvnitř pracovního prostoru motoru, a s tím spojený vznik tepelné energie. Kogenerační jednotky využívající jako PJ spalovací motory mohou přeměňovat tepelnou energii na mechanickou energii s rychlými časovými konstantami, díky tomu je možné rychle měnit jejich zatížení. Tato skupina motorů je tvořena z velké části pístovými spalovacími motory (SM), které přímočarý pohyb pístů transformují pomocí klikové hřídele na rotační pohyb. Ve spalovací komoře, válcového tvaru, dochází k nasávání vzduchu spolu s palivem a rovněž je možné tuto směs paliva a vzduchu do komory válce vstříkovat. Tato směs je stlačena pístem a následně přivedena k samovznícení. Expanzí plynu se píst vrací do původní pozice, ve které byl tento cyklus započat. Přívod tepelné energie do oběhu není rovnoměrný, ale nárazový díky přerušovanému expanzi paliva. [3]

SM jsou velmi podobné klasickým naftovým motorům, které využívány v klasických dopravních prostředcích. Čistě naftové motory se v energetice používají pouze jako záložní nebo mobilní zdroje elektrické energie, tento fakt je zapříčiněn vysokou cenou paliva, u které i nadále očekáváme rostoucí trend.

Pro KVET jsou tyto motory modifikovány takovým způsobem, aby mohly spalovat levnější paliva, nežli je nafta nebo benzín. Jako PZ se využívají skládkové plyny a bioplyny.

Biomasa je přiváděná do hlavního fermentoru, kde se neustále promíchává a ohřívá přibližně na teplotu 40 °C, aby byl umožněn proces tvorby metanu. Dále se biomasa po 60 dnech přečerpává do dofermentoru, odkud je už možné odčerpávat bioplyn a využít ho jako PZ pro kogenerační jednotku. Vzniklé teplo se využívá v teplárenství a také k vlastní spotřebě tepla spojené s fermentací (kvašením) biomasy. [11]

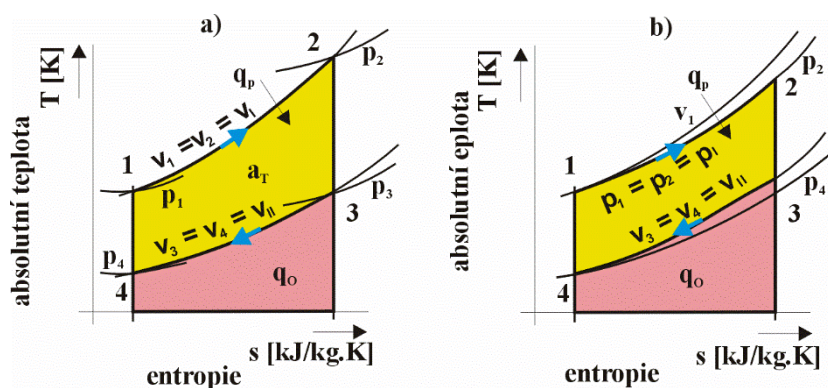
SM můžeme rozdělit do několika skupin podle:

- způsobu zapalování paliva,
- typu použitého paliva,
- počtu rovnoměrných pohybů použitých pro TO,
- počtu a způsobu řazení válců,
- způsobu úpravy spalovacího vzduchu,
- rychlosti otáčení hřídele.

Podle **způsobu zapalování paliva** dělíme SM na **zážehové** a **vznětové** motory.

Pro **zážehové motory** je význačné zapalování směsi paliva a vzduchu pomocí elektrické jiskry. Tepelný oběh příslušící zážehovému motoru nazýváme Ottův cyklus, při kterém teoreticky dochází k přívodu tepla při konstantním objemu. Zapálení směsi může probíhat **v otevřené spalovací komoře** nebo **s předzápalnou komorou**. **V otevřené spalovací komoře** probíhá zapálení přímo uvnitř spalovací komory. Tento způsob zažehnutí je vhodný pro všechny motory pracující blízko stechiometrického poměru vzduch/palivo (Ve spalínách není žádný vzduch ani palivo). Pro systém **s předzápalnou komorou** je charakteristické zapálení směsi v malé komoře v hlavě válce, kde se vznítí bohatá spalovací směs (přebytek paliva ve spalovací komoře). Tím vznikne náležitá zapalovací energie pro zapálení chudé směsi (přebytek vzduchu ve spalovací komoře) v hlavní spalovací komoře.

Na rozdíl od zážehových motorů, **vznětové motory** nepotřebují žádný subsystem, který je potřebný pro zapálení směsi. Po dosažení zápalných hodnot uvnitř spalovací komory, dochází k samovznícení směsi. Do stlačeného vzduchu se vstříkuje palivo. Tepelný oběh **vznětových** motorů se nazývá Dieselův, dochází při něm k přívodu tepla při konstantním tlaku.



Obrázek 24: Ottův a Dieselův cyklus [3]

Palivo používané pro SM může být kapalné, plynné nebo duální. Duální motory pracují s plynem jako hlavním palivem a kapalné palivo je použito pro vznícení směsi. Tepelný oběh je kombinací Ottova a Dieselova cyklu, ale má blíže k Dieselovu oběhu.

Podle **počtu pohybů** dělíme SM na **dvoutaktní** a **čtyřtaktní** motory. Počet taktů udává počet posuvů pístu během jednoho tepelného oběhu. Pro KJ se používají **čtyřtaktní** motory, které lépe splňují nároky na ochranu životního prostředí.

Průběh kroutícího momentu přenášeného na hřídel činí rovnoměrným užití **víceválcových motorů** a **uspořádání válců**.

Úprava spalovacího vzduchu je založena na možnosti stlačení vzduchu před vstupem do spalovací komory motoru. S větším množstvím vzduchu lze dosáhnout většího užitečného výkonu.

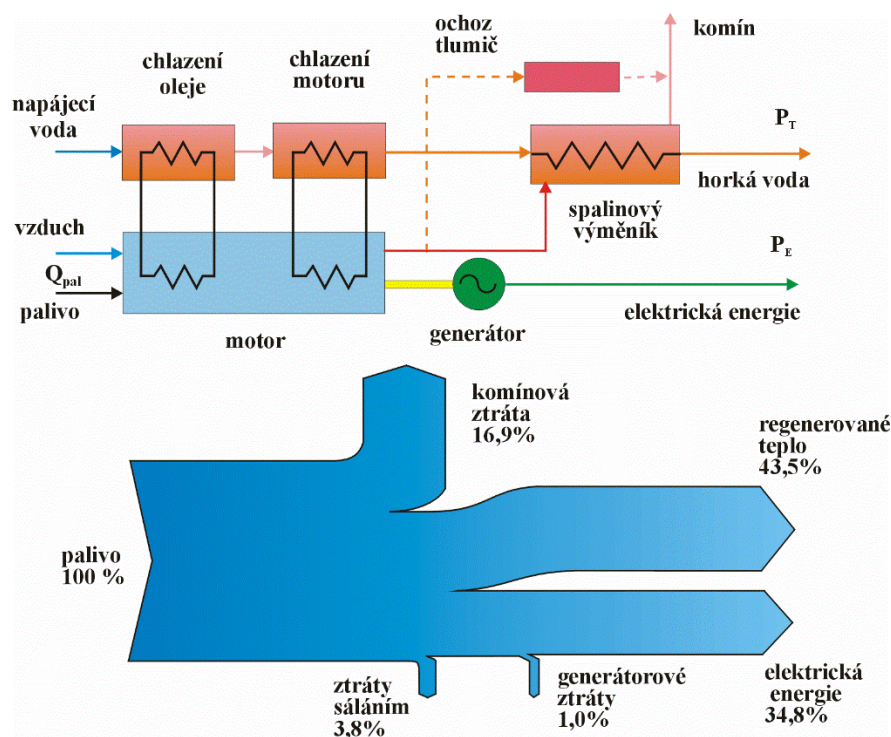
SM dělíme podle **rychlosti otáček** na:

- **pomaloběžné** - 55 - 275 ot/min,
- **se středními otáčkami** - 276 - 1000 ot/min,
- **rychloběžné** - 1001 - 3600 ot/min.

Teplota vzniklá při provozu KJ se SM je možné využít pro technologické procesy, chlazení či klimatizaci. Toto teplo lze odebírat hned z několika míst (viz Obrázek 25):

- **výfukových spalin,**
- **chladičí vody motoru,**
- **mazacího oleje motoru,**
- **chlazení kompresoru spalovacího vzduchu.**

Do spalínového výměníku se dostávají **spaliny** z motoru, které mají teplotu 450 - 650 °C. Přibližně 50 % odvedeného tepla připadá na **chlazení motoru**. **Chladičí voda** dosahuje teplot v rozmezí od 90 °C až 100 °C. Z celkového množství odváděného tepla je možné využít k regeneraci až 70 – 80 % tepla. [3]



Obrázek 25: Schéma KJ se spalovacím motorem [3]

8 Porovnání primárních jednotek pro mikrokogenerační jednotky

Tato část práce se bude zabývat výhodami, nevýhodami a vhodností primárních jednotek pro KVET, které byly již představeny v předchozích kapitolách. Existují i další technologie pro PJ, ale ty se používají jen zřídka, a proto nejsou obsažené v této práci.

8.1 Porovnání primárních jednotek

Tabulka 2: Porovnání PJ využívaných pro mikrokogenerační jednotky zohledňující jejich výhody a nevýhody [3]

	Výhody	Nevýhody
Palivové články	nízké emise a nízký hluk, modulární jednotky, vysoká účinnost, velké množství využitelných paliv, flexibilní energetický poměr, výroba nízkopotenciálového a vysokopotenciálového tepla v závislosti na typu použitého paliva.	vysoké náklady, doba životnosti, malá hustota energie, pomalý start, korozivní účinky při použití tekutých elektrolytů.
Parní turbíny	vysoká celková účinnost, možnost využití všech paliv, možnost změny modulu teplotní výroby během provozu, schopnost pokrýt požadavky tepelné spotřeby při různých teplotách, velké výkonové rozpětí, dlouhá životnost.	nízký teplotní modul, vysoké náklady, pomalý start.
Organický Rankinův cyklus	možnost využití nízkopotenciálového tepla, dlouhá životnost, malá citlivost na změnu zatížení.	náklady, nutnost pokrývání špičkového tepelného zatížení z jiného zdroje, pomalý start.

Tabulka 2: Pokračování Tabulky [3]

Plynové turbíny	vysoká spolehlivost, dodávka vysokopotenciálového tepla, konstantní vysoká rychlost otáčení blízka požadované frekvenci, řízení elektrického výkonu, vhodný energetický poměr, velké množství využitelných paliv, absence chladící vody, relativně nízké náklady, nízké emise.	malý počet výkonů ve výkonovém rozmezí, nižší mechanická účinnost oproti spalovacím motorům, spalování plynu je při vysokém tlaku, vysoká hlučnost, palivo musí být čisté a suché, výkon klesá s nárůstem teploty, dlouhá doba trvání oprav, pomalý start.
Mikroturbíny	vysoká spolehlivost, nízké náklady na údržbu, malé rozměry, malá hmotnost, přijatelná výška hluku, možnost spalování plynu z běžného zásobení, velké množství využitelných paliv, konkurence schopné náklady při větším výkonu, dodávka vysokopotenciálovéh tepla, přijatelná kvalita energií.	vysoké náklady
Stirlingův motor	velké zkušenosti s provozem v oblasti vysokých výkonů, menší mechanické ztráty, absence vnitřní spalovací komory, vysoká teoretická účinnost, vhodné pro masové využití, není potřebný dodatečný zdroj tepla, výroba elektrické energie není závislá na výrobě tepla, nízké emise, jednoduché řízení, mohou být stavěny jako modulární jednotky.	vysoké náklady, menší zkušenosti s provozem v oblasti nízkých výkonů, nízká mechanická účinnost současných motorů ve výkonovém rozmezí 350 – 800 W, lepší účinnost pro výkony nad 3 kW.

Tabulka 2: Pokračování Tabulky [3]

Spalovací motory	vysoká účinnost, nízké náklady, široký rozsah výkonů od 3 kW _E , velký regulační rozsah při vysoké účinnosti, použití v ostrovním režimu, rychlý start (15 s), velké množství využitelných paliv, opravy lze provádět na místě, nízké investiční náklady pro malé jednotky, mohou pracovat s nízkým tlakem plynu (menší než 0,1 MPa).	nutnost chlazení i bez tepelého odběru, vysoký modul teplotní výroby, v případě nepokrytí požadavků vyžaduje velké zálohování, velké hodnoty nízkofrekvenčního hluku, vysoké náklady spojené s údržbou.
------------------	--	---

8.2 Parametry primárních jednotek

Tabulka 3 obsahuje rozsahy výkonů pro běžné komerční využitelné jednotky. Obzvláště u parních a plynových turbín může jejich horní mez výkonů dosahovat vyšších hodnot v porovnání s hodnotami uvedenými v Tabulce 3.

Tabulka 3: Parametry PJ pro KVET [3]

Typ PJ	Elektrický výkon (MW)	Pohotovost (%)	Elektrická účinnost		Celková účinnost (%)	Modul teplotní výroby (-)
			P _{E,n}	0,5 P _{E,n}		
Palivové články	0,04-50	90-92	37-45	37-45	85-90	0,8-1
Parní turbína	0,5-100	90-95	14-35	12-28	60-85	0,1-0,5
ORC	0,3-1,8	90-94	15-20	15-20	65-85	0,1-0,3
Plynová turbína	0,1-100	90-95	25-40	18-30	60-80	0,5-0,8
Mikroturbína	0,025-0,25	90-95	30-40	20-30	65-85	0,6-0,8
Stirlingův motor	0,003-1,5	85-90	35-50	34-49	60-80	1,2-1,7
Vznětový motor	0,07-50	80-90	35-45	32-40	60-85	0,8-1,4
Zážehový motor	0,015-2	80-85	27-40	25-35	60-80	0,5-0,7

9 Potencionální oblasti využití mikrokogenerace

Rodinné domy a menší obytné budovy

Jedná se o objekty, které jsou celoročně závislé na dodávce tepelné a elektrické energie. Bohužel roční doba využití maximální potřeby vytápění je poměrně malá. Pro tyto objekty jsou vhodné KJ s poměrně nízkým jmenovitým elektrickým i tepelným výkonem. Často se v tomto sektoru využívají KJ s PJ využívající malé spalovací motory, Stirlingův motor, mikroturbíny a palivové články. Lidé vlastníci tyto KJ musí mít uzavřenou smlouvu s distributorem, aby byl zajištěn výhodný odkup elektrické energie. V současné době je poměrně malé zastoupení KZ u takovýchto spotřebitelů. Do budoucna však vzroste zájem o KZ, zejména kvůli potřebě soběstačnosti na energiích a kvůli neustále vzrůstající ceně za energii. [8]

Hotely a penziony

Pro hotely a penziony jsou KZ jedno z lukrativních řešení vlastní spotřeby elektrické a tepelné energie. Tyto objekty mají dostatečně velkou vlastní spotřebu elektřiny a tepla, která je rovnoměrně rozložena v průběhu dne podle diagramu zatížení. Spotřeba elektřiny a tepla zde může být využita například na provoz sauny, bazénu, prádelny, umělého osvětlení sportovišť, zabezpečovacích systémů a v letních měsících je zde možnost využití tepla na klimatizování vnitřních prostorů. Tato skutečnost umožňuje instalaci větších mikrokogeneračních jednotek s elektrickým výkonem 15 kW až 50 kW. Pro tyto účely jsou nejvhodnější KJ se spalovacími motory. [8]

