

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vývoj energetického využití biomasy v České republice

Autor práce: **Tomáš Kanta**  
Vedoucí práce: **Ing. Lenka Raková, Ph. D**

---

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš KANTA**  
Osobní číslo: **E20N0029P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Elektroenergetika**  
Téma práce: **Vývoj energetického využití biomasy v České republice**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

## Zásady pro vypracování

1. Analyzujte vývoj energetického využití biomasy v ČR a posuďte jeho současný stav.
2. Zhodnoťte možnost a vhodnost využití jednotlivých primárních zdrojů v rámci Smart Home nebo Smart Village.
3. Navrhněte energeticky soběstačný dům, kde hlavním zdrojem energie bude biomasa v hybridním systému s dalším zvoleným primárním zdrojem.
4. Navrhněte zjednodušené schéma regulace výroby a spotřeby elektrické a tepelné energie v navržené koncepci Smart Home.
5. Vyhodnoťte návrh z energetického a ekonomického hlediska a posuďte možnost budoucího využití biomasy v systémech Smart Home.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. PASTOREK Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVÍČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
2. ŠOOŠ Lubomír, Milan KOLEJÁK a František URBAN. Biomasa – obnovitelný zdroj energie. Bratislava: VERT, 2012. Edícia vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-970957-3-4.
3. DVORSKÝ Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
4. <https://biom.cz/cz/produkty-a-sluzby/knihovna>
5. MARTINEZ Simon, MICHAUX Ghislain, SALAGNAC Patrick, BOUVIER Jean-Louis. Micro-combined heat and power systems (micro-CHP) based on renewable energy sources, Energy Conversion and Management, Vol. 154, 2017, str. 262-285, ISSN 0196-8904.
6. Sornek, Krzysztof. Prototypical Biomass-Fired Micro-Cogeneration Systems Energy and Ecological Analysis. Energies. 2020; 13(15):3909. <https://doi.org/10.3390/en131539>

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

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



  
L.S.  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

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

V Plzni dne 8. října 2021

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá různými druhy biomasy a jejím energetickým využitím. Konkrétně využitím biomasy pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Technologie na využití biomasy je nejprve představena z teoretického hlediska. V praktické části se pak práce zaměřuje na pokrytí spotřeby tepelné a elektrické energie rodinného domu pomocí mikrokogenerační jednotky a fotovoltaického systému. Dalším krokem návrhu byly simulace řízení výroby a spotřeby elektrické a tepelné energie. V závěru práce je tento návrh porovnán z ekonomického a energetického hlediska s kotlem na uhlí a dřevo, který byl ve studovaném objektu nainstalován před výměnou za tepelné čerpadlo.

## **Klíčová slova**

Obnovitelné zdroje, biomasa, kogenerační jednotka, fotovoltaický systém, řízení spotřeby a výroby elektrické a tepelné energie. Smart Home, Smart Village

## **Abstract**

This master thesis deals with different types of biomass and their energy utilization. The main focus is on combined heat and power generation (cogeneration). The potential of biomass in the energy sector is first introduced from the theoretical point of view. The practical part aims to design a self-sufficient energy house with biomass cogeneration units and photovoltaic system. The next step in the design was simulation of controlled production and consumption of heat and power energy. At the end of this work, the design is compared to a coal and wood boiler that used to be in the house before the installation of the heat pump.

## **Key Words**

Renewable energy sources, biomass, cogeneration, photovoltaic system, control of consumption and production of heat and power, Smart Home, Smart Village.

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí práce Ing. Lence Rakové, PhD. za čas, který věnovala mé diplomové práci, trpělivé vedení a cenné rady.

# Obsah

Úvod.....	- 0 -
1 Biomasa .....	- 1 -
1.1 Druhy biomasy a možnosti jejich využití.....	- 1 -
1.2 Zpracovávání biomasy .....	- 3 -
1.2.1 Spalování biomasy .....	- 3 -
1.2.2 Výroba elektrické energie .....	- 4 -
1.3 Bioplyn.....	- 5 -
1.3.1 Vznik bioplynu .....	- 5 -
1.3.2 Anaerobní fermentace .....	- 6 -
1.3.3 Materiály vhodné pro výrobu bioplynu .....	- 6 -
1.3.4 Druhy bioplynových stanic .....	- 7 -
1.4 Vývoj využití biomasy v České republice.....	- 8 -
1.5 Současný stav a plánovaný vývoj energetického využití biomasy v České republice .....	- 8 -
1.6 Státní či jiné podpory rozvoje využití biomasy.....	- 10 -
2 Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla .....	- 12 -
2.1 Enviromentální dopady provozu kogenerační jednotky .....	- 14 -
2.2 Kogenerační jednotky .....	- 15 -
2.3 Mikrokogenerace.....	- 15 -
2.3.1 Spalovací motory .....	- 17 -
2.3.2 Stirlingův motor .....	- 18 -
2.3.3 Mikroturbíny .....	- 19 -
2.3.4 Palivové články .....	- 20 -
2.4 Trigenerace.....	- 21 -
3 Smart Home a Smart Village.....	- 23 -
3.1 Zhodnocení primárních zdrojů ve Smart Home a Smart Village.....	- 25 -
4 Návrh energeticky soběstačného domu .....	- 27 -
4.1 Výpočet tepelné spotřeby objektu.....	- 28 -
4.1.1 Ilustrativní výpočet pro obývací pokoj .....	- 31 -

4.2	Elektrická spotřeba objektu.....	- 33 -
4.3	Návrh mikrokogenerační jednotky.....	- 33 -
4.4	Návrh fotovoltaického systému.....	- 34 -
5	Logika řízení mikrokogenerační jednotky a simulace.....	- 36 -
5.1	Řízení spotřeby a výroby tepelné energie .....	- 41 -
5.2	Řízení výroby elektrické energie.....	- 46 -
5.3	Řízení spotřeby elektrické energie .....	- 50 -
5.4	Informační panely .....	- 54 -
6	Energetické a ekonomické zhodnocení mikrokogenerační jednotky .....	- 56 -
6.1	Energetické zhodnocení .....	- 56 -
6.2	Ekonomické zhodnocení .....	- 59 -
	Závěr .....	- 61 -
	Literatura.....	- 63 -
	Seznam obrázků:.....	- 68 -
	Seznam tabulek:.....	- 70 -
	Přílohy I .....	I
	Příloha II .....	III



## Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
$C$	Uhlík	
$C_{kond}$	Kapacita	(F)
$C_6H_{12}O_6$	Glukóza	
$CH_4$	Methan	
$CO_2$	Oxid uhličitý	
$CO$	Oxid uhelnatý	
ČR	Česká republika	
ČVUT	České vysoké učení technické	
$D$	Počet denostupňů	(d·K)
$DS$	Distribuční soustava	
$d$	Tloušťka konstrukce	(m)
$d_n$	Počet dnů v topném období	
$E$	Vyrobená elektrická energie	(Wh)
$E_{měsíc}$	Energie za měsíc	(Wh)
$EU$	Evropská unie	
$ERÚ$	Energetický regulační úřad	
$FV$	fotovoltaické	
$FVE$	Fotovoltaická elektrárna	
$H_2$	Vodík	
$HGT$	Hydraulic turbine and governor	
$H_2O$	Voda	
$CH_4$	metan	
$KJ$	Mikrokogenerační jednotka	
$KVET$	Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie	
$L$	Indukčnost	(H)
$LC$	Řídicí systém zátěže a výroby	
$LU$	Lokální uložení energie	
$LZ$	Lokální zdroj	
$M_{pal}$	Objem paliva	(kg/s)
$MCC$	centrální řídicí systém mikrosítě	
$MCFC$	Molten Carbonate Fuel Cells	
$N$	Dusík	
$n_{aku}$	Počet baterií	
$n_h$	Intenzita výměny vzduchu	
$NO$	Oxid dusnatý	
$NO_2$	Oxid dusičitý	
$NO_x$	Oxidy dusíku	
$n_{panelů}$	Počet panelů	
$O_2$	Kyslík	
$OZE$	Obnovitelné zdroje energie	
$P$	Výkon	(W)
$PAFC$	Phosphoric Acid Fuel Cells	
$P_e$	Elektrický výkon	(W)
$P_{el}$	Výkon spotřeby domácnosti	(W)
$P_{FVE}$	Výkon fotovoltaického systému	(W)
$P_{CFVE}$	Výkon fotovoltaického systému	(W)
$PEZ$	Primární energetické zdroje	