Nemocnice

Poptávka, po spotřebě energií, je rovněž jako u hotelů a penzionů rovnoměrně rozprostřena během celého dne, týdne, měsíce i roku. Tato skutečnost umožňuje dlouhé roční doby využití jmenovitého výkonu zařízení. Veškerá vyrobená elektřina se dá zpravidla využít na pokrytí vlastní spotřeby. KZ v nemocnicích mohou zajišťovat velké množství teplé užitkové vody, ale zároveň mohou umožnit výrobu chladu, který je potřebný pro skladování medikamentů a klimatizování vnitřních prostorů. Pro nemocnice jsou vhodné plynové spalovací motory se synchronními generátory. Vhodnost plynového spalovacího motoru je zapříčiněna jeho rychlým startem. Synchronní generátory mají možnost kompenzace účinníku, tudíž jsou velice vhodné pro nouzové nebo ostrovní režimy provozu. [8]

Studentské koleje

Studentské koleje mají během školního roku poměrně vysokou spotřebu tepla a elektřiny. Bohužel účinnost využití KZ během letního měsíce výrazně klesá. Tento fakt je

způsoben letními prázdninami, kdy žáci nemusí navštěvovat školu. I zde jsou jako PJ vhodné spalovací motory. [8]

Úřady a školy

Faktorem limitujícím jmenovitý výkon možných KJ bývá u těchto objektů potřeba elektrické energie. V době otopné sezóny je spotřeba tepla značně větší než během letních měsíců, kdy nedochází k tak významné spotřebě teplé vody. Většina těchto budov není v provozu během víkendů a svátků, proto nám klesá účinnost využití KZ. Podmínky uplatnění mikrokogenerace u administrativních budov se mohou výrazně zlepšit, jestliže je během letního období potřebná chladicí kapacita pro klimatizaci. V těchto případech se opět nabízí využití KZ s možností trigenerace. Jako vhodné PJ jsou využívány spalovací motory. [8]

Obchody

Jedním z nejlepších míst pro aplikaci mikrokogeneračních jednotek jsou obchodní centra, ve kterých dochází ke značné spotřebě tepla použitého na vytápění nebo klimatizování vnitřních prostorů. Spotřeba elektřiny je zde také vysoká, i během noci se využívá velké množství elektřiny na osvětlení chodeb a výloh krámů. [8]

Sportovní střediska

Potřeba elektrické energie i tepla je vysoká během celého dne po většinu roku. Teplo se využívá pro ohřev vody v bazénu, pro sprchy, vytápění areálu a atd. Elektřina je zde potřebná pro osvětlení, pohon čerpadel a zabezpečovací systémy. Tato zařízení jsou velice vhodná pro aplikaci mikrokogenerace. [8]

Průmyslové podniky

Pro mikrokogeneraci jsou vhodné podmínky zejména v menších průmyslových závodech s vícesměnným provozem, které využívají teplo pro technologické procesy. Dimenzování výkonu KJ by mělo být takové, aby elektrická energie byla z co největší části spotřebována. Přitom musí být zcela zužitkován jejich tepelný výkon. KJ lze bez větších problémů zařadit paralelně k plynovým kotlům nebo sériově jako stupeň přehřevu otopné vody. V závodech s parním systémem dodávky tepla mohou být KJ využity pro přehřev napájecí vody parních kotlů nebo pro výrobu vodní páry. Pro průmyslové aplikace jsou vhodné plynové turbíny se synchronními generátory. [8]

10 WAVE120

10.1 Historie projektu WAVE

Jedná se o projekt, který vznikl v Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Projekt je zaměřený na decentralizovanou výrobu energií na bázi kogeneračních jednotek, pracující na principu ORC spalujících dřevní biomasu. Z analýz a výzkumu vyplynulo, že pokud se podaří vyrobit zařízení pro KVVET podobné plně automatickému kotli na biomasu, má tento projekt šanci uspět na trhu.

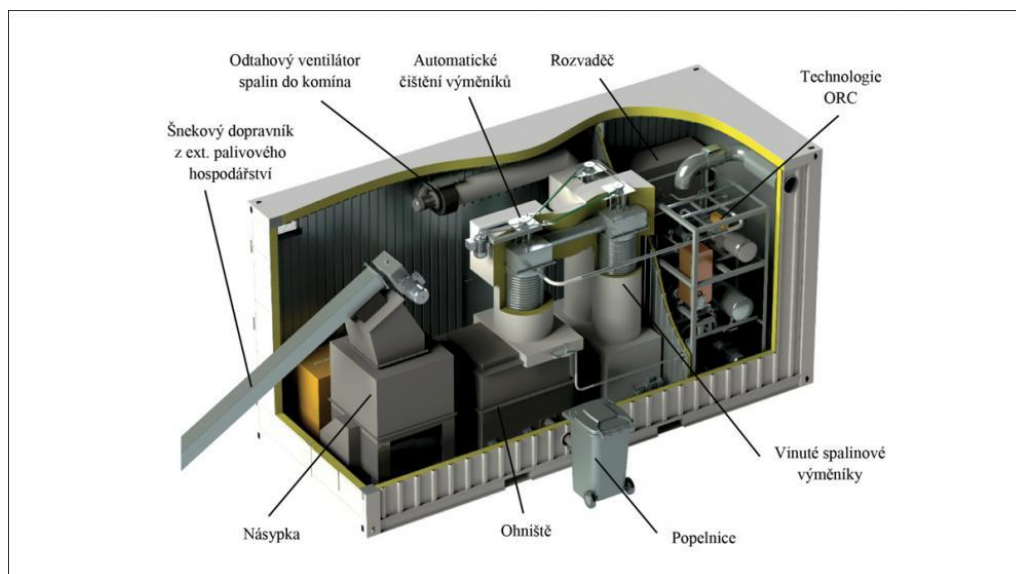
První generace dosahovala tepelného výkonu 20 kW a elektrického výkonu 0,5 kW. Toto zařízení bylo uvedeno do provozu v roce 2010 v laboratoři Ústavu energetiky Fakulty strojní, sloužilo především k detailnímu studiu konstrukce a provozu ORC, na jehož principu zařízení pracuje dodnes. Následující generace sloužily především k zúročení zkušeností a vyvinutí technologického základu pro další aplikace na cestě ke komercializaci.

Prvního komerčního využití se jednotka WAVE50 dočkala roku 2018 v Míkolajicích na Opavsku. Jednotka, v kontejnerovém provedení, společně s fotovoltaickou elektrárnou slouží pro pokrytí potřeby tepla a elektřiny obecního úřadu, hasičské zbrojnice a obchodů. Jednotka také dodává elektrickou energii do lokální mikrosítě. Nyní je toto zařízení úspěšně v provozu již čtvrtou topnou sezónou.

Současná jednotka WAVE120, viz Obrázek 26, disponuje instalovaným tepelným výkonem 120 kW a elektrickým výkonem 6,2 kW, přičemž elektrický výkon již zahrnuje pokrytí vlastní spotřeby elektřiny jednotky. WAVE120 splňuje veškeré emisní normy, atestaci na tlakovou bezpečnost, revizi elektrických zařízení a hlukové limity. Zvýšení výkonových parametrů oproti WAVE50 vedlo k výraznému zlepšení ekonomické efektivity. Doba návratnosti investičních nákladů je závislá na ceně elektřiny. Při započtení investičních dotací se doba návratnosti pohybuje v rádech let.

Mikrokogenerační jednotka WAVE120 nachází uplatnění v obcích pro vytápění úřadů, kulturních domech, penzionech, hotelech, na farmách. Ideálním místem pro provoz je pila, protože díky dostupnosti levného paliva, může jednotka přinést maximální využití a tím snížit dobu návratnosti.

Podle dostupných informací mělo proběhnout první komerční využití v roce 2021, což se bohužel nepovedlo zrealizovat kvůli omezení dotací a celkové ekonomické situaci. [14]



Obrázek 26: Kontejnerové provedení mikrokogenerační jednotky WAVE120 [14]

10.2 Technické parametry projektu WAVE120

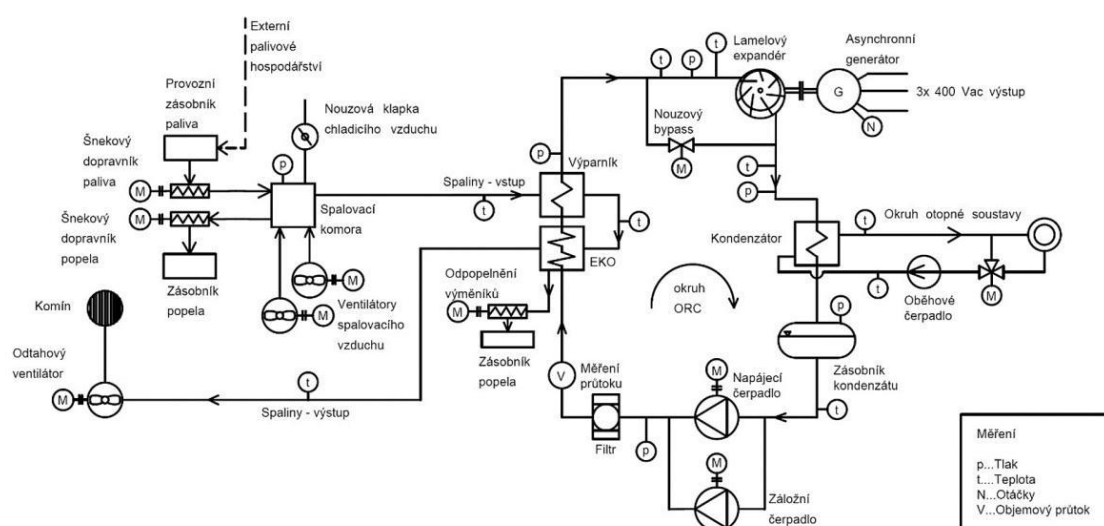
Pro zjednodušení si lze jednotku WAVE120 představit jako automatický kotel spalující biomasu. Ovšem oproti běžnému kotli dokáže mikrokogenerační jednotka WAVE120 produkovat teplo i elektřinu, čímž se výrazně liší od běžného kotle na biomasu. Běžný kotel na biomasu pro svůj provoz potřebuje přísun elektrické energie, ovšem WAVE120 dokáže plně pokrýt svou vlastní spotřebu a zároveň je možné přebytečnou energii dodávat do objektu, do bateriového uložení nebo je dokonce možné odprodávat energii do distribuční sítě. V porovnání s klasickou parní elektrárnou využívá jednotka WAVE120 pro svůj TO namísto vody vhodnější organické látky. WAVE120 využívá jako pracovní látku silikonový olej hexamethylendisiloxan, proto její TO označujeme jako ORC. Teplo po průchodu cyklem a dílčí transformaci na elektřinu je odvedeno do otopné vody, kterou lze následně využít pro topné účely nebo pro jiné technologické využití. Provoz WAVE120 je plně automatický, vše potřebné pro svůj provoz si jednotka WAVE120 dokáže zaopatřit sama. Jedná se zejména o dopravu paliva, diagnostiku a bezpečnostní systémy. Aby byla mikrokogenerační jednotka WAVE120 konkurence schopná, je vybavena zařízením komunikujícím s mobilní aplikací, díky které je možné na dálku odstavit nebo uvést jednotku do provozu. Technické schéma popisující jednotku WAVE120 je možné vidět na Obrázku 27 níže.

Dřevní štěpka je pomocí šnekového dopravníku dopravována do násypky uvnitř kotlové části kontejneru. Dále je přemístěna řízeným šnekovým dopravníkem do spalovací komory kotle. Spaliny odcházejí z ohniště do vinutých trubkových výměníků. Zde předávají

svou energii pracovní látce ORC. Spaliny zbavené energie následně jsou následně odsávány odtahovým ventilátorem do komína. Spalovací komora disponuje automatickým odpelňováním, dále jsou výměníky vybavené automatickým čištěním proti zanášení teplosměnných ploch tuhými znečišťujícími látkami.

Patentovaný lamelový expandér, kterým prochází odpařená pracovní látka, roztáčí generátor. Emisní pára dále kondenzuje v kondenzátoru. Pracovní látka v kapalném stavu proudí do zásobníku kondenzátoru, odkud je odčerpávána napájecím čerpadlem zpět do vinutého výměníku. Kondenzátor je chlazený vodou, která zajišťuje přísun tepla do otopné soustavy. Regulace tepla je realizována pomocí trojcestného ventilu a zajišťuje poptávku tepla v připojené budově nebo pro jiné technologické procesy.

Provoz WAVE120 je plně automatický. Zapálení paliva je uskutečněno pomocí elektrického zapalovače. [14]



Obrázek 27: Schéma mikrokogenerační jednotky WAVE120 [14]

Dle [14]: „*Od 1. 1. 2020 musejí nově na trh a do provozu uvedené kotle na tuhá paliva včetně kogeneračních jednotek plnit emisní a účinnostní limity dle Nařízení Komise 2015/1189 o Ekodesignu. Ověření splnění této povinnosti jednotkou Wave120 proběhlo autorizovaným měřením Strojírenským zkušebním ústavem 28. 10. 2020 na ČVUT UCEEB. Kogenerační jednotka Wave120 všechny limity Ekodesignu splnila a otevřela se jí tak cesta na celoevropský trh.*“

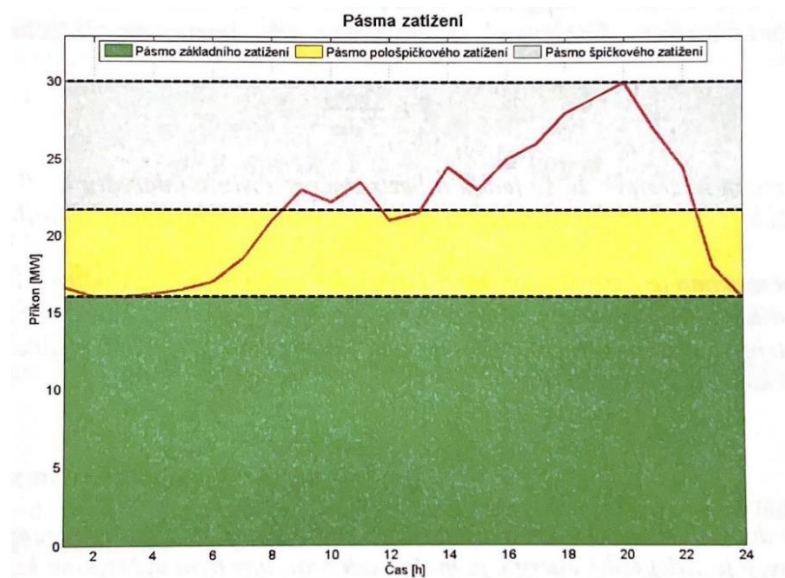
10.3 Investiční náklady

Základní pořizovací cena zařízení WAVE je 1,9 mil. Kč, což může být až desetkrát více než pořizovací cena běžného kotle na biomasu. Rozdíl v ceně je zapříčiněn tzv. technologickou částí, která je zodpovědná za výrobu elektrické energie a z toho vyplývající finanční úspory. Zatímco kotel spalující biomasu není v tomto kontextu možné považovat za investici, protože vynaložené náklady na pořízení nevedou k finančním příjmům. Výroba elektrické energie jednotkou WAVE vede k finančním úsporám, tudíž lze o jednotce uvažovat jako o dlouhodobé investici. Lze definitivně říct, že investiční náklady, jednotky WAVE, se během doby provozu zařízení vrátí. Cena kontejnerového provedení se pohybuje okolo 2,5 mil. Kč. Cena konfigurace jednotky WAVE pro ostrovní režim (režim bez spolupráce s distribuční soustavou) bude překračovat hranici 3 mil. Kč bez DPH. [14]

11 Ostatní decentralizované zdroje energie

V současné době dochází ke stále postupujícímu snižování zásob fosilních paliv a k růstu emisních povolenek, proto je snaha zvýšit podíl instalovaného elektrického výkonu v oblasti obnovitelných zdrojů energie (OZE). OZE se stejně jako KJ řadí do skupiny decentralizovaných zdrojů energie (popsané v Kapitole 1 Elektrizační soustava). Výhodou DCS je jejich blízkost k místu spotřeby, tudíž jsou značně omezeny ztráty spojené s přenosem a distribucí. Další předností oproti CS je potenciálně větší spolehlivost dodávky energie způsobená právě kratší vzdáleností mezi výrobou a spotřebou.

Pokrývání denního diagramu zatížení



Obrázek 28: Rozdělení denního diagramu na jednotlivá pásma [11]

Na Obrázku 28 je denní diagram zatížení (popsán v Kapitole 3.1 Diagram zatížení), kdy doba provozu $T = 24h$. Z hlediska denního diagramu zatížení můžeme diagram rozdělit do tří částí:

- pásmo základního zatížení (od 0 do P_{min}),
- pásmo pološpičkového zatížení (od P_{min} do P_{prum}),
- pásmo špičkového zatížení (od P_{prum} do P_{max}).

Elektrárny základního zatížení jsou takové, které mají pomalou nebo omezenou odezvu na potřebu po elektrickém výkonu v ES. Příkladem jsou tepelné, jaderné, fotovoltaické, větrné nebo průtočné vodní elektrárny.

Elektrárny pološpičkového zatížení pracují mezi oběma extrémů. Jedná se zejména o akumulární vodní nebo paroplynné elektrárny.

Elektrárny špičkové zatížení dosahují velmi rychlé odezvy na změnu požadovaného výkonu dodávaného do ES. Řadíme k nim plynové a přečerpávací vodní elektrárny. [11]

KJ lze provozovat ve všech pásmech denního diagramu zatížení v závislosti na zvolené PJ, která určuje rychlost odezvy KJ na změnu požadovaného výkonu. Ovšem nejvíce charakteristické je pro ně práce v základním a pološpičkovém pásmu zatížení. [11]

11.1 Fotovoltaické panely a tepelné kolektory

Energii slunečního záření můžeme transformovat do elektrické nebo tepelné energie. Jev, při kterém dochází k přeměně energie obsažené v slunečním záření na elektrickou energii, se nazývá fotoelektrický jev. Tento jev je možné pozorovat u polovodičových materiálů solárních článků. Dopadající sluneční záření se dostává do polovodičového prostředí, kde energie obsažená v slunečním paprsku vybudí elektrony valenční sféry, které se uvolní z molekuly. Záporné náboje (volné elektrony) putují k anodě, která je na povrchu solárního článku. Kladné náboje (díry) se pohybují ke katodě.

Tepelná energie slunečního záření se získává za pomoci kolektorů (trubkových nebo deskových). Větší účinnosti přeměny energie dosahujeme za pomoci reflektorů. Jedná se o zrcadla, která soustředí sluneční paprsky do jednoho místa, ve kterém je umístěný kolektor. Pro soustředění paprsků lze využít i Fresnellovu čočku.

Výrobu elektrické energie z energie slunečního záření lze realizovat přímou nebo nepřímou metodou.

Základem **přímé výroby** je fotoelektrický jev, kdy v solárním článku vzniká stejnosměrné elektrické napětí. Fotovoltaické panely se skládají z dílčích fotovoltaických článků. Mezi materiály používané pro výrobu panelů se řadí křemík, telurid kademnatý, pevný roztok mědi, india, galia a selen.

Fotovoltaické panely nacházejí své uplatnění v napájení malých elektrických spotřebičů, osamocené dopravního značení, silničních radarů, kapesní kalkulačky apod. Svého největšího potenciálu dosahují fotovoltaické panely ve vesmíru, protože plynný obal Země pohltí část sluneční energie, čímž snižuje účinnost transformace energie.

Největší česká fotovoltaická elektrárna (FVE) je elektrárna Vepřek o výkonu 35,1 MW. Elektrárna o rozloze 82,5 ha obsahuje 186 960 monokrystalických panelů. O řízení celého systému se stará technologie PLC Tecomat Foxtrot CP-1004. Česká republika kvůli

svým přírodním podmínkám není příliš vhodná pro tento způsob výroby elektrické energie velkých výkonů.

Mezi trendy FTE patří zejména umístování fotovoltaických panelů na střechy již existujících budov, vývoj polopropustných fotovoltaických panelů, které bude možné umístit místo oken budovy a v poslední řadě využívání hladiny vodních děl.

Nepřímá metoda výroby elektrické energie využívá pasivní solární kolektory zajišťující výrobu přehřáté vodní páry. Ta je následně přivedená do TO PaT, která pracuje na bázi RC. Místo parního kotle jsou využívány pasivní solární panely nebo sluneční pec, na kterou jsou soustředěny sluneční paprsky pomocí zrcadel.

V Austrálii již existuje pokusné zařízení, využívající nepřímou metodu, o výkonu 50 kW. Toto zařízení využívá StM pro pohon elektrického generátoru.

Jak už bylo zmíněno na začátku této kapitoly, sluneční energie se dá využít i pro výrobu tepla. Sluneční záření dopadající na kolektor ohřívá vodu v primárním TO, a ta následně putuje do tepelného výměníku, kde dochází k ohřevu sekundární pracovní látky. Tímto způsobem lze jednoduše zužítkovat sluneční energie. [11]

11.2 Větrné elektrárny

Větrné elektrárny (VTE) přeměňují kinetickou energii vzduchu na energii elektrickou. V současné době se k výrobě elektřiny využívá energie nízkých a přízemních vzdušných proudů. Ve stádiu výzkumu se nachází využívání energie vysokých proudů vzduchu, cca 500 m nad zemským povrchem.

Konstrukce větrné elektrárny

VTE se skládá ze čtyř základních částí:

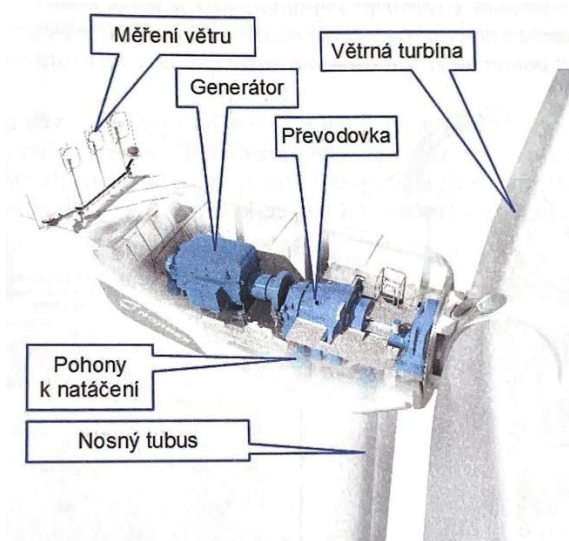
- větrná turbína - provádí přeměnu kinetické energie větru na mechanickou energii přiváděnou na hřídel,
- elektrická část - mění mechanickou energii v elektrickou,
- zařízení měření a regulace - zajišťuje automatický chod celé elektrárny,
- stavební část.

Podle orientace osy otáčení VTE turbíny dělíme na dva základní typy:

- větrné turbíny s vodorovnou osou otáčení,
- větrné turbíny se svislou osou otáčení.

Větrné turbíny s vodorovnou osou otáčení mají velmi unifikovanou konstrukci. Stožár je většinou tubusový, ale můžeme se setkat i s příhradovou konstrukcí. Na stožáru je umístěná gondola s větrnou turbínou. Otáčivá gondola obsahuje elektrický generátor s pohonem zajišťujícím otáčení gondoly. Spojení elektrického generátoru a větrné turbíny může být realizováno pomocí převodovky nebo bez převodovky. Na Obrázku 29 je typický představitel, jedná se o VTE o výkonu 2,5 MW od firmy Nordex.

Největších instalovaných výkonů v současnosti dosahují prototypy s výkonem přes 5 MW. Existuje reálný předpoklad, že nemůžeme dosáhnout větších výkonů, než 10 MW. Tento předpoklad je spojený s problémy při dopravě VTE na své místo. Lopatka, takového instalovaného výkonu, dosahuje délky 80 m, což vede k problémům při transportu na místo instalace. Dalším problémem je gondola umístěná ve výšce 100 m, kterou není možné umístit pomocí dostupných vysokozdvíhacích jeřábů na své místo. Poslední problém je technologického rázu, protože na koncích vrtule jsou vysoké obvodové rychlosti způsobující velké odstředivé síly. [11]

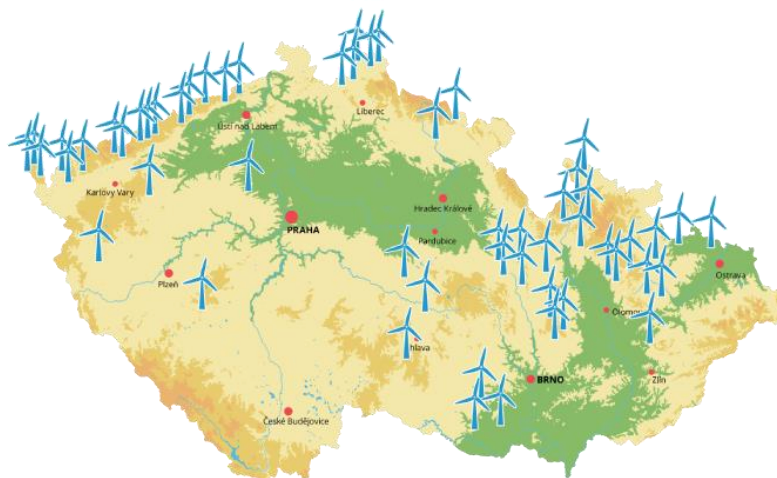


Obrázek 29: Vnitřní uspořádání gondoly [11]

Dle [11]: „Například v případě elektrárny o výkonu 5 MW je délka lopatky cca 60 m a při provozu se otáčí 6 až 50 otáčkami za minutu. Obvodová rychlost konce listu je potom od 21,6 do 180 km.h⁻¹. Při maximální rychlosti potom na každý kilogram materiálu na konci listu vrtule působí odstředivá síla cca 42 N.“

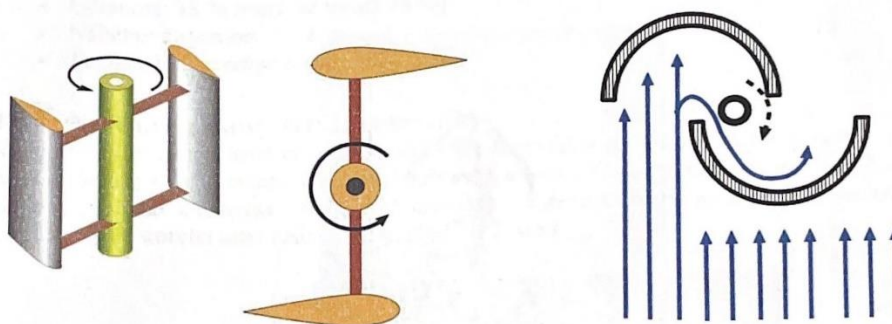
Zvyšování výkonů VTE je řešeno výstavbou větrných farem, kde je na jednom místě instalováno více VTE. V České republice nejsou moc vhodné podmínky pro VTE, většina z nich je instalovaná do oblasti hor (viz Obrázek 30). Největší stroje dosahují výkonu okolo 2 MW.

Při zvyšování účinnosti se mění i vzhled větrných turbín. Dříve se vyráběly mnoholistové rotory, ale trendem současnosti je výroba třílistových rotorů.



Obrázek 30: Umístění VTE v ČR k roku 2021 [15]

Větrné turbíny se svislou osou otáčení nejsou příliš obvyklé v Evropě. Jejich velkým benefitem je, že se VTE nemusí natáčet při změně směru větru. Podle typu dělíme turbíny se svislou osou otáčení na vztahové (Obrázek 31 a)) a na odporové (Obrázek 31 b)).



Obrázek 31: Větrné turbíny se svislou osou otáčení: a) Darrieus b) Savonius [11]

Větrná turbína typu Savonius může být konstrukčně řešena s použitím dvou nebo třech lopatek v jednom kruhu. Oba tyto typy mohou být kombinovány při tvorbě VTE, protože Darrieusova turbína potřebuje pomocnou sílu pro rozběh, kterou je schopna poskytnout Savoniusova turbína. [11]

Účinnosti větrných turbín

Tabulka 4: Přehled účinností turbín VTE [11]

	Počet listů rotoru (-)	Účinnost (%)	Náběhová rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Poznámka
Mnoholopátkový rotor	až 150	20-43	0,16	Výkon stoupá s 3. mocninou rychlosti větru
Vrtule	1–4	45-48	3–6	Nejpoužívanější typ
Savoniův rotor	2	20-23	2–3	Obvodová rychlost rotoru je vyšší než rychlost větru, náběh Darrierova rotoru
Darrierův rotor	2–3	38-48	5–8	Vyžaduje pomoc při náběhu

11.3 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny (VE) využívají přeměny kinetické a potenciální energie, ve vodní turbíně, která je na společné hřídeli společně s hydroalternátorem, ve kterém dochází k výrobě elektrické energie. Nejpoužívanějšími typy vodních turbín jsou:

- Bánkiho turbína,
- Francisova turbína,
- Kaplanova turbína,
- Peltonova turbína,
- přímoproudá turbína.

Bánkiho turbína je průtočná vodní turbína, vhodná především pro malé vodní toky s kolísavým průtokem. Její účinnost dosahuje hodnoty cca 80 %. Regulace průtoku (výkonu) je prováděna naklápěním klapky ve tvaru kapky na vstupu do turbíny.

Francisova turbína je přetlaková turbína s účinností 90 %. Regulace výkonu je realizována naklápěním statorových rozváděcích lopatek. Voda se přivádí do turbíny spirálovitým přivaděčem, jehož průřez se zmenšuje. Po obvodu celého přivaděče jsou rozváděcí lopatky, kterými voda prochází na kolo Francisovy turbíny.

Kaplanova turbína vzhledově připomíná lodní šroub. Výkon lze regulovat pomocí rozváděčových lopatek, ale i natačením rotorových lopatek, proto Kaplanova turbína nachází uplatnění ve velké řadě aplikací. Dosahuje účinnosti 80 % až 95 %.

Peltonova turbína je určena pro velmi vysoké spády vody. Turbína může mít jednu nebo více trysek. Regulace výkonu je realizována uzavíráním proudu vody do trysky. Tato turbína dosahuje účinnosti 90 % až 95 %.

Přímoproudá vodní turbína vychází z konstrukce Kaplanovy turbíny. V anglické literatuře bývá tato turbína označována jako „bulb turbine“, protože elektrický generátor se nachází v gondole tvaru hrušky uprostřed proudu.

VE dělíme na:

- sladkovodní,
- mořské.



Obrázek 32: VE ES ČR – nad 1 MWE součtového instalovaného výkonu z roku 2006 [16]

Sladkovodní elektrárna je rozsáhlý komplex staveb ovlivňující krajinu a její okolí. Z toho plyne, že výroba elektrické energie není jedinou funkcí VE. Hlavní částí je hráz zadržující vodu, díky čemuž dochází k vzednutí hladiny. Vzniklá vodní plocha může sloužit pro rekreační účely, jako zdroj pitné vody nebo jako protipovodňové opatření. Podle vzednutí hladiny rozdělujeme zařízení na:

- průtočné vodní elektrárny,
- derivační vodní elektrárny,
- akumulační vodní elektrárny,
- přečerpávací vodní elektrárny.

Jelikož je Česká republika prameništěm řek tří úmoří, nenachází se na jejím území velké vodní toky, a kvůli tomu máme omezené možnosti využívání vodní energie.