$P_t$	Tepelný výkon	(J)
$pt$	Poměrná hodnota tepelného výkonu	(-)
$PVGIS$	Photovoltaic Geographical Information System	
$p_z$	Poměrná hodnota elektrického výkonu	(-)
$P_z$	Výkon zátěže	(W)
$Q$	Teplo	(J)
$Q_i$	výhřevnost	(J/kg)
$Q_j$	Jalový výkon	(var)
$Q_{PC}$	Tepelná ztráta prostupem tepla	(W)
$Q_V$	Tepelná ztráta větráním	(W)
$R$	Tepelný odpor konstrukce	( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )
$R_{SE}$	Tepelný odpor přestupu tepla na vnější straně konstrukce	( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )
$R_{SI}$	Tepelný odpor přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce	( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )
$RC$	Rankin- Clausiův cyklus	
$RED II$	Renewable energy directive II	
$s$	Entropie	( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$S_i$	Plocha ochlazovacích ploch	( $m^2$ )
$\sum S$	Celková plocha všech stavebních konstrukcí	
$SK$	Spalovací komora	
$SO_2$	Oxid siřičitý	
$SOFC$	Solid Oxid Fuel Cells	
$T$	Rok	(h)
$t_1$	Teplota ohřátě vody	( $^{\circ}C$ )
$t_2$	Teplota studené vody	( $^{\circ}C$ )
$t_i$	Vnitřní teplota	( $^{\circ}C$ )
$t_e$	Vnější teplota	( $^{\circ}C$ )
$t_{sL}$	Teplota studené vody v létě	( $^{\circ}C$ )
$t_{sZ}$	Teplota studené vody v zimě	( $^{\circ}C$ )
$TUV$	Teplá užitková voda	
$TZ$	Tepelná zdroj	
$U$	Součinitel přestupu tepla	( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
$V$	Objem místnosti	( $m^3$ )
$V_{pal}$	Objem paliva	( $m^3$ )
$W$	voda	
$ZrO_2$	Oxid Zircinový	
$t_{es}$	Průměrná venkovní teplota	( $^{\circ}C$ )
$d_n$	Počet dnů v otopné sezóně	(dny)
$C_{tp}$	Měrná tepelná kapacita	( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$V_m$	Vnitřní objem místnosti	( $m^3$ )
$V_{2P}$	Denní potřeba vody pro přípravu TUV	( $m^3/\text{den}$ )
$z$	Koeficient energetických ztrát systému pro ohřev TUV	
$Z1$	Zátěž 1	(W)
$Z2$	Zátěž 2	(W)
$Z3$	Zátěž 3	(W)
$Z4$	Zátěž 4	(W)
$Z5$	Zátěž 5	(W)
$\lambda$	Tepelná vodivost materiálu	( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$\rho$	Měrná hustota	( $kg/m^3$ )
$\eta_{KVET}$	Účinnost KVET	(-)

## Úvod

Obnovitelné zdroje zažívají již delší dobu nebývalý rozvoj. Zkoumají se stále nové energetické zdroje, které jsou efektivnější a šetrnější k životnímu prostředí. V rámci decentralizované výroby se hledají mikrokogenerační zdroje na obnovitelná paliva pro vytápění a výrobu elektrické energie pro malé podniky, samostatné domy, skupiny domů či malé vesnice i části měst. Zjišťují se náklady na výstavbu, náklady na provoz, stabilitu a nepřetržitost dodávky tepelné a elektrické energie. Dále se vyhodnocují ekologické aspekty těchto zařízení v porovnání s velkým energetickým zdrojům.

Jedním z cílů práce je představit možnosti energetické využití biomasy na výrobu elektrické a tepelné energie. Dále je nastíněna možnost použití primárních zdrojů v takzvané chytré domácnosti (Smart Home) a v chytré vesnici (Smart Village). V praktické části je cílem práce navrhnout soběstačný dům s mikrokogenerační jednotkou ve spolupráci s dalším energetickým zdrojem. Práce obsahuje také simulace řízení výroby a spotřeby elektrické a tepelné energie, které mohou pomoci k úspoře energetických a ekonomických zdrojů. Posledním cílem práce je zhodnocení nákladů na pořízení a provoz mikrokogenerační jednotky na bioplyn v porovnání s tepelným čerpadlem a kombinovaným kotlem na dřevo a uhlí používaným ve vybraném objektu před tepelným čerpadlem.

# 1 Biomasa

Biomasa je organická hmota, která vzniká při procesu fotosyntézy. Můžeme ji také brát jako uloženou energii ze Slunce v rostlinách. Biomasu můžeme rozdělit do dvou skupin na odpadní a záměrně pěstovanou. Využití biomasy lze na ohřev teplé vody, výrobu elektrické energie nebo zpracováním na kvalitnější paliva. Způsobů, jak lze biomasu zpracovat na kvalitnější palivo je několik. Základní dělení je na suché, mokré, fyzikální a chemické procesy. Suchý proces představuje spalování, pyrolýzu a zplynování. Mokrý proces představuje alkoholové a metanové kvašení. Fyzikálním procesem se nejčastěji rozumí mechanická úprava biomasy (štípání, drcení). Chemickými procesy jsou kompostování, anaerobní fermentace, výroba olejů. [1], [3]

## 1.1 Druhy biomasy a možnosti jejich využití

V České republice se nachází asi 500 tisíc hektarů půdy, která je vhodná pro zemědělskou výrobu a je možné zde pěstovat biomasu. Za zvyšováním státní podpory na využití energie z biomasy přispívá i trend decentralizované výroby elektrické a tepelné energie. Decentralizací výroby se mohou snížit vysoké náklady na dopravu energií a s tím související přenosové ztráty, které mohou kompenzovat vyšší náklady na nákup obnovitelných zdrojů. Výhodou je neutrální bilance CO<sub>2</sub> při spalování, jelikož uvolněné množství odpovídá množství, jež rostlina za svůj život do sebe navázala. Nevýhodou jsou větší náklady na zpracování (vysoušení, transport, úprava) v porovnání s fosilními palivy.

Rostliny vhodné pro pěstování k energetickým účelům se v České republice dělí na dřeviny a byliny. Byliny neboli nedřevnaté rostliny můžeme dělit na jednoleté, víceleté a vytrvalé. Jejich největší výhodou je, že se po jejich vypěstování může na stejném místě pěstovat potravinářská rostlina. Mezi zástupce jednoletých řadíme laskavec, konopí seté, hořčice sarepská. Mezi víceleté rostliny řadíme jeřabinu východní, šťovík krmný, sléz vytrvalý. Další skupinou jsou energetické traviny, mezi jejichž zástupce patří sveřep bezbranný, sveřep horský a kostřava rákosovitá. Jednotlivé traviny se od sebe liší potřebou vody, odolností proti škůdcům a chorobám. Dřeviny pěstované k energetickým účelům jsou zvláště skupiny rychle rostoucích dřevin. Tyto dřeviny jsou odlišné především významným hmotnostním přírůstkem oproti ostatním dřevinám. Mezi nejznámější rychle rostoucí dřeviny spadají topoly, vrby, olše a osiky. Tyto dřeviny se pěstují většinou v místech s mírným podnebím, kde nehrozí poškození dřevin mrazem. Mohou se pěstovat i v místech, kde je omezeno pěstování potravinářských plodin. [1], [2]

Mezi další vhodnou biomasu pro energetické účely můžeme zařadit i odpadní biomasu. Za odpadní biomasu se pokládá především odpad z živočišných a rostlinných výroben a z těžby dřeva. Mezi zástupce odpadní biomasy rostlinného typu patří kukuřičná, obilná a řepková sláma, mezi živočišnou biomasu řadíme zbytky z chovatelských závodů.

Biomasa se odlišuje od ostatních paliv několika důležitými vlastnostmi. První důležitou vlastností je obsah vody. Před uskladněním se musí vysušit a uskladnit v takových prostorách, kde nebude hrozit, že biomasa do sebe vtáhne zpátky vodu. Čím vyšší obsah vody biomasa obsahuje, tím spotřebuje větší podíl spalného tepla, čímž se snižuje výhřevnost a může zapříčinit nestabilitu spalování. Výhřevnost různých druhů biomasy je uvedena v Tab.1.1, kde se nachází i podíl obsažené vody v některých druzích paliva. Dále v této tabulce najdeme výhřevnost vybraných fosilních paliv. [1], [2]

Tab. 1.1: Tabulka druhů paliv a jejich parametry [4], [2]

<b>Druh paliva</b>	<b>Výhřevnost <math>Q_s</math> (MJ/m.j.)</b>	<b>Při obsahu vlhkosti (% hm)</b>
<b>Hnědé uhlí</b>	30,4	-
<b>Koks</b>	33	-
<b>Dřevo - kusové</b>	19,8	14,4
<b>Brikety</b>	17,54	7,42
<b>Štěpka</b>	9,84	7,42
<b>Obilná sláma</b>	15,46	10
<b>Řepková sláma</b>	15,9	5,56
<b>Pelety</b>	15,46	10
<b>Pšeničná sláma</b>	15,58	13,01
<b>Slunečnicové slupky</b>	24,05	5,22
<b>Benzín</b>	45,7	-
<b>Bionafta</b>	38,2	-
<b>Zemní plyn</b>	39,8	-
<b>Metanol</b>	19,23	-