Průtočné VE se nachází obvykle na vodním toku v místě jezu. Úkolem jezu nebo hráze je zajistit menší vzdutí vodní hladiny, přičemž neplní žádnou akumulaci funkci. Spád vody bývá malý. Před vstupem do turbíny voda prochází skrz soustavu česel, které zabrání vstupu nečistot a ryb do prostoru vtokového kanálu. Vtokovým kanálem je voda přivedena k vodní turbíně a následně do výpusti elektrárny. Velikost dodávaného výkonu je závislá na momentálních průtočných poměrech toku, na kterém je daná elektrárna vybudována. VE průtočná má regulační schopnosti pouze snižovat výkon, proto je zařazena do skupiny základního zatížení.

Derivační VE, známá také jako náhonová, využívá potenciální energie vody, která je odvozena od průtočné VE. Pokud má vodní tok nízký spád, je možné vytvořit vhodně umístěné koryto (náhon) dopravující část toku vody na určené místo. Tento náhon má menší sklon než původní řečiště. V místě opětovného připojení se získá vyšší spád. Takové místo je vhodné pro instalaci mikro nebo mini VE. Nejnáročnější je výstavba náhonu, proto se využívá již stávajících náhonů starých vodních mlýnů. Opět se jedná o elektrárnu pracující v základním pásu zatížení. Tento typ elektráren obvykle pouze zlepšuje energetickou bilanci odběratele.

Akumulační VE je součástí velkého vodního díla. Pro svoji existenci tato elektrárna potřebuje přehradu, která vytvoří velkou zásobárnu vody. Regulační vlastnosti této VE jsou rychlé, a proto se hodí pro pokrývání pološpiček a špiček denního diagramu zatížení. Podmínkou provozu je zachování permanentního minimálního průtoku, aby řečiště pod VE nevyschlo. Další podmínkou je zachování určité minimální výšky hladiny nádrže. V České republice můžeme tyto VE nalézt na řece Vltavě, Moravě a Dyji. Největší akumulaci VE v České republice je elektrárna Orlík s instalovaným výkonem 364 MW. Největší akumulaci VE na světě je elektrárna v Číně s názvem Tři soutěsky s výkonem 20,3 GW.

Přečerpávací VE slouží pro pokrývání špiček denního diagramu zatížení. I tato elektrárna je i tato elektrárna budována na vodním toku a skládá se ze dvou nádrží, které se nachází v různé nadmořské výšce. Přečerpávací VE umí pracovat ve dvou chodech. V prvním voda teče z horní nádrže přes vodní turbínu do spodní nádrže a VE generuje elektřinu. V druhém režimu je naopak voda přečerpána ze spodní nádrže do horní nádrže, když je v ES nadbytek elektrické energie. V případě Francisovy turbíny je možné využití reverzního chodu turbíny pro čerpadlový režim nebo může být konstruována turbína i čerpadlo zvlášť. Tato VE pracuje v pásu špičkového zatížení, protože je schopna pracovat

s velmi rychlou odezvou na požadovaný výkon. Zároveň tato elektrárna může zachovávat výkonovou bilanci v ES při přečerpávání (akumulaci) vody do horní nádrže. V České republice můžeme nalézt dvě velké přečerpávací VE:

- Dlouhé stráně - s instalovaným výkonem 2 x 325 MW,
- Dalešice - s instalovaným výkonem 4 x 120 MW.

Světové přečerpávací VE:

- Bad country (USA) - instalovaný výkon 3 003 MW,
- Huizhou (Čína) - instalovaný výkon 2 448 MW,
- Guangdong (Čína) - instalovaný výkon 2,4 GW.

Mořské vodní elektrárny pracují na principu využívání kinetické energie přílivu a vln. Dělíme je do dvou základních skupin:

- přílivové vodní elektrárny,
- vlnové vodní elektrárny.

Přílivové VE využívají energie přílivu. Přílivové VE jsou stavěny jako přehradní nebo proudové. Přehradní konstrukce využívá členitosti pobřeží. Jsou zde zabudovány přímoproudé vodní turbíny, které při odlivu a přílivu generují elektrickou energii. Největší přehradní přílivové VE ve světě jsou:

- Sihwa Lake (Jižní Korea) - instalovaný výkon 254 MW,
- Rance (Francie) - instalovaný výkon 240 MW,
- Annapolis (Kanada) - instalovaný výkon 20 MW.



Obrázek 33: Proudová přílivová VE [11]

Proudové přílivové VE mají také přímoproudé vodní turbíny. Jsou umístěny ve směru přílivu. Existují dvě varianty tohoto provedení – plovoucí nebo vzhledově podobné VTE, které jsou postavené na dně moře.

Vlnové VE využívají energie mořských vln, tato zařízení jsou ve stádiu prototypů. Využívá se proměnné výšky hladiny moře převádějící se na přímočarý pohyb, který je následně transformován na elektrickou energii. [11]

11.4 Srovnávací tabulka KJ s OZE

Aby mohlo být porovnání OZE s KJ relevantní, museli bychom porovnávat zařízení se stejnými instalovanými výkony, proto je v této práci uvedeno porovnání OZE a KJ na základě obecné účinnosti transformace na elektrickou energii.

Tabulka 5: Porovnání KJ a OZE na základě účinnosti

	Účinnost (%)
Palivové články	85-90
Parní turbína	60-85
ORC	65-85
Plynová turbína	60-80
Mikroturbína	65-85
Stirlingův motor	60-80
Vznětový motor	60-85
Zážehový motor	60-80
FTV	20-25
Tepelné Kolektory	40-60
VTE	20-48
VE	80-90

KJ spalující fosilní paliva oproti OZE, nevyužívajících kogenerační technologii, mohou, při permanentnímu přísunu PZ, vyrábět energii nepřetržitě. Oproti tomu výroba energií z OZE je silně závislá na počasí, které zatím nedokážeme ovlivnit. Tento fakt má za následek, že OZE nedosahají takových regulačních vlastností jako KJ. Pro vylepšení regulačních vlastností OZE by OZE musely být vybaveny správně naddimenzovanou akumulací zejména elektrické energie kompenzující výkonové výkyvy OZE. Bohužel akumulace v podobě bateriového článku, který by dokázal dorovnávat výkyvy elektřiny, by byla extrémně drahá, a proto by si jí nemohl dovolit každý spotřebitel, což by mělo za následek zhoršení regulačních vlastností OZE oproti KJ a OZE s akumulací elektřiny.

12 Potenciál využití mikrokogeneračních jednotek v ČR

Tato část práce se zabývá současným a budoucím využitím mikrokogeneračních jednotek. Veškeré mé výsledky vychází z volně dostupných informací, nemusejí tedy přesně reflektovat reálný budoucí vývoj mikrokogenerace, protože se jedná o mé subjektivní dojmy založené na mnou zjištěných datech.

12.1 Současné využití mikrokogeneračních jednotek

Mezi roky 2010 a 2018 došlo k zvýšení výroby elektřiny v rámci KVET o 50 %, což odpovídá nárůstu o více jak 650 GWh. Dále bylo v rámci KVET vyrobeno o 20 % více tepla, což odpovídá nárůstu o 1 840 TJ. Tento růst je zapříčiněn využíváním motorové malé a střední kogenerace požívající jako PZ v naprosté většině zemní plyn. V letech 2010 až 2018 bylo instalováno 188 MW_E celkem u 351 nových KJ. V lednu 2019 disponovalo licencí pro výrobu elektřiny, na bázi kogenerace na zemní plyn, celkem 651 provozoven s instalovaným výkonem 298 MW_E. To vše souvisí s pokračující podporou KVET ze strany státu, která by měla být zachována i v následujících letech. [17]

Současná podpora elektřiny z vysokoúčinné KVET byla určena pro všechna zařízení KVET jako tzv. palivově neutrální. Forma podpory byla stanovena ročním zeleným bonusem a zároveň nebyla stanovena doba podpory.

Podpora elektřiny pro zachování výroby elektřiny v provozu bude platit pokud:

- provozní náklady budou vyšší než tržní cena elektřiny a tepla z vysokoúčinné KVET,
- cena biomasy bude vyšší než tržní cena tuhých fosilních PZ.

Forma podpory je stanovena hodinovým nebo ročním zeleným bonusem. Doba podpory bude stanovena minimálně na 3 roky od vyhlášení podpory v nařízení vlády, dále pokud budou platit již zmíněné dva body. Každoročně bude prováděn monitoring k ověření situace na trhu a potřebnosti poskytování uvedené podpory.

Data obsažená v Tabulce 6 zahrnují jak mikrokogeneraci, tak malou kogeneraci. I tato data jsou pro naše účely směrodatná. Podle Tabulky 6 je zřejmé, že v současné době tvoří největší podíl v KVET PZ biomasa, bioplyn, hnědé uhlí, zemní plyn a ostatní plyny. Z toho vyplývá, že nejvíce využívané KJ mají PJ založené na vnitřním a vnějším spalování fosilních nebo obnovitelných PZ. [17]

Tabulka 6: Stav výroby elektřiny a dodávky užitečného tepla z KVET v roce 2017 [17]

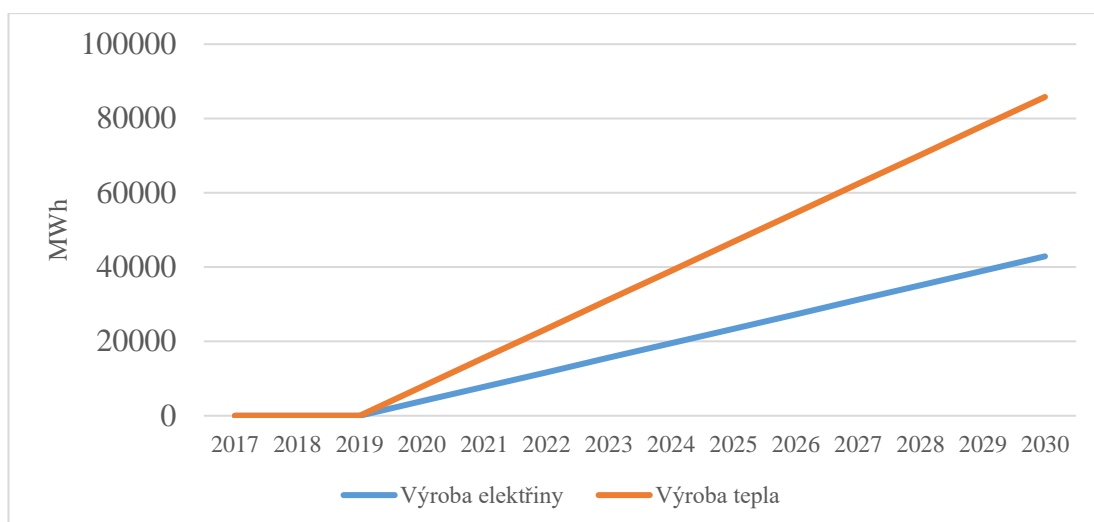
KVET do 1 MWe včetně		
	Výroba elektřiny brutto (GWh)	Dodávka užitečného tepla (TJ)
KVET	1 622,20	4 865,90
Biomasa	17,4	466
Bioplyn	1 219,20	1 328,40
Černé uhlí	0,2	8
Hnědé uhlí	10,3	1 034,70
Koks	0	0
Odpadní teplo	0	0
Ostatní kapalná paliva	0	0
Ostatní pevná paliva	0,8	0,9
Ostatní plyny	9,7	167,3
Ostatní	0	0
Topné oleje	6,5	31,4
Zemní plyn	358	1 829,30
Celk. inst. el. výkon (MWe)	396,4	
Celk. inst. tep. výkon (MWt)		906

Dle Přílohy 1 pocházející z Roční zprávy o provozu teplotěnských soustav v České republice [19], která vypovídá o výrobě tepla z roku 2020, je patrné, že na současné výrobě tepla u KVET se nejvíce podílí PZ jako jsou hnědé uhlí, biomasa, zemní plyn a černé uhlí. I zde je zřejmé, že nejvyužívanější KJ mají PJ založené na vnitřním a vnějším spalování fosilních nebo obnovitelných PZ.

12.2 Budoucí využití mikrokogeneračních jednotek

Dle [18]: „**Předpokládaný vývoj**

Predikce na období po roce 2020 je vytvořena především na základě potřeby dodávky tepla a jejího postupného poklesu a aspektu zvyšujícího se podílu biomasy. Při tvorbě predikce byly využity výsledky ze studie „Posouzení potenciálu vysoce účinné kombinované výroby tepla a elektřiny a účinného dálkového vytápění a chlazení za Českou republiku“ (z roku 2015) a výstup z Národního plánu pro chytré sítě (NAP SG), kde tyto hodnoty byly aktualizovány na současný stav a provedené instalace.“

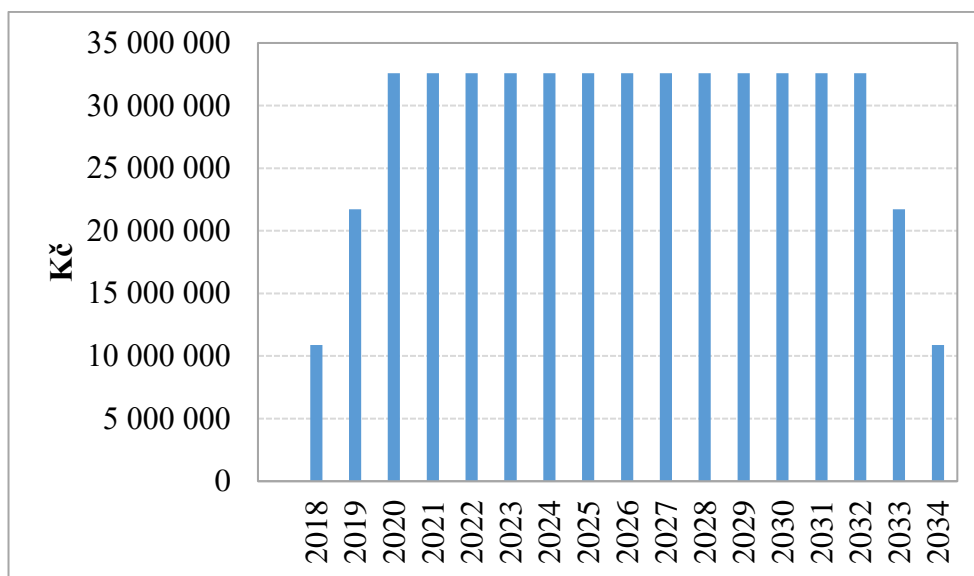


Graf 1: Předpokládaný vývoj výroby tepla a elektřiny Příloha 2 [18]

Na Grafu 1 je vyobrazená závislost výroby tepla a elektřiny na čase. Jedná o data pocházející z webových stránek Ministerstva průmyslu a obchodu [18], která potvrzují plánovaný rozvoj mikrokogeneračních jednotek.

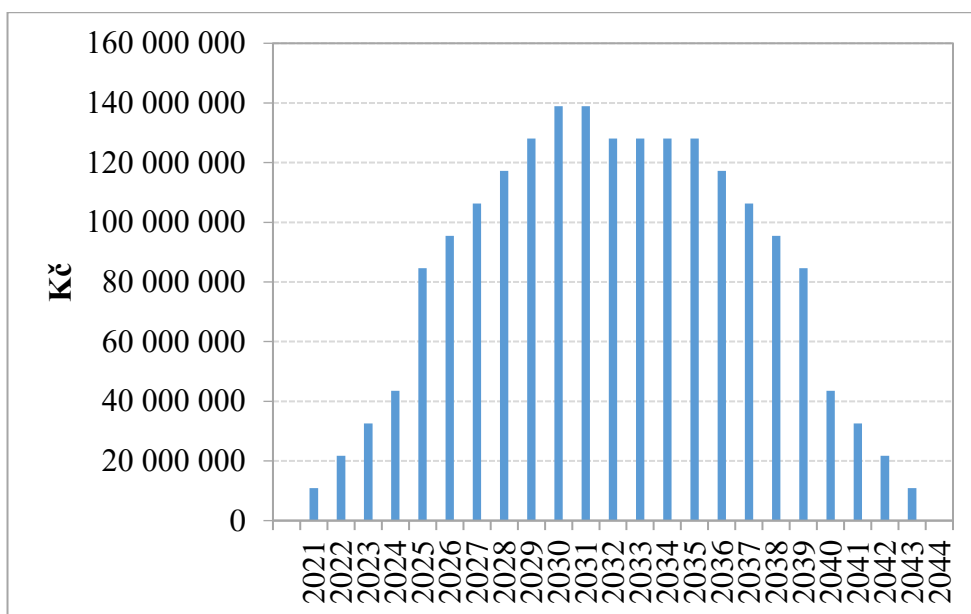
Vývoj v oblasti vyplácení podpory elektřiny na KVET bude probíhat podle následujících předpokladů:

- u současně pracujících zdrojů bude podpora vyplácena po dobu 15 let od uvedení výroby elektřiny do provozu,
- výroby elektřiny, kterým skončí nárok na současnou podporu, budou moci dále uplatňovat podpory pro udržení těchto výroben v provozu, pokud nebudou čerpat jinou podporu,
- po skončení nároku na současnou provozní podporu elektřiny z KVET, budou čerpat podporu na zachování provozu KVET pouze výroby využívající zemní plyn nebo uhlí,
- novými výrobními elektřiny, které by nárokovali podporu elektřiny, by byly výroby elektřiny v mikrokogeneraci a v malé a střední kogeneraci využívající pouze zemní plyn,
- u mikrokogenerace je vhodné zvážit poskytování dotace jenom na investici do nových výroben elektřiny. Jedná se totiž také o zdroj energie využitelné v budovách a objektech, stejně jako jiná opatření sloužící ke snížení energetické náročnosti budov a posílení role, tzv. samo-spotřebitelů elektřiny. [18]



Graf 2: Náklady na podporu kombinované výroby elektřiny a tepla Příloha 3 [18]

Na Grafu 2 je možné vidět plánované roční náklady na podporu výroby elektřiny a tepla. Data pochází z webových stránek Ministerstva průmyslu a obchodu [18]. Z Grafu 2 je zřejmé, že stát má v plánu konstantně podporovat KVET.



Graf 3: Náklady na podporu nových výroben kombinované výroby elektřiny a tepla Příloha 4 [18]

Na Grafu 3 je možné vidět plánované roční náklady na podporu nových výroben elektřiny a tepla. Data pochází z webových stránek Ministerstva průmyslu a obchodu [18]. Z Grafu 3 vyplývá, že největší růst KVET zažije mezi roky 2030 a 2031.

Podmínky pro zachování a navýšení OZE z biomasy pro plnění klimaticko-energetických cílů 2030

Pro zachování a případné navýšení objemu obnovitelné energie z biomasy je nezbytné:

- podpořit poskytování výtopenského tepla a tepla vyrobeného z vysokoúčinné KVET, jak v rámci čistého spalování biomasy, tak i v spoluspalování biomasy s fosilními palivy,
- aby u zařízení s jmenovitým tepelným výkonem nad 100 MW, buď byla elektřina vyrobena z vysokoúčinné KVET, nebo aby byla účinnost přeměny PZ na elektrickou energii alespoň 36 %. [18]

Obnovitelné zdroje energie jako náhrada uhlí v domácnostech

S ohledem na omezené možnosti těžby, je potřeba počítat s omezením dostupnosti tříděného uhlí určeného k spalování v domácnostech. Jeho využití je třeba omezit s ohledem na plnění standardů kvality ovzduší. Jako náhrada přichází z obnovitelných zdrojů energie v úvahu: palivové dřevo, brikety a pelety z biomasy, tepelná čerpadla, využití tepla ze stávajících bioplynových stanic a biometan. [18]

Podpora elektřiny z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla (§ 6 zákona č. 165/2012 Sb.)

Rozsah podpory bude určen pro všechna zařízení KVET jako tzv. palivově neutrální. Podpora na elektřinu nebude vypsána v případě, že pro dané zařízení bude vypsána jiná provozní podpora. Výrobna bude moci čerpat pouze jeden druh provozní podpory. Forma podpory bude pro nové výrobní elektřiny uplatňována pouze ročním zeleným bonusem. Zdroje do 1 MW budou dostávat podporu formou ročního zeleného bonusu úředně stanoveného v cenovém rozhodnutí ERÚ. Nově bude pro výrobní elektřiny z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla stanovena doba podpory, a to po dobu životnosti zařízení. [18]

Smart Grid

Energetika se v současné době vydává cestou decentralizace, daleko větší digitalizace a cestou autonomních ostrovů, které budou schopny fungovat nezávisle na ES. Autonomní provozy budou využívány a rozvíjeny jak firmami, tak sídelními jednotkami. Kogenerační jednotka by mohla znamenat vyřešení problému s dodávkou tepla a elektřiny. Bude tedy potřeba využít nových prostředků, které by umožnili řídit ES.

DCS kladou důraz především na sběr dat, jejich zpracování a použití v jiných nástrojích pro zajištění dodávky, než je tomu dnes. Cílem Smart Grid (v překladu „Chytrých

sítí“) je, aby veškeré objekty napojené na ES spolu navzájem komunikovali prostřednictvím automatického energetického řídicího systému, aby regulovaly svoje energetické nároky, akumulovaly nevyužitou elektrickou energii a zároveň dodávaly vlastní vyrobenou energii do ES.

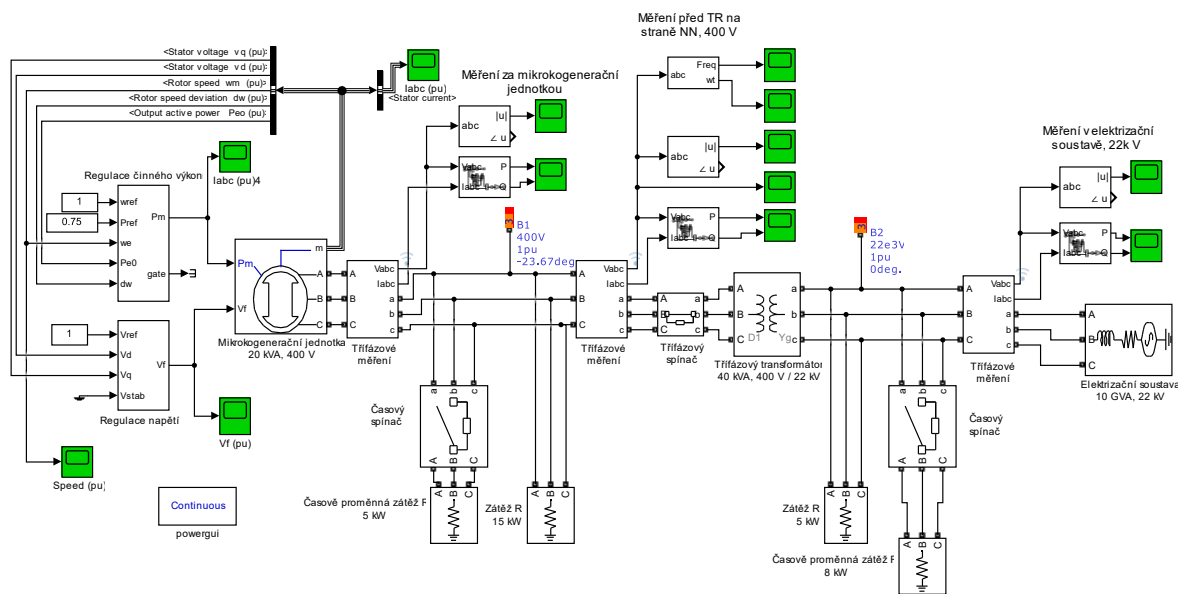
Základním předpokladem komunikace je využití digitálních komponent a technologií do ES, které by umožňovaly digitalizaci dat, a tedy obousměrnou komunikaci mezi koncovým zákazníkem a distributorem elektrické energie. Díky této komunikaci by bylo možné implementovat do ES řadu chytrých prvků, které by přispívaly ke zkvalitnění služeb pro zákazníky. Z oboustranné komunikace mezi zákazníkem a distributorem vyplývají tyto výhody:

- distributor má okamžitý přehled o stavu distribuční sítě, díky čemuž může regulovat řízení výroby nebo spotřeby v ES,
- přesná data o průběhu spotřeby na definovaných místech,
- chytrá měřidla jsou schopna rozpoznat pokusy o manipulaci, působí preventivně proti krádežím a ztrátám,
- zákazník má k dispozici data o jeho spotřebě, která mohou vést k energetické sebereflexi zákazníka, a následné úspoře prostředků,
- hodnoty jsou z měřících zařízení odečítány automaticky na dálku, takže odpadá nutnost návštěvy odběrných míst,
- dálkové řízení měřidel umožňuje okamžitou regulaci ES, změnu tarifů apod.

Dále se využitím technologie Smart Grid ve spojení s KJ bude zabývat praktická část této práce (Kapitola 13). [20]

13 Regulace frekvence a napětí v ES pomocí mikrokogenerace

Pro vytvoření modelu mikrokogenerační jednotky, která je připojena do elektrizační soustavy, jsem jako základ využil volně dostupný model z internetových stránek Mathworks [21]. Tento model jsem upravil v programu MATLAB Simulink, aby byl schopný posloužit účelům mé bakalářské práce, tj. zhodnotit možnosti využití mikrokogeneračních jednotek pro regulaci frekvence a napětí v ES. Výsledné schéma mnou vytvořeného modelu je zobrazeno na Obrázku 34.



Obrázek 34: Schéma upraveného modelu simulace mikrokogenerační jednotky a ES

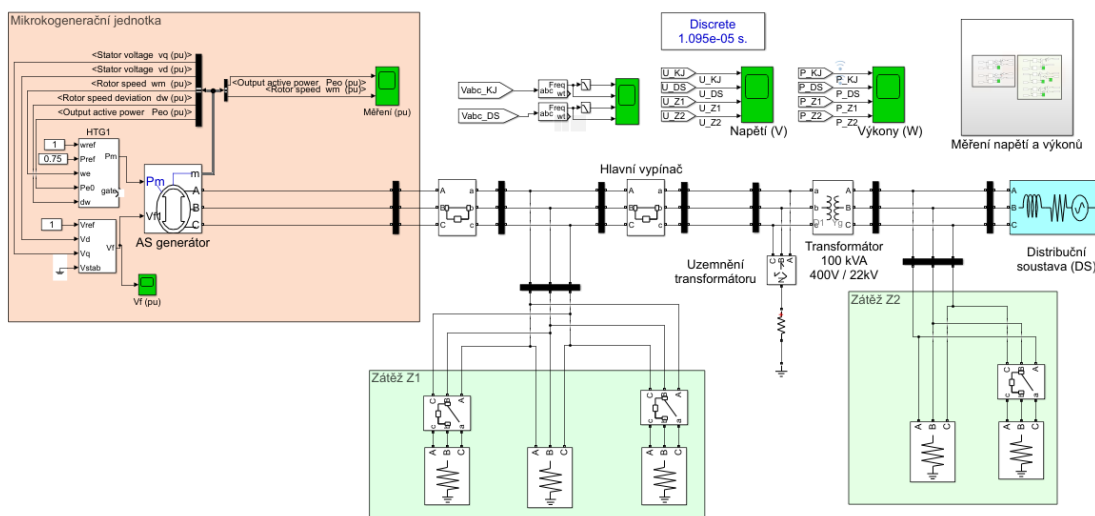
Ze schématu zapojení mnou upraveného modelu (Obrázek 34) je zjevné, že v levé části se nachází mikrokogenerační jednotka společně s její regulační logikou zajišťující zachování jmenovitých hodnot parametrů ES. Mikrokogenerační jednotka je zde modelována jako asynchronní generátor s regulátorem napětí a mechanického výkonu. Pro zjednodušení modelu a simulací jsem zanedbal ztráty a uvažuji, že mechanický výkon z turbíny se bude rovnat výstupnímu elektrickému výkonu generátoru. Aby se řešená KJ mohla řadit mezi mikrokogenerační jednotky zvolil jsem původní hodnotu jejího výkonu 20 kVA, ale v průběhu práce byla hodnota jejího výkonu změněna na 22 kW. Mikrokogenerační jednotka s takovýmto výkonem by v praxi byla připojena na hladinu nízkého napětí (NN), kde je efektivní hodnota sruženého napětí 400 V. Dále předpokládám, že mikrokogenerační jednotka bude v ES sloužit jako podpůrný zdroj pro zachování nominální hodnoty frekvence 50 Hz s povolenou odchylkou ± 200 mHz, která je charakteristická pro státy Evropské unie a mnohé další. V modelu se nachází několik bloků třífázového měření, pomocí nichž jsou

zjišťovány okamžité hodnoty frekvence, napětí a činného výkonu. Během simulací je napětí měřeno v efektivních hodnotách sdruženého napětí, stejně jako je uvažováno v celé této bakalářské práci. Povolený rozsah napětí, který má být v rámci simulace dodržen je uveden v Tabulce 7.

Tabulka 7: Nominální hodnoty parametrů ES [22]

f (Hz)	$50 \pm 0,4 \%$	49,8 - 50,2
U_{NN} (V)	$400 \pm 10 \%$	360 - 440
U_{VN} (kV)	$22 \pm 10 \%$	19,8 - 24,2

Pro větší přehlednost průběžných výsledků během simulací jsem model prezentovaný na Obrázku 34 ještě upravil tak, aby byla většina měření a výpočtů hodnot veličin skryta do několika subsystémů (bloků), viz výsledné schéma modelu zobrazené na Obrázku 35. Místa jednotlivých měření jsou znázorněna černě jako přípojnice. Naměřené hodnoty veličin u mikrokogenerační jednotky jsou značeny „KJ“ a hodnoty veličin naměřené u bloku distribuční soustavy „DS“.



Obrázek 35: Schéma výsledného modelu řešení části ES s mikrokogenerační jednotkou

ES je v modelu realizována pomocí bloků sítě 400 V (NN) a 22 kV (VN), jež jsou propojeny distribučním transformátorem (TR). Do řešené ES jsou připojeny zátěže, ohmického charakteru, na hladinu NN (v modelu označené Z1) a na hladinu VN (v modelu označené Z2). Každá ze zátěží Z1 a Z2 má jednu konstantní zátěž o příkonu 15 kW a jednu proměnnou zátěž. Během simulace se na hladině NN v časovém intervalu od $t = 2$ s do $t = 3,5$ s zvýší zatížení Z1 o 3 kW a v čase od $t = 4,5$ s do $t = 5,5$ s se zátěž Z1 zvýší na hodnotu 5 kW. Na hladině VN se zvýší zatížení Z2 o proměnnou zátěž o příkonu 8 kW

v čase $t = 7$ s až $t = 8$ s, kdy se následně zase odpojí Z2 a zůstane na VN připojena pouze konstantní zátěž Z2. Jelikož předpokládám pouze změnu činného výkonu, tak pro zjednodušení budu uvažovat tak, že zdroje dodávají převážně činný výkon. Tzn., v rámci simulací nebudu zohledňovat tok jalových výkonů, i když by se v reálné situaci musel brát také v potaz.

Do obvodu je zapojeno několik vypínačů umožňujících změny konfigurace ES a napájení zátěží. Hlavní vypínač umožňuje změnu konfigurace sítě a mikrokogenerační jednotky ve dvou režimech:

- paralelní provoz mikrokogenerační jednotky s elektrizační soustavou,
- ostrovní provoz mikrokogenerační jednotky a zátěže Z1.