Další vlastností biomasy je velký obsah prchavých hořlavin (70 - 85 %), které se spalují v horních částech spalovacích komor, kam je důležité přivádět vzduch pro dobré spalování. Biomasa obsahuje zanedbatelné množství síry, naopak může obsahovat množství chlóru,

flóru a těžké kovy, které jsou špatné pro životní prostředí a mohou způsobovat i koroze částí spalovacího zařízení. Uhlí má oproti biomase relativně velkou měrnou hustotu a konzistentnost. [2]

## 1.2 Zpracovávání biomasy

Pro sklizeň nedřevnaté biomasy se používají sekačky, řezačky, kombajny. Pro sklizeň dřevin se používají motorové pily nebo těžká technika (harvestor, traktory, vyvážecí technika). Pokud se biomasa bude využívat k přímému spalování, vysušuje se a následně se pomocí balíkovacích, peletovacích, briketovacích lisů nebo pomocí drtiče upraví na požadované rozměry. [6]

Další možností je karbonizace biomasy. Karbonizace je známá už velmi dlouho, jedná se o výrobu uhlí za dodání tepelné energie bez přístupu tepla. Zde se nejčastěji jako zdroj biomasy používají dřeviny. Druh použité dřeviny ovlivňuje drobnost vzniklého uhlí. Dříve se uhlí vyrábělo v milířích a nedokonalých karbonizačních pecích, kde docházelo k únikům škodlivých látek do ovzduší. V dnešní době se používají retorty a karbonizační pece na principu suché destilace. Oproti předešlým typům se do retorty dodává tepelná energie zvenčí a ohřívá obálku retorty, tím se zamezí úniku škodlivých látek do ovzduší. [2]

Zplynování biomasy je termochemická přeměna, kdy se biomasa v kterémkoliv skupenství přemění pomocí tepelné energie na energetický plyn. Zplynování můžeme rozdělit na čtyři části. První částí je sušení, druhou částí je pyrolýza, třetí částí je redukce a čtvrtou oxidace. Při pyrolýze dochází k uvolňování plynu z biomasy při jejím zahřívání bez přítomnosti zplynovacích médií jako je kyslík, oxid uhličitý nebo vodní pára. [5]

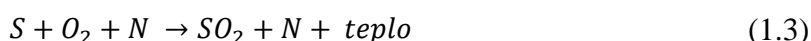
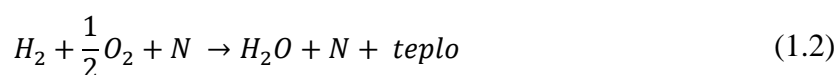
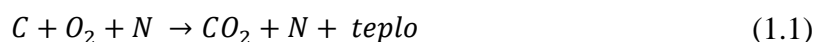
Do kapalné formy se biomasa upravuje pomocí chemicko-fyzikálního procesu. Tím lze vytvořit olej vhodný pro použití do upravených spalovacích motorů. Pro výrobu kapalné biomasy se používají olejnaté rostliny. Ze semen se pomocí lisů získá asi 50 % oleje obsaženého v rostlinách. Následně se zbytek oleje získá pomocí rozpouštědla v extraktoru, kam se dopraví rozdrcené rostliny. [5]

### 1.2.1 Spalování biomasy

Spalováním biomasy pro ohřev teplé vody se nejvíce využije energetický potenciál uložený v biomase, hlavně pokud se zdroj biomasy nachází blízko spalovacího místa (do vzdálenosti desítky kilometrů). Pokud se jedná o celé kusy dřeva, je možné je spalovat kusově, ale s nutnou úpravou pomocí řezání a štípání, aby se tyto kusy vešly do konkrétního kotle. Existují i automatické kotle, které potřebují na svůj provoz pelety. Pelety se vyrábějí

z organického materiálu, který se nadrtí a poté se protlačuje lisem přes matrici. Při protlačování přes matrici se může hmota zahřát až nad teplotu 100 °C. [1]

Při spalování dochází k chemickému procesu, kdy se hořlavé prvky spojují s kyslíkem a vzniká teplo. Při skutečném spalování dochází ke slučování hořlavých prvků se vzduchem nikoli pouze s kyslíkem (vzduch obsahuje navíc dusík), takže výsledné spalovací rovnice jsou následující: [2]



Kde:

$C$  – Uhlík

$N$  – Dusík

$O$  – Kyslík

$H$  – Vodík

$S$  – Síra

Dusík se nepodílí na reakci, ale v kouřových odpadních plynech reaguje s kyslíkem a vznikají škodlivé látky (NO, NO<sub>2</sub>). Pro výpočet výhřevnosti a potřebného množství vzduchu se využívají molekulové hmotnosti jednotlivých prvků (jednotka je kilomol). Po dosazení molekulové hmotnosti jednotlivých prvků do spalovacích rovnic získáme výhřevnost při spálení čistého uhlíku (33,8 MJ/kg), vodíku (120 MJ/kg) a síry (9,25MJ/kg). [2]

### 1.2.2 Výroba elektrické energie

Přeměnit biomasu na elektrickou energii lze dvěma způsoby. Prvním je spalování suché hmoty. Protože biomasu můžeme velmi těžko rozdrtit na velmi malé částice jako například uhlí, které se rozemele na prášek o velikosti zrn 1 mm, musíme používat fluidní kotle, ve kterých hoří palivo ve vzosu. Velikost částic má vliv na horší vysoušení a pomalejší spalování. Vlivem velkého množství těkavých hořlavých látek s rozdílnou teplotou zplynování se mohou neustále měnit podmínky pro optimální hoření (spalování). Z těchto důvodů je biomasa méně kvalitním fosilním palivem, což má za důsledek nižší výkon kotle v řádu desítek procent (okolo 75 %). Druhým způsobem je přeměnit biomasu na bioplyn,

který se využije jako palivo do motorového agregátu. Biomasa se přeměňuje na bioplyn pomocí anaerobní fermentace (pomocí mikroorganismů). Bioplyn se převážně skládá z metanu (okolo 50 %) a oxidu uhličitého (40 %) a ostatní plyny závisí na použitém typu vstupní biomasy a použité fermentaci. [1]

### 1.3 Bioplyn

Budování nízkopotencionálních energetických zdrojů, mezi něž patří i bioplynová stanice, může pomoci k omezení škodlivých plynných emisí z organických materiálů, které se dostávají do ovzduší, a ještě mohou být využity k energetickým účelům. Výrobní metoda, která se využívá v bioplynových stanicích, se nazývá anaerobní fermentace organických materiálů. Existují tři hlavní důvody, pro využívání této metody. První u nich je důležitý pouze pro zemědělské podniky, jelikož anaerobní fermentací vzniká hnojivo, a pokud ho podnik dokáže využít a nechce ho prodávat, nemusí se řídit legislativním zákonem č. 156/1998 o hnojivech. Dalším důvodem může být právě energetické využití bioplynu pro vlastní spotřebu, nejlépe v kogenerační nebo mikrokogenerační jednotce, pomocí které můžeme snížit spotřebu elektřiny odebíranou ze sítě. Posledním hlavním důvodem může být ochrana či zlepšení životního prostředí, kdy rostliny spotřebují stejné množství oxidu uhličitého, které se uvolní jejich spálením. [2]

#### 1.3.1 Vznik bioplynu

Bioplyn vzniká za pomoci metanogenních, acetotrofních a hydrogenotrofních mikroorganismů. Skládá se především ze dvou hlavních plynných částí: metanu a oxidu uhličitého. Složení bioplynu není ovlivněno pouze procesem přeměny ale i použitým materiálem, podílem vlhkosti a teplotou prostředí. Pro anaerobní mikroorganismy je i sebemenší množství kyslíku jedovaté, nicméně v symbióze s aerobními organismy, které zajišťují vhodné podmínky, dokážou přežít. [3]

Proces, při kterém se tvoří bioplyn, se nazývá těž metanová fermentace a za určitých podmínek probíhá v přírodě samovolně nebo je účelně vyvoláván v biotechnických zařízeních. Podle složení a místa vzniku existují různé druhy energeticky využitelných plynů:

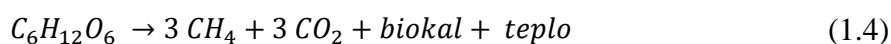
- Zemní plyn je označení pro plyn vzniklý v dávných dobách biologickým rozkladem biomasy a obsahuje největší podíl metanu (98 %). Je však považován za neobnovitelný zdroj.
- Důlní plyn vznikl velmi podobně jako zemní plyn, ale díky své velmi vysoké výbušnosti s kyslíkem nemá žádné energetické využití.