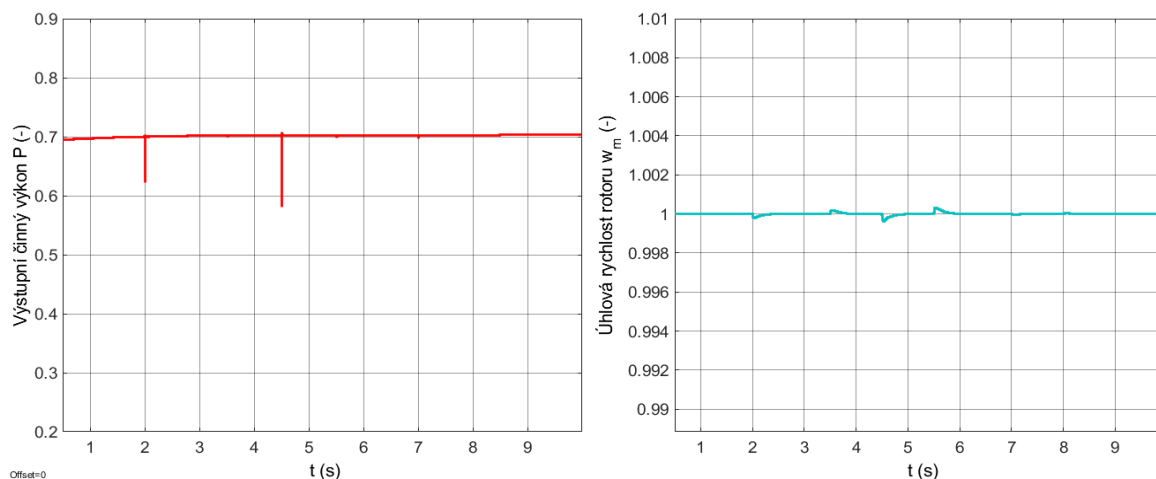
Pro zhodnocení možnosti využití mikrokogeneračních jednotek, jako podpůrného zdroje pro zachování frekvenční a napěťové stability v ES, jsem pomocí výsledků simulací analyzoval dva možné případy provozu a regulace modelu mikrokogenerační jednotky:

- mikrokogenerační jednotka s konstantním výstupním výkonem P (W),
- mikrokogenerační jednotka je regulována na proměnný výstupní výkon P (W) dle změny zatížení.

13.1 Regulace výstupního výkonu mikrokogenerační jednotky na konstantní hodnotu

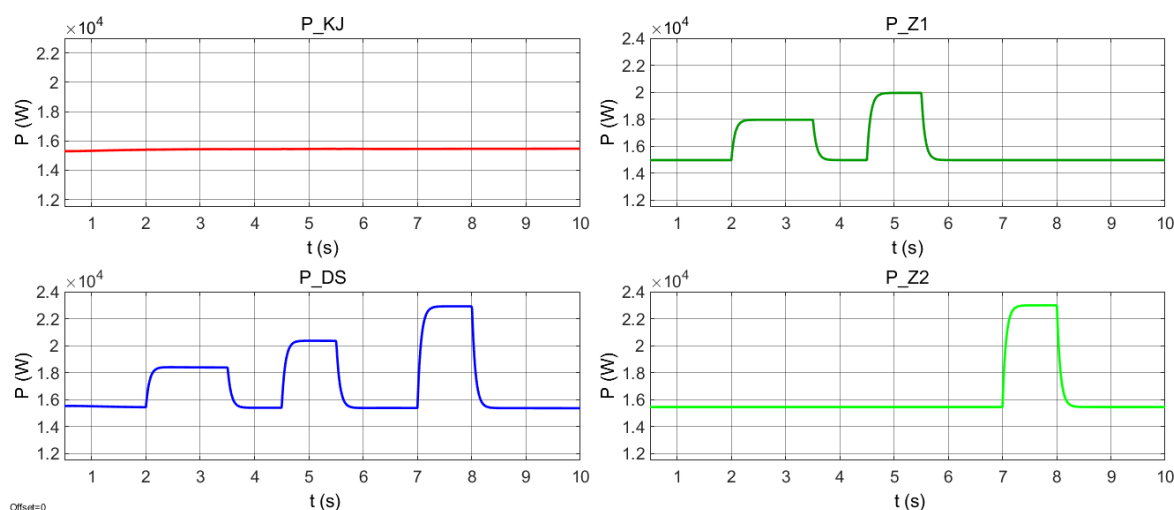
Cílem první simulace řešené ES s mikrokogenerační jednotkou bylo dokázat, že pokud by byla mikrokogenerační jednotka regulována na konstantní hodnotu výstupního výkonu a na konstantní hodnotu frekvence 50 Hz a napětí 400 V, tak se neúčastní primární ani sekundární regulace výkonu. V tomto případě se tedy mikrokogenerační jednotka aktivně nepodílí na zachování frekvenční a napěťové stability v ES, ale působí pouze jako podpůrný pasivní prostředek, který dodává do ES konstantní výkon.

Jak vyplývá z výsledků simulace, viz Graf 4, tak při změně zatížení Z1, které je připojeno elektricky blíže k mikrokogenerační jednotce, dojde pouze při připínání a odepínání proměnlivé části zátěže Z1 k nepatrným výkmitům výstupního výkonu generátoru a úhlové rychlosti rotoru od jejich konstantních požadovaných hodnot. Tím je potvrzeno, že v tomto případě se mikrokogenerační jednotka neúčastní PR ani SR frekvence a napětí.



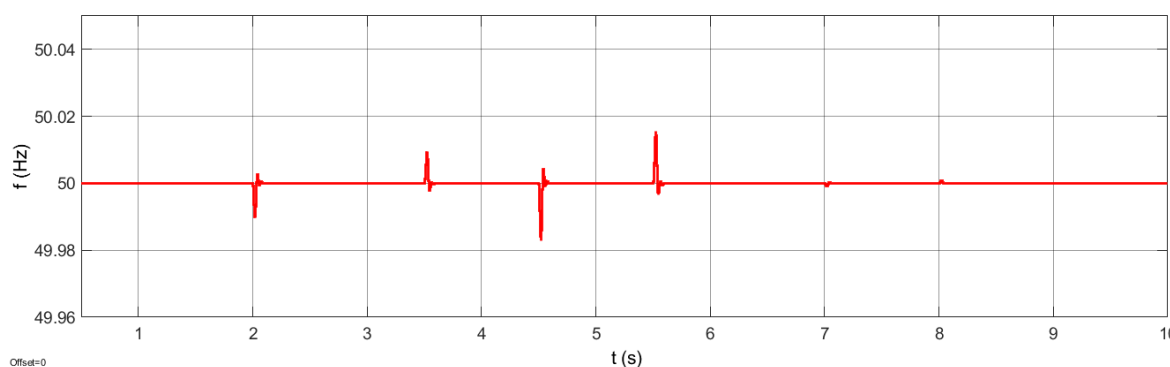
Graf 4: Časový průběh a) Výstupního činného výkonu, b) úhlové rychlosti rotoru (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Výkonová nerovnováha vzniklá změnou zatížení je vyrovnána pouze změnou dodávaného výkonu ze strany DS. Na Grafu 5 je vidět přehledné porovnání činných výkonů jak na straně zdrojů, tzn. mikrokogenerační jednotky (P_{KJ}) a distribuční soustavy (P_{DS}), tak i na straně zatížení $Z1$ (P_{Z1}) a $Z2$ (P_{Z2}). Při porovnání jednotlivých průběhů je vidět, že lze dojít ke stejnému závěru, kdy změny výkonů zatížení $Z1$ a $Z2$ jsou opravdu vyrovnány pouze změnou dodávaného výkonu ze strany DS (tzn. elektrizační soustavy), ve které dojde ke změně konfigurace energetických zdrojů při primární a sekundární regulaci, a tím k udržení napětí a frekvence na jejich jmenovitých hodnotách.



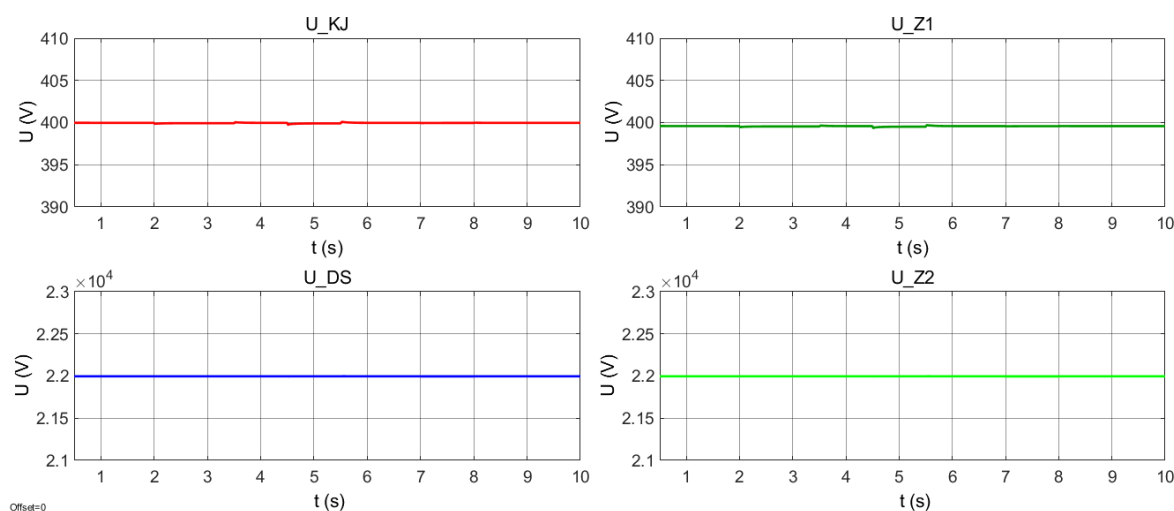
Graf 5: Časové průběhy výkonů (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Fakt, že během simulace byly udrženy hodnoty napětí a frekvence v ES na jmenovitých hodnotách (dle Tabulky 7), je zřejmé z průběhů těchto veličin v Grafu 6 a Grafu 7.

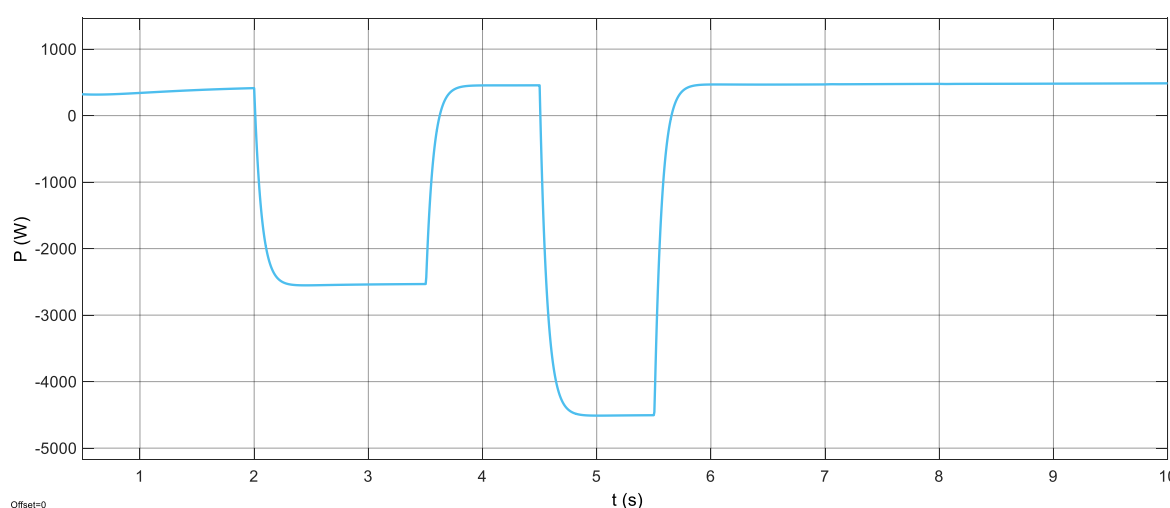


Graf 6: Časový průběh frekvence v ES, měřeno za KJ (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Okamžité hodnoty frekvence zaznamenané v průběhu simulace v Grafu 6, byly naměřeny na výstupu mikrokogenerační jednotky. Při zvyšování zatížení Z1 došlo ke krátkodobým poklesům frekvence a naopak při snížení zatížení Z1 došlo ke krátkodobému nárůstu hodnoty frekvence. Obě tyto změny frekvence, byly hned vyrovnány díky okamžité změně dodávky činného výkonu z DS, viz Graf 5. To je patrné i z Grafu 8, kde je vidět průběh přenášeného výkonu směrem od kogenerační jednotky do DS. Jelikož byla při změně zatížení Z1 vyrovnána výkonová bilance pomocí zvýšení dodávaného výkonu z DS tzn. v opačném směru, než je směr měření, tak jsou hodnoty přenášeného činného výkonu v čase od $t = 2$ s až $t = 3,5$ s a od $t = 4,5$ s až $t = 5,5$ s záporné a odpovídají hodnotám jednotlivých změn zatížení Z1.



Graf 7: Časové průběhy napětí (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)



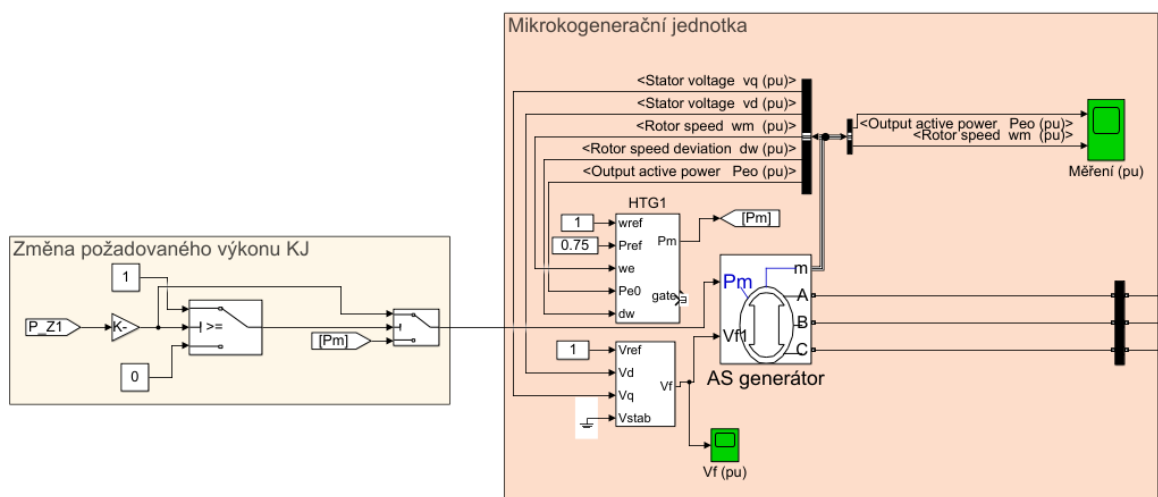
Graf 8: Časový průběh dodávaného výkonu do ES (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Výsledky lze shrnout do průběžného zhodnocení, na jehož základě lze konstatovat, že pokud bude mikrokogenerační jednotka regulována na konstantní výstupní činný výkon a jmenovité hodnoty frekvence a napětí, nelze ji využít jako podpůrný decentralizovaný zdroj pro udržení frekvenční a napěťové stability v ES.

S plánovaným rozvojem decentralizované výroby elektřiny se však již nyní v legislativě počítá s tím, že by mikrokogenerační jednotky měly být schopny podílet se na regulaci frekvence a napětí v ES. Tento druhý případ jsem se proto pokusil zhodnotit v rámci druhé simulace řešeného modelu.

13.2 Regulace výstupního výkonu mikrokogenerační jednotky dle změny zatížení

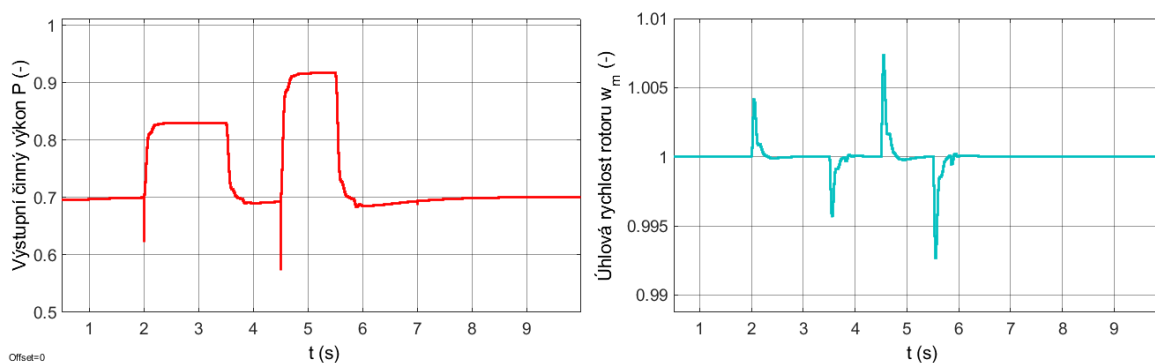
V druhé simulaci byl použit stejný model řešené části ES se shodnými změnami zatížení Z1 a Z2. Aby byla mikrokogenerační jednotka schopna měnit výstupní výkon dle požadované změny zatížení a tím se aktivně podílet na regulaci výkonové rovnováhy v ES, upravil jsem model regulace mikrokogenerační jednotky. Vzhledem k tomu, že cílem mé bakalářské práce nebylo navrhnout regulátor primární a sekundární regulace pro mikrokogenerační jednotku, tak jsem pouze poupravil stávající regulátor tohoto zdroje tak, aby se plynule měnil výstupní činný výkon dle naměřené hodnoty požadovaného činného výkonu zátěže Z1, viz Obrázek 36.



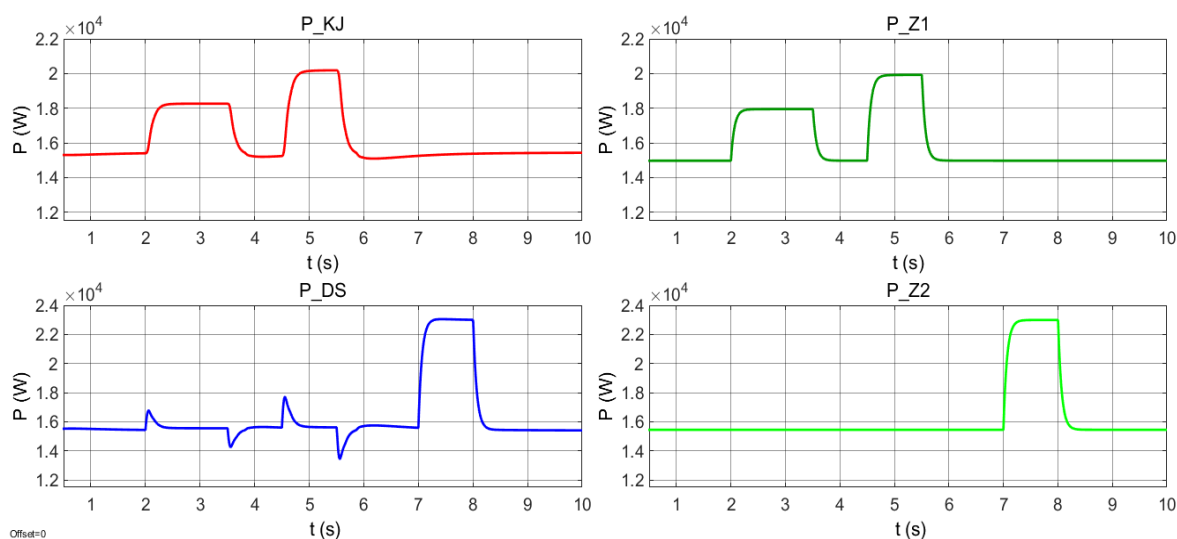
Obrázek 36: Vnitřní schéma regulace výstupního výkonu mikrokogenerační jednotky

Tato regulace (zvýšený výstupního výkonu) je nastavena tak, aby proběhla pouze v případě, že bude překročena hodnota 75 % z maximální hodnoty činného výkonu mikrokogenerační jednotky (22 kW). Pokud bude hodnota zatížení Z1 nižší než 75 % maximálního výkonu mikrokogenerační jednotky, tak bude regulována na konstantní činný výkon a jmenovitou hodnotu napětí a frekvence jako v předchozí simulaci. V případě snížení zátěže Z1 bude přebytečný činný výkon dodáván do DS. Toto nastavení lze však libovolně měnit. Zvolil jsem tuto hodnotu proto, aby mikrokogenerační jednotka byla co nejvíce využita a měla co nejvyšší činný výkon během provozu.

Z Grafu 9 je patrné, že při změně zátěže Z1 mikrokogenerační jednotka navýšila svůj výstupní elektrický výkon (P_{KJ}), aby zachovala parametry ES v normálových mezích. Tím jsem dokázal, že mikrokogenerační jednotka se může aktivně podílet na zachování výkonové bilance v ES.

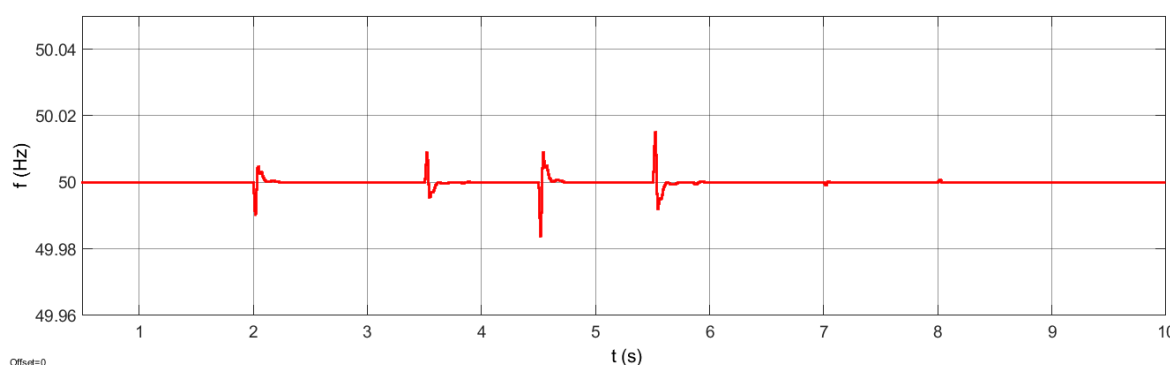
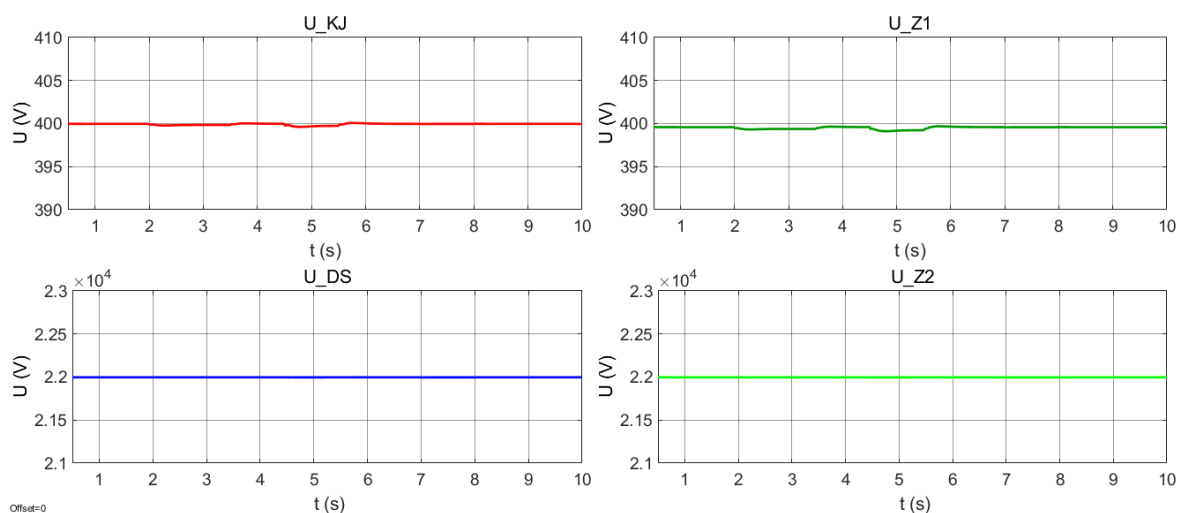
Graf 9: Časový průběh a) výstupního činného výkonu, b) úhlové rychlosti rotoru (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Graf 10 obsahuje přehled časových průběhů činného výkonu. Oproti Grafu 5 je zřejmé, že mikrokogenerační jednotka (P_{KJ}) se na základě elektrické vzdálenosti zátěže Z1 od zdroje podílela na zachování výkonové bilance více než DS (P_{DS}). V čase $t = 2$ s DS chvíli dodávala výkon (P_{DS}) do Z1, protože DS stihla dříve zareagovat na změnu požadovaného výkonu Z1 (P_{Z1}), do té doby než byl plynule navýšen výkon KJ dle požadavku vyrovnání výkonové bilance. Ovšem v čase $t = 3,5$ s, kdy se opět snížila hodnota zatížení Z1 na počáteční hodnotu 15 kW, mikrokogenerační jednotka dodala do DS sítě přebytečný výkon, který nebylo možné nikde spotřebovat (P_{DS} záporné hodnoty), což nastalo, než KJ snížila na základě požadavku regulace svůj výkon. Toto chování se opakovalo i v časovém intervalu $t = 4,5$ s až $t = 5,5$ s, ale byla naměřena větší hodnota dodávaného a přijatého výkonu (P_{DS}) od mikrokogenerační jednotky. V době připojení zátěže Z2 mikrokogenerační jednotka nereagovala na změnu požadovaného výkonu (P_{Z2}), protože byla elektricky dále než DS. Celé toto mnou popsané chování opět dokazuje, že mikrokogenerační jednotka se podílela na zachování výkonové bilance v ES.

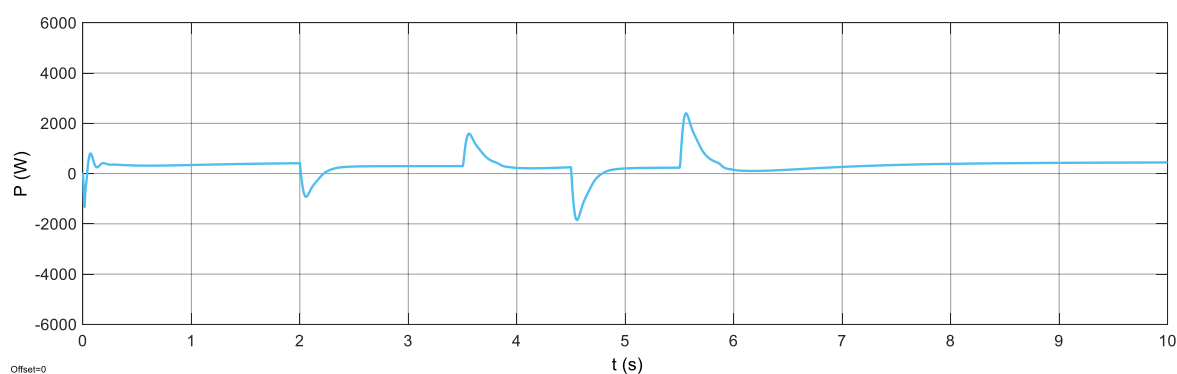


Graf 10: Časové průběhy výkonů (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Potvrzení toho, že během simulace byly udrženy hodnoty napětí a frekvence v ES na jmenovitých hodnotách (dle Tabulky 7), je zřejmé z průběhů těchto veličin v Grafu 11 a Grafu 12.

Graf 11: Časový průběh frekvence v ES, měřeno za KJ (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)Graf 12: Časové průběhy napětí (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Okamžité hodnoty frekvence zaznamenané v průběhu simulace v Grafu 11, byly naměřeny také na výstupu mikrokogenerační jednotky, tak jako u první simulace (Kapitola 13.1). Zde můžeme zaznamenat identické chování jako v první simulaci, tj. krátkodobý pokles frekvence při zvětšení zatížení v čase $t = 2$ s, $t = 4,5$ s, $t = 7$ s a zároveň krátkodobé zvýšení frekvence při odpojení zátěže v čase $t = 3,5$ s, $t = 5,5$ s a $t = 8$ s. Z grafu 13, kde je vidět průběh přenášeného výkonu směrem od KJ do DS. V tomto grafu je znovu patrné, že při připojení Z1 z DS chvíli tekl výkon P směrem (záporná hodnota) k KJ a poté dokonce tekl výkon P od KJ směrem k DS (kladná hodnota), čímž byla zajištěna výkonová bilance.



Graf 13: Časový průběh dodávaného výkonu do ES (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Z výsledků simulace můžeme konstatovat, že mikrokogenerační jednotka se může podílet na PR a SR frekvence a napětí, čímž umožňuje decentralizovaným zdrojům se podílet na vyrovnání výkonové bilance v ES, a tím i k udržení frekvenční a napěťové stability v ES.

Závěr

Cílem práce bylo přiblížit fyzikální principy fungování mikrokogeneračních jednotek a zhodnotit možnosti jejich využití jako podpůrných zdrojů pro udržení napěťové a frekvenční stability v elektrizační soustavě. Práce se snaží poukázat na vysokou univerzálnost principů vzniku kombinované výroby elektrické a tepelné energie a na vysokou účinnost přeměny primárních zdrojů na jiné formy energie. Mikrokogenerační jednotky pracují na již známých principech, nejedná se o nové způsoby výroby.

Z hlediska rozvoje decentralizované výroby jsem provedl porovnání principů vzniku kombinované výroby elektřiny a tepla z fosilních zdrojů a obnovitelných zdrojů energií. V Tabulce 5 je uvedena účinnost transformace na elektrickou energii, ze které je zřejmé, že mikrokogenerační jednotky mohou dosahovat větší účinnosti než obnovitelné zdroje. Nelze jednoznačně říci, který způsob výroby (transformace primárních zdrojů energie) elektřiny a tepla je všeobecně lepší, protože vždy záleží na konkrétní aplikaci daného řešení. Kdybych chtěl vytvořit více směřodatné porovnání reflektující realitu, museli bychom porovnávat zdroje se stejným jmenovitým výkonem, což by bylo velice časově náročné.

Práce zahrnuje statistiky, které vypovídají o současném využití mikrokogeneračních jednotek. Ty však nejsou úplně přesné, protože obsahují i data spojená s malou kogenerací. Mikrokogenerační jednotky jsou spíše hudba budoucnosti, o čemž svědčí plánovaný rozvoj a podpora mikrokogenerace ze strany státu.

V závěru práce jsem dokázal pomocí počítačové simulace v softwaru MATLAB Simulink, že se mikrokogenerační jednotky mohou aktivně podílet na zachování výkonové rovnováhy v ES. Tato skutečnost potvrzuje, že při správně navržené primární a sekundární regulaci frekvence a napětí by se cesta energetiky mohla více vydat směrem decentralizované výroby energie, než je nyní.

Mikrokogenerační jednotky jsou jedno z možných budoucích hlavních řešení výroby elektrické a tepelné energie, proto by si jejich rozvoj zasloužil ještě více pozornosti.