- Kalový plyn vzniká u dna oceánů, moří, jezer nebo umělých nádrží pomocí anaerobního rozkladu usazenin. Chemické složení je velmi rozdílné a záleží na podmínkách, kde vznikl.
- Skládkový plyn se tvoří na skládkách, jeho povrchové shromažďování je velmi nebezpečné, proto je doporučováno jeho energetické využití nebo likvidace pomocí bezpečnostního hořáku.
- Bioplynem můžeme označovat všechny druhy plynů vzniklých pomocí mikroorganismů. V technické praxi se pojem bioplyn používá pro plyn vzniklý anaerobní fermentací vlhkých organických látek, které se vyrábí v technických zařízeních vybudovaných pro tento účel. [3]

### 1.3.2 Anaerobní fermentace

Anaerobní fermentace je velmi složitý chemický proces, který se skládá z mnoha fází. Pro zjednodušení můžeme tento proces rozdělit pouze do čtyř základních fází. První je hydrolýza, kdy ještě prostředí není bez kyslíku a ke spuštění své činnosti potřebuje velmi vysoký obsah vlhkosti (více než 50 % hmotnostního podílu). Hydrolytické mikroorganismy rozkládají polymery na monomery. V další fázi procesu, nazývané acidogeneze, dochází k tvorbě bezkyslíkatého prostředí pomocí speciálních anaerobních mikroorganismů. V předposlední fázi procesu dochází k tvorbě kyseliny octové, vodíku a oxidu uhličitého. V poslední fázi procesu dochází především k tvorbě metanu a oxidu uhličitého z kyseliny octové pomocí metanogenní acetotrofní bakterie a hydrogenotrofní bakterie se přeměňuje vodík s oxidem uhličitým na metan. Příklad rozkladu glukózy pomocí anaerobní fermentace je popsán v rovnici 1.4 a v rovnici 1.5 je zisk energie z jednoho kilogramu biomasy. [2], [3]



$$1 \text{ kg} \rightarrow 0,25 \text{ kg} + 0,69 + 0,4 \text{ kg} + 0,38 \text{ kJ} \quad (1.5)$$

Na rozdíl od aerobního procesu vzniká při anaerobním procesu bioplyn a méně tepla a kalu. [3]

### 1.3.3 Materiály vhodné pro výrobu bioplynu

Materiály pro výrobu biopaliv by měly mít co nejmenší obsah anorganických látek a co největší obsah organických látek s vysokým obsahem rozložitelného obsahu. Dalším

důležitým parametrem je obsah sušiny, kdy optimální obsah sušiny je pro pevné odpady v rozmezí mezi 22 až 25 % a v případě tekutých odpadů v rozmezí mezi 8 až 14 %. Při velmi malém obsahu sušiny je pravděpodobné, že bude potřeba ke správnému zpracování odpadu na bioplyn dodat tepelnou energii. Vhodnost použití materiálu pro výrobu bioplynu se hodnotí i poměrem dusíkatých a uhlíkatých látek v materiálu. Jako ideální je považován poměr uhlíku k dusíku 30:1. V praxi toho docílíme mícháním různých materiálů. Materiál by neměl obsahovat příměsi, které potlačují mikrobiální rozvoj (jako jsou především léčiva). Materiál může být také znehodnocen při špatném nebo dlouhém skladování nebo špatné manipulaci, kdy dojde k vytvoření kompostu. [3]

#### **1.3.4 Druhy bioplynových stanic**

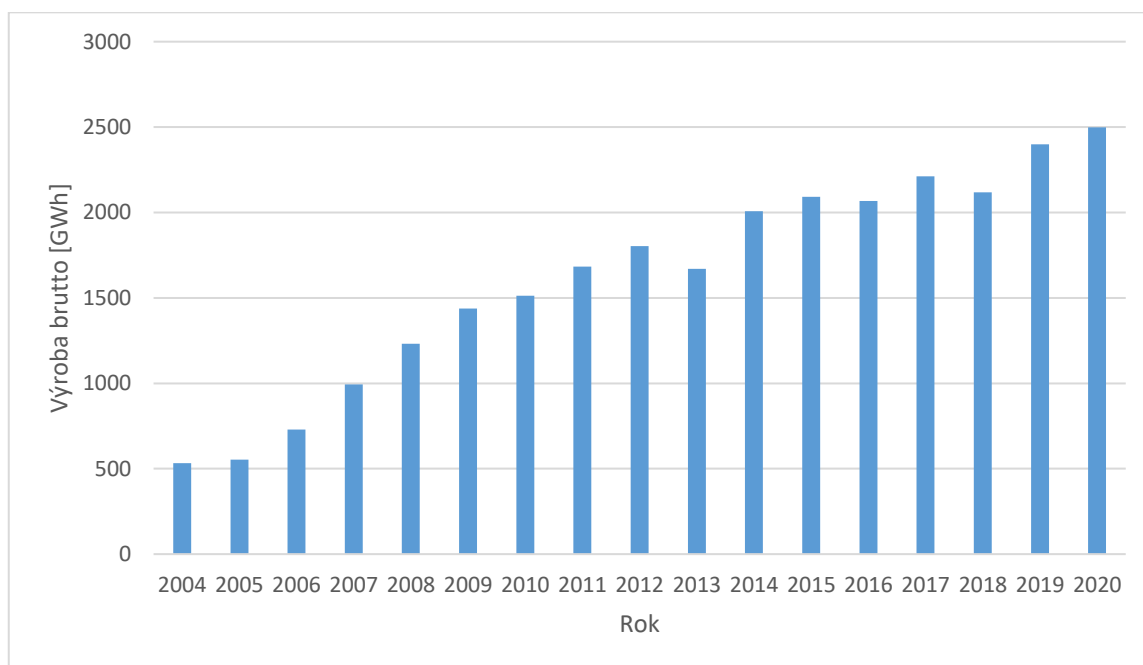
Bioplynové stanice se dělí podle dávkování materiálu vhodného pro výrobu bioplynu. Rozdělují se na diskontinuální, semikontinuální, kontinuální. Při diskontinuální technologii dochází k dávkování materiálu při dokončení jednoho cyklu ve fermentoru. Tato technologie je vhodná zvláště pro suchou fermentaci. U semikontinuální technologie probíhá dávkování materiálu do fermentoru vícekrát za pracovní cyklus fermentoru, jelikož se při této technologii používají tekuté organické materiály, které neovlivňují zásadně pracovní parametry fermentoru. Při kontinuální technologii probíhá přísun materiálu nepřetržitě, a proto se používají materiály s nízkým obsahem sušiny. [3]

Bioplynová stanice se skládá z pěti hlavních částí. První částí je sklad organického materiálu, kde musí před uskladněním být zaevidováno, o jaký druh biomasy se jedná. Druhou částí je úprava organického materiálu. Zde se mohou oddělovat hrubé nečistoty, či může probíhat ředění vodou nebo předehřívání. Třetí část bioplynové stanice, která je z hlediska výroby bioplynu nejdůležitější, se nazývá anaerobní reaktor. Anaerobní reaktory mohou být tvaru laguna, válcové, pravoúhle hranolovité, kulové nebo polokulové. Laguna je nejjednodušším typem reaktoru, ale má velmi nízkou intenzitu výroby metanu. Nejpoužívanějším typem reaktoru je válcový, který může být buď nadzemní, nebo může být vnořený z části do země. Ke konstrukci reaktorů se používají nejčastěji stavební, kovové nebo plastové materiály. Vytvořený bioplyn následně putuje přes bioplynovou koncovku do zásobníku. Součástí bioplynové koncovky jsou bezpečnostní zařízení proti zpětnému zahoření plynu, dmychadlo, regulační a kontrolní prvky. Materiál, který již nelze využít k výrobě bioplynu, putuje do kalové koncovky. Kalová koncovka se skládá z dopravních čerpadel, armatur, separačních zařízení pro oddělení vody od tuhých částí. Součástí koncovky může být i chemické čištění biologického odpadu. Tato úprava ale zvyšuje

mnohonásobně cenu, takže se někdy čištění neaplikuje tuhá substance se použije jako hnojivo. [3]

#### 1.4 Vývoj využití biomasy v České republice

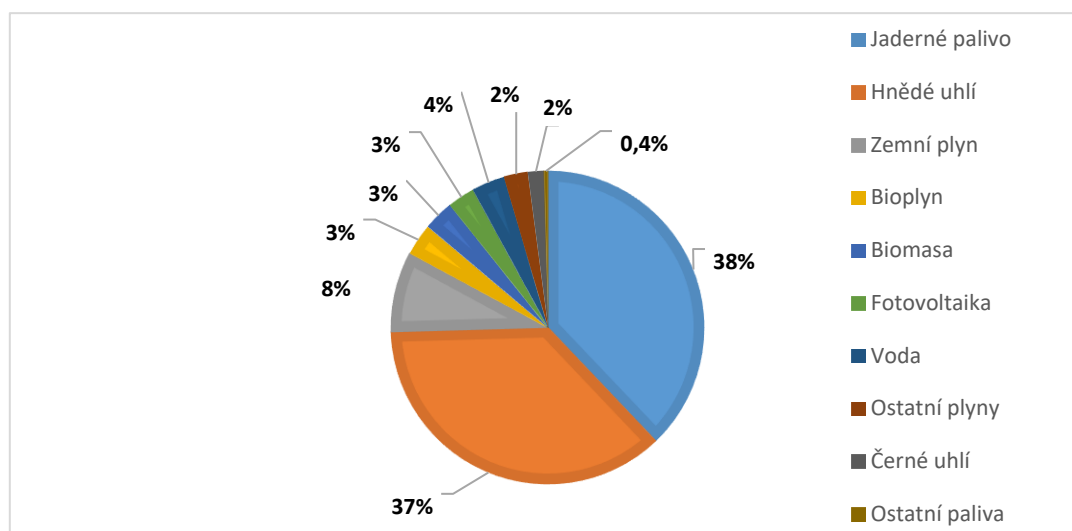
K energetickým účelům se používá stále více biomasa. V roce 2004 bylo z biomasy vyrobeno 500 GWh elektrické energie (0,77 % z celkové vyrobené elektrické energie), jak je možno vidět na Obrázku 1.1. Snížení výroby z biomasy v některých letech může být způsobeno vyřazováním zdrojů z důvodu stáří či odstávky na údržbu nebo technologickou inovací pro zlepšení účinnosti zdroje. V posledních letech se podíl biomasa na výrobě elektrické energie přes 2 300 GWh což jsou 3 % z celkové vyrobené energie.[6]



Obrázek 1.1: Vývoj biomasy v České republice [6]

#### 1.5 Současný stav a plánovaný vývoj energetického využití biomasy v České republice

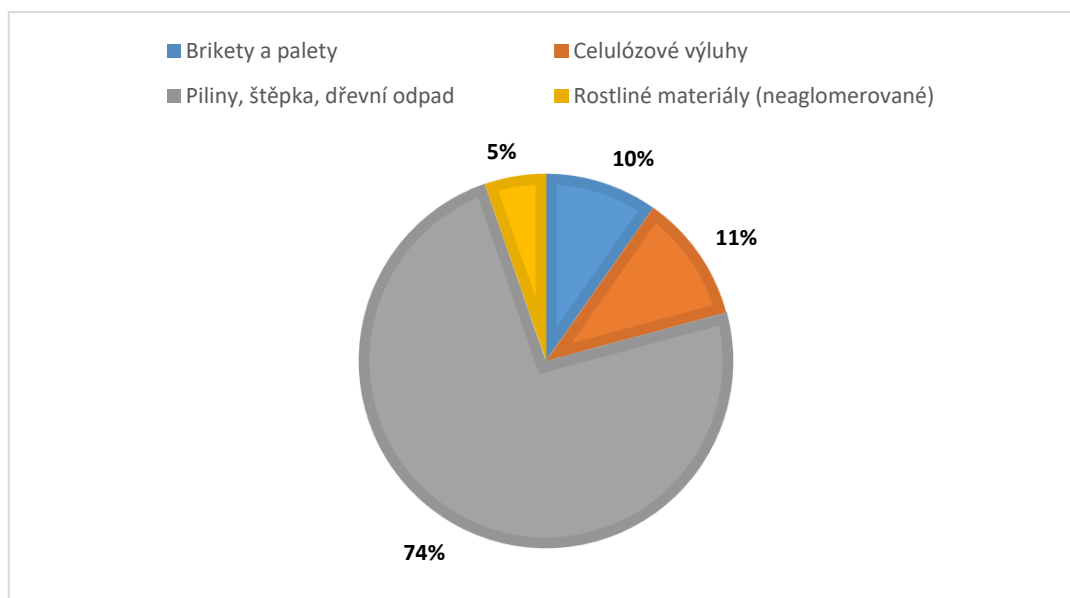
V České republice bylo v roce 2020 vyrobeno 81 443,4 GWh elektrické energie, z toho největší podíl mělo hnědé uhlí a jaderné palivo. Obnovitelné zdroje se na výrobě elektrické energie podílely z 13 %, z toho biomasa tvořila 3 %. Podíl jednotlivých druhů paliv je vyobrazen na Obrázku 1.2. [6]



Obrázek 1.2: Podíl jednotlivých druhů paliv na výrobě elektrické energie v roce 2020 [6]

Z hlediska biomasy pocházela přibližně polovina vyrobené elektřiny ze zpracování dřeva (piliny, štěpka, kůra). Následovaly s 37 % celulózové výluhy. Zbytek energie z biomasy pochází z palivového dřeva a rostlinných materiálů. [6]

V roce 2020 bylo v České republice dodáno 85 928,5 TJ tepla. Největší podíl na celkové dodávce tepla zaujímá hnědé uhlí (44 %) a zemní plyn (27 %). Biomasa se podílí na dodávce tepla 9 %. Na Obrázku 1.3 je vyobrazen podíl jednotlivých druhů biomasy na dodávce tepla. Na kombinované výrobě elektrické a tepelné energie se biomasa v roce 2020 podílela 17 %. [8]



Obrázek 1.3: Podíl jednotlivých druhů biomas na dodávce tepla v roce 2020 [7]

Státy evropské unie schválily 14. července 2021 směrnici o využívání a podpoře obnovitelných zdrojů (RED II). Tato směrnice stanovuje cíl, aby podíl obnovitelných zdrojů v roce 2030 byl na hrubé spotřebě energií 40 % v rámci celé Evropské unie. Oproti předchozím schváleným plánům pro zvyšování podílu energií z OZE do roku 2020 se nastavované cíle zaměřily pouze na celkový podíl OZE z EU a nenastavují požadavky (cíle) jednotlivých členských států. Pokud by byla nastavena stejná kritéria jako do roku 2020, musela by Česká republika v roce 2030 mít podíl 22 % z obnovitelných zdrojů energií. [9], [10], [11]

Ministerstvo zemědělství ČR s ohledem na rok 2030 kalkuluje se zvýšením energetického využití zemědělské biomasy o zhruba 20 %, pokud bude zachována strategická zemědělská výroba pro potravinářský průmysl. Zemědělská půda se nejdříve využívá pro pěstování potravin pro lidskou společnost a krmiv pro hospodářská zvířata. Tento požadavek může být ovlivněn úbytkem zemědělské půdy vlivem pěstování erozivních plodin či změnami klimatu. Plocha použitelné půdy pro pěstování energetické biomasy do roku 2030 proto může buď stagnovat, nebo pouze velmi málo růst. S ohledem na tyto skutečnosti se spíše předpokládá rozvoj produkce biometanu nebo záměnu cíleně pěstované biomasy do bioplynových stanic za biologicky rozložitelný odpad či biologicky rozložitelný komunální odpad. Z hlediska dřevní biomasy se počítá do roku 2030 s velkou mírou kolísání v závislosti na škůdcích, kalamitách. [12]

## **1.6 Státní či jiné podpory rozvoje využití biomasy**

Evropská unie i Česká republika se snaží snížit dopady globálního oteplování, zejména snížením znečištění ovzduší. K tomuto účelu existují různé dotační programy, které mají za cíl snížit rozdíl ceny spalování levnějších fosilních paliv a dražších nízko emisních paliv, mezi které patří i biomasa. Výše dotací byla dříve stanovena přímo v zákonech. Novela zákona z roku 2018 měla za úkol tento zákon upravit a nastavit, jak se má podpora stanovovat. Výši podpory stanovuje Energetický regulační úřad (ERÚ). Pro bioplynové stanice se kompenzace stanovuje podle rozdílných nákladů na výrobu elektrické energie a tržní ceny elektrické energie. Dotace na podporu výroby elektrické energie z OZE je zpravidla poskytována na dobu 20 let. Podporovány jsou hlavně lokální výroby elektrické nebo tepelné energie z důvodu jejich efektivnosti. Na podporu pro udržení zdroje v provozu mohou dosáhnout pouze zdroje, které mají určitou minimální účinnost stanovenou v právních předpisech. [13], [12]

Novela evropské směrnice o obnovitelných zdrojích z 14. července 2021 zakazuje státní podporu výroben elektrické energie z lesní biomasy od roku 2026. Novela také snižuje hranici velikosti výroby z 20 MW na 5 MW, která musí být kontrolována, pokud bude chtít získat státní podporu. Hranice pro bioplynové stanice zůstala na 2 MW. Další neméně důležitou změnou je povinnost 70 % úspory skleníkových plynů oproti fosilním palivům pro výroby na biomasu do 31. prosince 2025. Od roku 2026 musí všechny provozované výroby na biomasu splňovat 80 % úsporu skleníkových plynů oproti fosilním palivům.