Seznamy

Seznam použitých obrázků

- Obrázek 1: Schéma přenosové soustavy České republiky
- Obrázek 2: Statické charakteristiky zátěže
- Obrázek 3: Schéma pro odvození statických charakteristiky
- Obrázek 4: Statické napěťové charakteristiky zdrojů
- Obrázek 5: Statické napěťové charakteristiky: a) transformátory a motory, b) vedení
- Obrázek 6: Stabilita elektrizační soustavy
- Obrázek 7: Frekvenční statická charakteristika: a) zdrojů, b) zátěží
- Obrázek 8: Frekvenční statická charakteristika: a) PR, b) PR a SR
- Obrázek 9: Výrobní řetězec transformace primárního zdroje
- Obrázek 10: Uspořádání kogeneračních systémů
- Obrázek 11: Transformace primární energie v kogeneračních jednotkách
- Obrázek 12: Typy palivových článků a jejich chemické reakce
- Obrázek 13: Schéma KJ s přímou transformací (PC)
- Obrázek 14: T-s diagram Rankinova cyklu
- Obrázek 15: Schéma KJ s protitlakou parní turbínou
- Obrázek 16: Schéma KJ s kondenzační turbínou
- Obrázek 17: a) TO s ideální b) TO s organickou pracovní látkou
- Obrázek 18: Schéma KJ pracující na principu ORC
- Obrázek 19: Braytonův cyklus
- Obrázek 20: Schéma KJ se spalovací turbínou
- Obrázek 21: Schéma KJ s mikrotrubínou
- Obrázek 22: Schéma KJ se Stirlingovým motorem
- Obrázek 23: Typy Stirlingova motoru
- Obrázek 24: Ottův a Dieselův cyklus
- Obrázek 25: Schéma KJ se spalovacím motorem
- Obrázek 26: Kontejnerové provedení mikrokogenerační jednotky WAVE120
- Obrázek 27: Schéma mikrokogenerační jednotky WAVE120
- Obrázek 28: Rozdělení denního diagramu na jednotlivá pásma
- Obrázek 29: Vnitřní uspořádání gondoly
- Obrázek 30: Umístění VTE v ČR k roku 2021

Obrázek 31: Větrné turbíny se svislou osou otáčení: a) Darrieus b) Savonius

Obrázek 32: VE ES ČR – nad 1 MWE součtového instalovaného výkonu z roku 2006

Obrázek 33: Proudová přílivová VE

Obrázek 34: Schéma upraveného modelu simulace mikrokogenerační jednotky a ES

Obrázek 35: Schéma výsledného modelu řešení části ES s mikrokogenerační jednotkou

Obrázek 36: Vnitřní schéma regulace výstupního výkonu mikrokogenerační jednotky

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti jednotlivých typů PC

Tabulka 2: Porovnání PJ využívaných pro mikrokogenerační jednotky zohledňující jejich výhody a nevýhody

Tabulka 3: Parametry PJ pro KVET

Tabulka 4: Přehled účinností turbín VTE

Tabulka 5: Porovnání KJ a OZE na základě účinnosti

Tabulka 6: Stav výroby elektřiny a dodávky užitečného tepla z KVET v roce 2017

Tabulka 7: Nominální hodnoty parametrů ES

Seznam použitých grafů

Graf 1: Předpokládaný vývoj výroby tepla a elektřiny

Graf 2: Náklady na podporu kombinované výroby elektřiny a tepla

Graf 3: Náklady na podporu nových výroben kombinované výroby elektřiny a tepla

Graf 4: Časový průběh a) Výstupního činného výkonu, b) úhlové rychlosti rotoru (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Graf 5: Časové průběhy výkonů (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Graf 6: Časový průběh frekvence v ES, měřeno za KJ (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Graf 7: Časové průběhy napětí (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Graf 8: Časový průběh dodávaného výkonu do ES (při $P_{KJ} = \text{konst.}$)

Graf 9: Časový průběh a) výstupního činného výkonu, b) úhlové rychlosti rotoru (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Graf 10: Časové průběhy výkonů (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Graf 11: Časový průběh frekvence v ES, měřeno za KJ (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Graf 12: Časové průběhy napětí (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Graf 13: Časový průběh dodávaného výkonu do ES (při $P_{KJ} \neq \text{konst.}$)

Seznam příloh

Příloha 1: Výroba tepla netto a výroba tepla z KVET za rok 2020 (TJ)

Příloha 2: Mikrokogenerační jednotky celkem

Příloha 3: Náklady na podporu kombinované výroby elektřiny a tepla

Příloha 4: Náklady na podporu nových kombinované výroby elektřiny a tepla

Literatura

- [1] K čemu slouží přenosová síť?. <https://www.ceps.cz> [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/casto-kladene-otazky>
- [2] Schéma PS. <https://www.ceps.cz> [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
- [3] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN-technická literatura, 2005. ISBN 8073001187.
- [4] ČEPS: Podpůrné a systémové služby [online]. 21.5.2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/cinnosti>
- [5] RAKOVÁ, Lenka. *Regulace a řízení provozu elektrizační soustavy: Statické napěťové charakteristiky*. 2021.
- [6] MÁŠLO, Karel a Zdeněk. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy: Systémové služby*. ISBN 978-80-260-44671-1.
- [7] RAKOVÁ, Lenka. *Regulace a řízení provozu elektrizační soustavy: Statické frekvenční charakteristiky*. 2021.
- [8] Povýšil, Roman a kol. *Mikrokogenerace – efektivní nástroj stability a bezpečnosti dodávek energie*. MPO, Publikace Programu EFEKT 2011, 2011. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66f875530f33e8a/mikrokogenerace.pdf>
- [9] Habrych, Richard. *Řízení jalového výkonu synchronního generátoru*. Dostupné z: https://www.pslib.cz/ivo.petricek/prezentace/vyuka_ESP/4_rocnik/PD.pdf
- [10] Krbek, Jaroslav a Polesný, Bohumil. *Kogenerační jednotky-zřizování a provoz*. Praha: GAS, 2007. GAS. ISBN 978-80-7328-151-9. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66f875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf
- [11] ŠÍPAL, Jaroslav. *Obnovitelné zdroje energie: způsoby získávání elektrické a tepelné energie z obnovitelných zdrojů*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, 2014. ISBN 9788074147425.
- [12] Noháč, Karel. *Elektroenergetika 1 [přednášky]*. Plzeň: Západočeská univerzita 2021
- [13] Skala, Bohumil. *Elektrické stroje [přednášky]*. Plzeň: Západočeská univerzita 2021
- [14] Špale, Jan. *Wave120 - kogenerační ORC jednotka na dřevní štěpku v kontejnerovém provedení*. All for Power, Praha, leden 2021. ISSN 1802-8535. Dostupné

- z: <https://allforpower.cz/obnovitelne-zdroje/wave120-kogeneracni-orc-jednotka-na-drevni-stepku-v-kontejnerovem-provedeni-322>
- [15] Větrné elektrárny čili kouzelné větrníky. Energie.cz [online]. 1.9.2021 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.energie.cz/vetrne-elektrarny-aneb-kouzelné-vetrniky/>
- [16] Vodní elektrárny ES ČR - nad 1 MWe součtového instalovaného výkonu [online]. 31. 12. 2006 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: https://www.eru.cz/legacyerustaticdata/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2006/mapy/3.htm
- [17] Podkladový materiál k Vyhodnocení Státní energetické koncepce ČR. In: . 2021. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/vyhodnoceni-naplnovani-statni-energeticke-koncepce-cr--260428/>
- [18] Rozvoj podporovaných zdrojů energie do roku 2030. In: . 2019. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/elektroenergetika/obnovitelne-zdroje/rozvoj-podporovanych-zdroju-energie-do-roku-2030-podkladovy-dokument-nkep--244303/>
- [19] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU TEPLÁRENSKÝCH SOUSTAV ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2020: Výroba tepla netto a výroba tepla z KVET [online]. 2020n. 1. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://www.eru.cz/sites/default/files/import_files/Rocni_zprava_provoz_TS_2020.pdf
- [20] PLCHÚT, Martin. Co je Smart Grid? [online]. 13.4.2015 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/12544-co-je-smart-grid>
- [21] KURAM, Suram. Visualize droop characteristic of Synchronous generators [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/83948-visualize-droop-characteristic-of-synchronous-generators?s_tid=srchtitle_synchronous%2520generator_5
- [22] *KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: Část V. Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS* [online]. 2014 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/sites/default/files/obsah/prilohy/cvkprip.pdf>

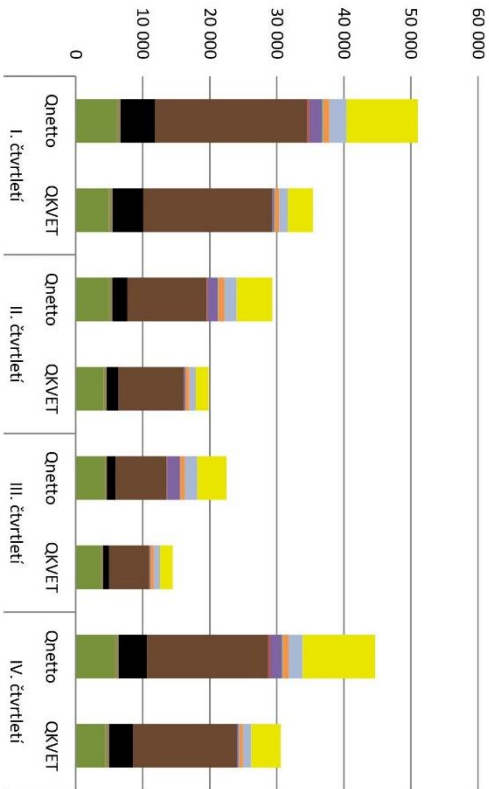
Přílohy

Příloha 1: Výroba tepla netto a výroba tepla z KVET za rok 2020 (TJ) [19]

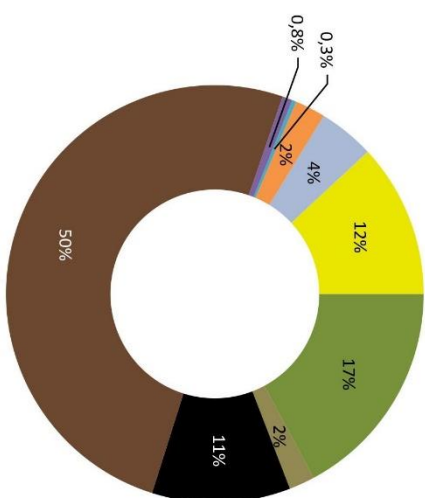
	I. čtvrtletí			II. čtvrtletí			III. čtvrtletí			IV. čtvrtletí			Celkem		
	Q _{netto}	Q _{KVET}	Q _{KVET} /Q _{netto}	Q _{netto}	Q _{KVET}	Q _{KVET} /Q _{netto}	Q _{netto}	Q _{KVET}	Q _{KVET} /Q _{netto}	Q _{netto}	Q _{KVET}	Q _{KVET} /Q _{netto}	Q _{netto}	Q _{KVET}	Q _{KVET} /Q _{netto}
Výroba tepla	51 037,6	35 396,0	69%	29 331,7	19 828,5	68%	22 503,7	14 474,5	64%	44 682,9	30 598,1	68%	147 555,9	100 297,1	68%
Biomasa	6 057,5	4 915,1	81%	5 004,1	4 167,8	83%	4 288,9	3 720,7	87%	5 784,0	4 390,8	76%	21 134,5	17 194,5	81%
Bioplyn	623,3	602,2	97%	468,4	443,9	95%	392,3	368,4	94%	626,6	594,7	95%	2 110,5	2 009,3	95%
Černé uhlí	5 142,9	4 531,2	88%	2 219,9	1 777,8	80%	1 263,2	887,4	70%	4 243,3	3 548,0	84%	12 869,3	10 744,5	83%
Elektrická energie	3,9	0,0	0%	2,8	0,0	0%	3,9	0,0	0%	2,7	0,0	0%	13,3	0,0	0%
Energie prostředí (tepelné čerpadlo)	3,2	0,0	0%	3,2	0,0	0%	5,6	0,0	0%	4,3	0,0	0%	16,4	0,0	0%
Energie Slunce (solární kolektor)	0,1	0,0	0%	0,2	0,0	0%	0,2	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,5	0,0	0%
Hnědé uhlí	22 742,8	19 281,2	85%	11 878,9	9 788,8	82%	7 638,7	6 000,3	79%	18 025,5	15 488,2	86%	60 285,9	50 558,5	84%
Jademé palivo	307,7	0,0	0%	102,1	0,0	0%	55,5	0,0	0%	321,3	0,0	0%	786,6	0,0	0%
Koks	0,1	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,1	0,0	0%
Odpadní teplo	1 792,8	212,1	12%	1 502,8	194,1	13%	1 887,7	156,5	8%	1 696,2	224,5	13%	6 879,5	787,2	11%
Ostatní kapalná paliva	208,6	129,3	62%	100,2	63,3	63%	37,1	17,4	47%	126,6	115,4	91%	472,4	325,4	69%
Ostatní pevná paliva	959,7	682,6	71%	898,7	555,1	62%	683,9	520,5	76%	927,5	607,6	66%	3 469,8	2 365,8	68%
Ostatní plyny	2 558,5	1 288,1	50%	1 831,4	924,3	50%	1 884,5	914,4	49%	2 036,9	1 230,0	60%	8 311,2	4 356,8	52%
Ostatní	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%
Topné oleje	33,4	3,9	12%	22,8	3,1	14%	27,5	3,1	11%	90,4	6,8	8%	174,2	17,0	10%
Zemní plyn	10 603,2	3 750,2	35%	5 296,3	1 910,3	36%	4 334,7	1 885,8	44%	10 797,7	4 392,0	41%	31 031,9	11 938,2	38%

zdroj: dot. výkaz ERÚ-T1, ERÚ-E1

Výroba tepla netto a výroba tepla z KVET podle paliv (TJ)



Podíl paliv na výrobě tepla z KVET



Příloha 2: Mikrokogenerační jednotky celkem [18]

Rok	Instalovaný výkon el. (MWe)	Instalovaný výkon tep. (MWt)	Výroba elektřiny (MWh)	Výroba tepla (MWh)	Výroba elektřiny (GJ)	Výroba tepla (GJ)
2017	0	0	0	0	0	0
2018	0	0	0	0	0	0
2019	0	0	0	0	0	0
2020	3	6	3 900	7 800	14 040	28 080
2021	6	12	7 800	15 600	28 080	56 160
2022	9	18	11 700	23 400	42 120	84 240
2023	12	24	15 600	31 200	56 160	112 320
2024	15	30	19 500	39 000	70 200	140 400
2025	18	36	23 400	46 800	84 240	168 480
2026	21	42	27 300	54 600	98 280	196 560
2027	24	48	31 200	62 400	112 320	224 640
2028	27	54	35 100	70 200	126 360	252 720
2029	30	60	39 000	78 000	140 400	280 800
2030	33	66	42 900	85 800	154 440	308 880

Příloha 3: Náklady na podporu kombinovaná výroba elektřiny a tepla [18]

Rok	Mikrokogenerace (tis. Kč)
2018	10 865
2019	21 731
2020	32 596
2021	32 596
2022	32 596
2023	32 596
2024	32 596
2025	32 596
2026	32 596
2027	32 596
2028	32 596
2029	32 596
2030	32 596
2031	32 596
2032	32 596
2033	21 731
2034	10 865
Celkem	488 943

Příloha 4: Náklady na podporu nových výroben kombinované výroby elektřiny a tepla [18]

Rok	Mirokogenerace (tis. Kč)
2021	10 865
2022	21 731
2023	32 596
2024	43 462
2025	84 594
2026	95 459
2027	106 325
2028	117 190
2029	128 056
2030	138 921
2031	138 921
2032	128 056
2033	128 056
2034	128 056
2035	128 056
2036	117 190
2037	106 325
2038	95 459
2039	84 594
2040	43 462
2041	32 596
2042	21 731
2043	10 865
2044	0
Celkem	1 942 565