Ministerstva průmyslu a obchodu, životního prostředí a zemědělství mají několik programů na podporu obnovitelných zdrojů, snížení energetické náročnosti a podporu pěstování energetické biomasy. [14], [11]

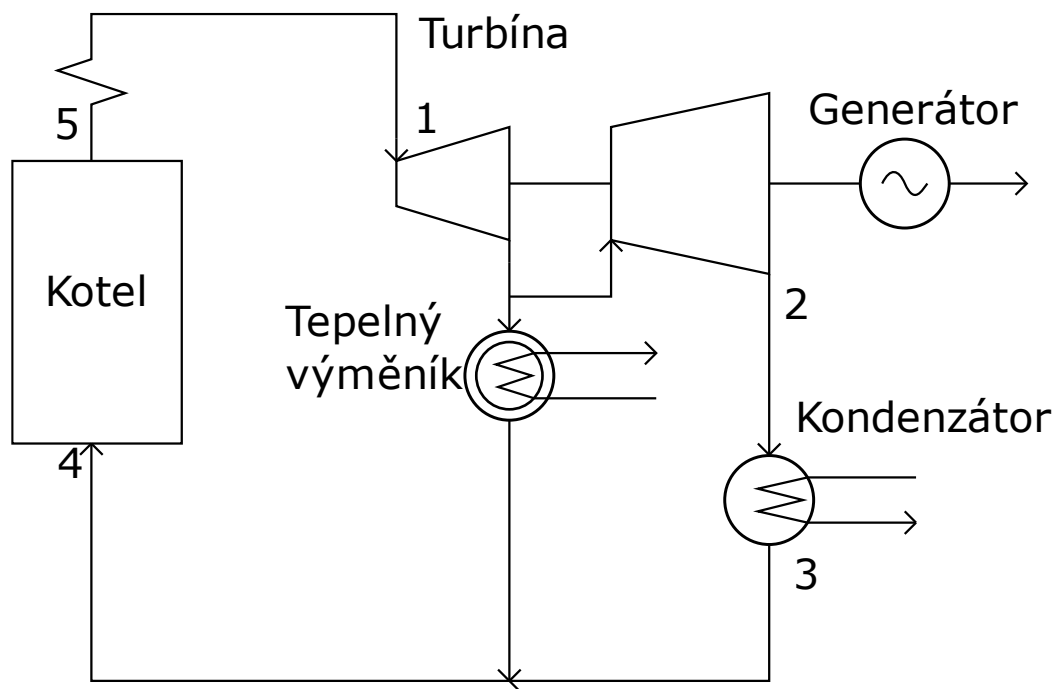
Ministerstvo zemědělství má dotační program na nahrazování části pohonných paliv biopalivy. Od 1. června 2010 je v motorovém benzínu biosložka o celkovém objemu 4,1 %. Motorová nafta má tento podíl od stejného data ve výši 6 %. [15], [16]

Mezi programy, které podporují úspory energií a obnovitelné zdroje v rodinných a bytových domech na území ČR patří převážně program Nová zelená úsporám pod ministerstvem životního prostředí. V rámci tohoto programu lze vyměnit neekologické kotle nižší než 3. třídy například i za kotel na biomasu. Žadatel o dotace musí splňovat podmínku vlastnictví, nebo spoluvlastnictví nemovitosti na kterou žádá dotace. Při splnění této podmínky může dostat podporu od 30 000 Kč do 100 000 Kč v závislosti na typu kotle a akumulacním zařízením. [17]

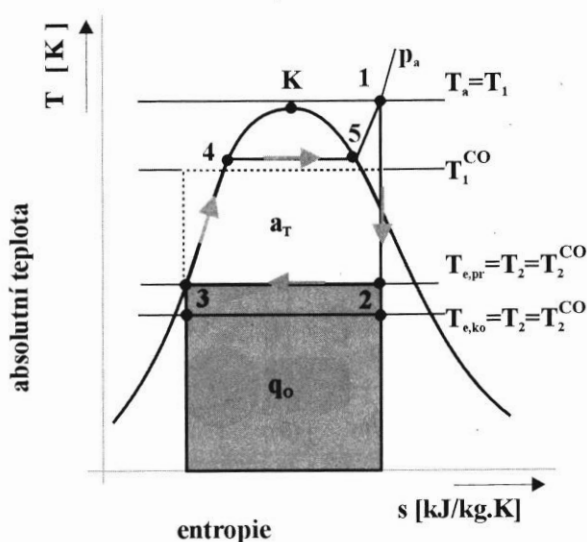
## 2 Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla

Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie (KVET) neboli kogenerace je současná výroba elektrické a tepelné energie. Existuje i případ, kdy pomocí tepelné energie odebíráme jinému médiu teplo a tím získáváme dodávku chladu. Tento systém se nazývá trigenerace. [19]

Zařízení, kde probíhá kogenerace, se nazývá nejčastěji kogenerační nebo teplárenská jednotka. Kogenerační nebo teplárenská jednotka může mít jeden či dva transformační řetězce. Při jednom transformačním řetězci vyrábíme mechanickou a tepelnou energii v jednom tepelném oběhu. Jednotka skládající se ze dvou transformačních okruhů se nazývá kombinovaná kogenerační jednotka. Dochází zde v prvním tepelném okruhu k výrobě elektrické energie (nejčastěji plynovou turbínou). Spaliny následně ohřívají médium v druhém tepelném okruhu (nejčastěji se zde používá parní turbína). Druhý tepelný okruh také vyrábí elektrickou energii, dodávka tepla může být provedena pomocí prvního či druhého tepelného okruhu. Na Obrázku 2.1 je znázorněn parní RC okruh s protitlakou parní turbínou s jedním transformačním řetězcem. Velikost dodávky elektrické energie v kombinované výrobě závisí na dodávce teplé užitkové vody. Čím větší je požadavek na dodávku teplé vody, tím se zmenšuje zisk elektrické energie. [4]



Obrázek 2.1: Schéma kombinované výroby elektrické energie a tepla s protitlakovým parním okruhem [4]



Obrázek 2.2: T-s diagram Rankinova tepelného oběhu [5]

Na Obrázku 2.2 je znázorněn T-s diagram Rankinova tepelného oběhu, kdy teplota  $T_{e,ko}$  je pro tepelný okruh s kondenzační turbínou, která vyrábí především elektrickou energii a zbytkové teplo se už nedá využít pro vytápění.  $T_{e,pr}$  je hodnota teploty která jde z protitlaké nebo odběrové turbíny, která vyrábí méně elektrické energie než kondenzační turbína, ale pracovní látka má ještě takové parametry, které se mohou využít pro teplou užitkovou vodu.

Elektrickou energii lze oproti tepelné energii využívat nebo přeměňovat na jinou formu energie jednodušeji. Tepelná energie se transformuje velmi levně a jednoduše z primárních energetických zdrojů (PEZ) nejčastěji do horké užitkové vody, mnohdy je transformována právě na elektrickou energii pomocí druhého termodynamického zákona. Tato transformace má bohužel jen velmi malou účinnost (okolo 35 %), zbývající energie se odvádí do okolí elektrárny (výrobní jednotky) pomocí chladicího okruhu a spalin (ve kterých se vyskytují i škodlivé látky). Účinnost transformace pouze do tepelné energie je okolo 85 %. U kombinované výroby elektrické a tepelné energie je účinnost 80 %. Zvýšení účinnosti vede k menší spotřebě primárních zdrojů a k omezení nepříznivých dopadů při používání těchto zdrojů. Při blízkém umístění této jednotky dojde ke snížení ztrát vzniklé přenosem elektrické energie z elektrizační soustavy. Celková účinnost kombinované výroby se spočítá dle [4] pomocí vztahu 2.1.[5]

$$\eta_{KVET} = \frac{E + Q_{UV}}{Q_{pal}} = \frac{P_E + P_T}{M_{pal} \cdot Q_i} \quad (-) \quad (2.1)$$

$E$  – vyrobená elektrická energie (W)

$Q_{UV}$  – využitá tepelná energie (J)



$Q_{pal}$  – teplo získané z paliva (J)

$P_E$  – elektrický výkon (W)

$P_T$  – tepelný výkon (W)

$M_{pal}$  – objem paliva (kg/s)

$Q_i$  – výhřevnost paliva (J/kg)

Energetické charakteristiky jednotlivých paliv se hodnotí pomocí dobře měřitelných a počítatelných parametrů (spalné teplo, výhřevnost a energetická hustota). Spalné teplo představuje hodnotu tepla získanou dokonalým spálením jednoho kilogramu paliva, kdy spaliny jsou zchlazeny na teplotu okolí a voda obsažená ve spalinách je v kapalném stavu. Výhřevnost je hodnota tepla získaná dokonalým spálením jednoho kilogramu paliva, kde voda obsažená ve spalinách je ve formě páry. Energetická hustota je energie obsažená jednotce hmotnosti paliva. Tento parametr ovlivňuje velikost spalovací komory, skladovacího prostoru paliva. [4]

Pro výpočet výhřevnosti a spalného tepla z tuhých paliv lze dle [4] použít takzvanou svazovou rovnici, vztah 2.2 a rovnice 2.3, kde  $W$  je voda

$$Q_s^{TP} = 339 \cdot C + 1\,440 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 105 \cdot S \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.2)$$

$$Q_i^{TP} = 339 \cdot C + 1\,214 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 105 \cdot S - 25 \cdot W \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.3)$$

Kde:

$Q_s^{TP}$  – Spalné teplo tuhých paliv

$Q_i^{TP}$  – Výhřevnost tuhých paliv

Pro plynná paliva se výhřevnost a spalné teplo využívají dle [4] následující rovnice 2.4 a rovnici 2.5, kde  $V_x$  – objem jednotlivých plynů v 1 m<sup>3</sup> paliva (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>).

$$Q_s^{PP} = V_1 Q_{s1}^{PP} + V_2 Q_{s2}^{PP} + V_n Q_{sn}^{PP} \quad (\text{kJ/m}^3) \quad (2.4)$$

$$Q_i^{PP} = V_1 Q_{i1}^{PP} + V_2 Q_{i2}^{PP} + V_n Q_{in}^{PP} \quad (\text{kJ/m}^3) \quad (2.5)$$

Kde:

$Q_s^{PP}$  – Spalné teplo plynných paliv

$Q_i^{PP}$  – Výhřevnost plynných paliv

## 2.1 Enviromentální dopady provozu kogenerační jednotky

Kogenerační jednotka svým provozem znečišťuje své okolí, a proto je důležité, aby toto zařízení splňovalo normy a vyhlášky vydané jednotlivými ministerstvy. Ekologické dopady

kogenerační jednotky můžeme rozdělit na plynné jedovaté nebo plynné znečišťující látky a tuhé znečišťující látky. Plynné škodlivé látky vznikají při spalování hořlavín v palivu spolu s kyslíkem. Jedná se především o oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ), oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ) a těkavé organické látky. Zástupci tuhých znečišťujících látek jsou saze, popel, uhlovodany či sulfáty. Škodlivé látky nelze nikdy úplně eliminovat, ale lze je alespoň omezit, například pomocí úpravy paliva před transformací, vhodnou volbou technologie transformace energie nebo eliminovat škodlivé látky na výstupu. Parametrem pro porovnávání vyprodukovaných škodlivých látek může být koncentrace škodlivých látek v jednotce objemu paliva nebo poměrné množství vztažené na jednotku vyrobené energie. Dovolené emisní limity, které může zdroj elektrické či tepelné energie vypouštět do ovzduší jsou závislé na velikosti zdroje a také použitým primárním palivu. [4]

### 2.2 Kogenerační jednotky

Kogenerační jednotky (dolní kogenerační systém) transformují energii obsaženou v palivu na elektrickou energii a zbytkovou energii, která se přemění na tepelnou energii pro dodávku tepla. Kogenerační jednotky mohou pracovat na nepřímém či přímém principu přeměny elektrické energie. U nepřímého principu se nejdříve z primárního zdroje získá tepelná energie, která se následně transformuje do mechanické práce. Z mechanické práce je získávána pomocí generátoru elektrická práce. U přímého principu se přeměňuje energie paliva přímo na elektrickou energii. [4]

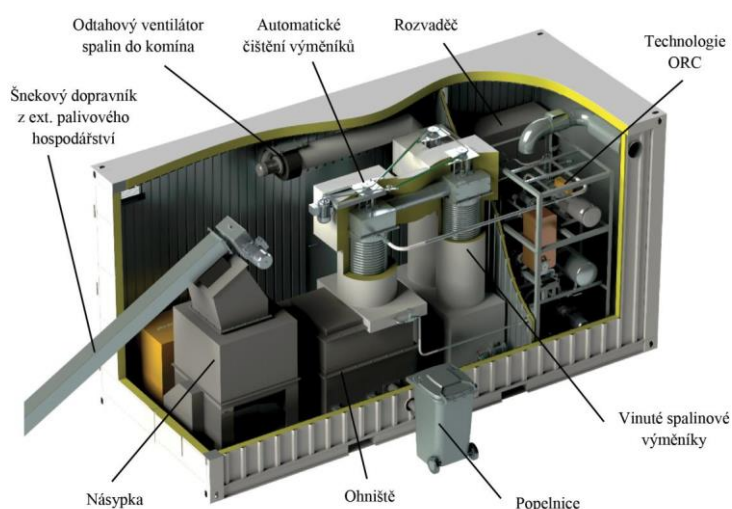
Kogenerační jednotky lze rozčlenit na dvě skupiny: horní a dolní kogenerační systémy. Horní kogenerační systém vyrábí primárně tepelnou energii, která se používá například pro technologické procesy, jako jsou sklářské pece. Až poté je přiváděno teplo do tepelného motoru, kde se získává mechanická energie, která se následně transformuje v generátoru na elektrickou energii. U dolních kogeneračních jednotek, se vyrábí primárně elektrická energie a ztrátové teplo z tepelného oběhu může sloužit jako užitečné teplo. Horní kogenerační systémy se používají velmi málo, protože pro efektivní přeměnu na technickou práci jsou potřeba poměrně velké teploty do tepelného oběhu. [4]

### 2.3 Mikrokogenerace

Pro udržitelnou budoucnost a snížení dopadů globálního oteplování důsledkem používání fosilních paliv se hledají a vyvíjejí nové technologie a zařízení, která budou mít vyšší účinnost a budou ekologicky přívětivé. V oblasti energetiky může být odpovědí na tento problém právě mikrokogenerace. Jako zdroj pro mikrokogeneraci může sloužit zemní plyn,

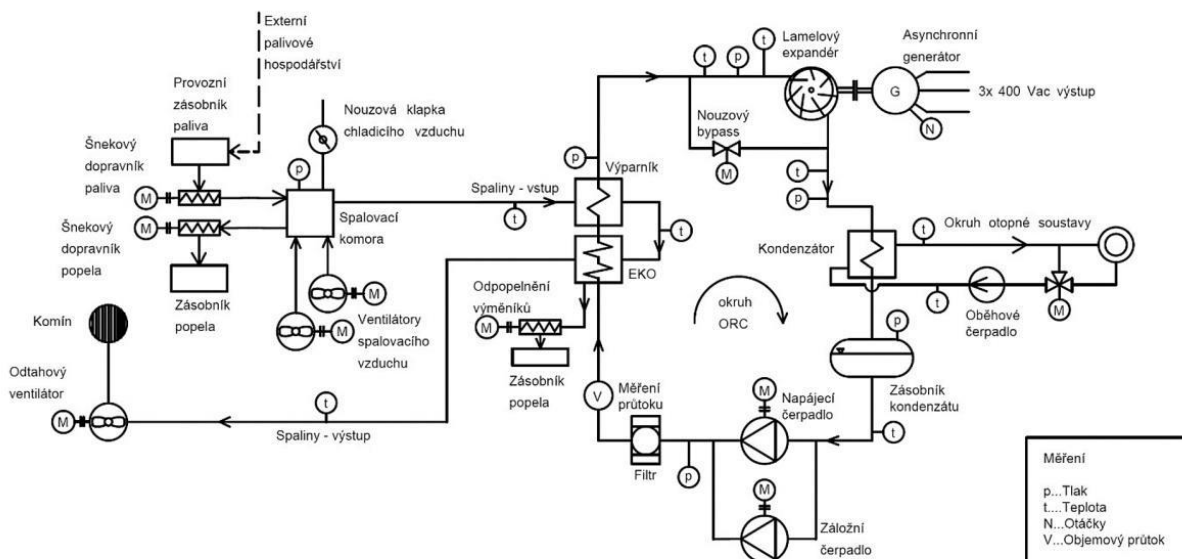
bioplyn, biomasa nebo solární energie. Plánuje se její využití zejména v blízkosti budovy či přímo v ní, mezi požadavky na výrobní jednotku jsou malá prostorová náročnost, nízká hlučnost a nízké vibrace. Mikrokogenerační jednotka se skládá z několika zařízení. Prvním je zařízení pro úpravu paliva. Úpravou může být například zušlechťení paliva. Palivo jde následně do primární jednotky. Primární jednotka přeměňuje energii obsaženou v palivu na použitelnou formu energie (nejčastěji na mechanickou energii). Primární zařízení pohání elektrický motor, který je v tomto případě používán jako generátor a vyrábí elektrickou energii. Další zařízení slouží k úpravě odváděné tepelné energie z primárního okruhu na požadované parametry, aby se dále mohla využít. Nedílnou součástí mikrokogenerační jednotky je řídicí a kontrolní systém. Ten zajišťuje kontrolu a řízení mikrokogenerační jednotky dle zadaných parametrů. [18], [19]

V roce 2008 začala fakulta strojní na ČVUT v Praze s výzkumem mikrokogeneračních jednotek kontejnerového provedení na principu organického Rankinova cyklu, který se i v dnešní době v mikrokogeneračních jednotkách nejvíce využívá. První generace (prototyp) mikrokogenerační jednotky byla uvedena do provozu v laboratoři ČVUT v roce 2010 a měla výkon 20 kW tepelných a 0,5 kW elektrických. Následně byly vytvořeny další prototypy. Získané zkušenosti byly použity ke komerčnímu využití těchto jednotek. První komerční jednotka byla instalována na podzim roku 2018 v Mikolajicích. Jednotka se jmenuje Wave50 (50 kW tepelných, 2kW elektrických) a dodává spolu s fotovoltaickou elektrárnou teplo do obecního úřadu, hasičské zbrojnice a obchodu. Přebytkovou elektrickou energii dodává do lokální mikrosítě. Všechny jednotky generací Wave splňují emisní limity. Poslední generace Wave120 má nominální tepelný výkon 120 kW a elektrický 6,2 kW. Kontejnerové provedení s popisem jednotlivých součástí je vidět na Obrázku 2.3. [20]



Obrázek 2.3: Kontejnerové schéma mikrokogenerační jednotky Wave120 [20]

Jednotka využívá jako pracovní látku silikonový olej (hexamethylendisiloxanu). Technologické schéma je na Obrázku 2.4. [20]



Obrázek 2.4: Technologické schéma Wave120 [20]

Palivo v tomto případě dřevní štěpka putuje ze zásobníku přes šnekový dopravník do spalovací komory. Spaliny putují ze spalovací komory do výměníku, kde předají teplo pracovní látce (silikonový olej). Využité spaliny odcházejí přes ventilátor do komína. Ohřátá pracovní látka jde přes lamelový expandér (roztáčecí generátor) do kondenzátoru, kde kondenzuje a předá své teplo otopné soustavě (vytápění budov či využití tepla pro technologické účely). Zkondenzovaná pracovní látka putuje do zásobníku, ze kterého ji čerpá napájecí čerpadlo zpět do výměníku. [20]

Základní cena zařízení Wave se pohybuje okolo 1,9 milionu Kč. V závislosti na řešení a potřebě ostrovního provozu se může vyšplhat cena mikrokogenerační jednotky až nad 3 miliony Kč bez DPH. [20]

### 2.3.1 Spalovací motory

Spalovací motory se v současné době používají pro mikrokogenerační jednotky nejčastěji. Existují dva druhy spalovacích motorů - vznětové a zážehové motory. Vznětové motory vstříkují do stlačeného vzduchu palivo, čímž dojde k samovznícení. Jejich účinnost je v rozmezí 35 % až 45 %. Jejich výkon se pohybuje od desítek kW po desítky MW. Díky vývoji se snižují emise  $\text{NO}_x$  pomocí zpožděného zapalování a hoření. Zážehové motory

zapalují směs paliva a vzduchu pomocí elektrické svíčky. Jejich účinnost se pohybuje mezi 27 % až 43 %, což je o něco méně, než mají vznětové motory. Využívají se proto pro menší výkony.

V mikrokogenerační jednotce je spalovací motor na jedné hřídeli s generátorem a ten vyrábí elektrickou energii. Při spalování se uvolňuje i tepelná energie, která se pomocí chlazení odvádí z motoru a ohřívá topnou vodu na teplotu okolo 100 °C. Využívá se i teplota výfukových plynů, které mají teplotu okolo 470 °C. Pomocí regeneračního výměníku využívajícího výfukové plyny lze ohřát vodu na více jak 110 °C. Tímto způsobem lze regenerovat až 80 % odváděného tepla. [4], [18]

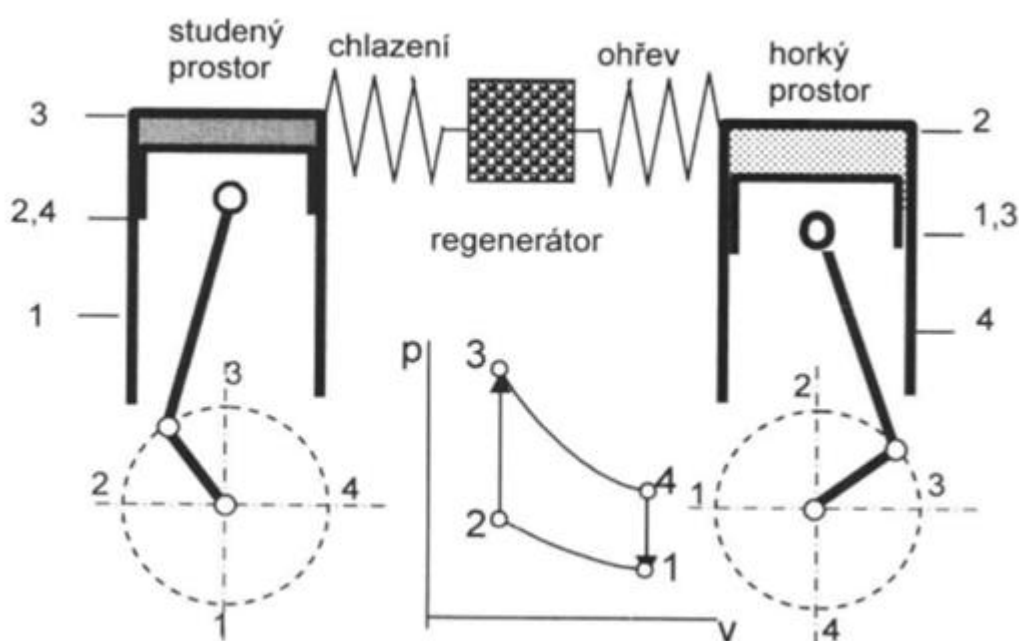
Výhodou spalovacích motorů je možnost jednoduše přebudovat tyto motory tak, aby bylo možné spalovat bioplyn. Mají vysokou účinnost v širokém výkonovém spektru. Další nespornou výhodou je rychlý rozběh na plný výkon, malé investiční náklady a možnost opravit stroj přímo na místě použití. Nevýhodou je množství pohyblivých částí a vysokých teplot. Mazání pohyblivých částí je obtížné a dochází k jejich rychlému opotřebování. Další nevýhodou je nutnost chlazení, pokud nevyužíváme odváděné teplo pro vytápění. Velký hluk při provozu těchto jednotek se musí řešit dobrým odhlučněním. [4]

### 2.3.2 Stirlingův motor

Stirlingův motor si patentoval skotský inženýr Robert Stirling roku 1816. Na začátku 20. století přišel rozvoj zážehového a vznětového motoru a na Stirlingův motor se téměř zapomělo. V posledních několika desítkách let se našlo využití právě v kombinované výrobě elektrické energie a tepla. Motor se skládá ze dvou komor, z nichž je jedna horká a druhá studená. V každé komoře je jeden válec. Pracovní látka se nevyměňuje, ale pouze přemísťuje z jedné komory do druhé. Písty se pohybují synchronně, ale kliky jsou pootočený o 90°. Polohy pístů a klik jsou znázorněny na Obrázku 2.5, kde se jedná o Stirlingův motor typu beta. Na tomto obrázku je znázorněn i regenerátor, který pomáhá ke zvětšení rozdílu mezi chladnou a teplou komorou a k uchování tepla. Jako pracovní látka se nejčastěji používá helium nebo vodík. V bodě 1 na Obrázku 2.5 je pravá komora z poloviny naplněna horkou pracovní látkou, v levé komoře je píst ve spodní pracovní poloze, což je v p-v diagramu znázorněno bodem 1. Při přechodu z bodu 1 do bodu 2 dochází k izotermické kompresi a pracovní látka je přetlačována pravým pístem do levé komory, kde se začíná ochlazovat. Mezi body 2 a 3 dochází k přetlačování látky z chladné komory do teplé komory, kde dochází k předání tepla pracovní látce za konstantního objemu (izochorická komprese). Při přesunu pístů z bodu 3 do bodu 4 dochází k izotermické expanzi a médium zvětšuje svůj

objem a částečně přechází i do chladné komory. Oběh je zakončen při přesunu pístů z bodu 4 do bodu 1 izochorickou expanzí. Do ohříváku se přivádí teplo z vnějšího tepelného zdroje a v chladiči se teplo odvádí, rozdílem převedeného a odvedeného tepla se pak koná práce.

Pracovní tlak těchto motorů se pohybuje v rozmezí od 15 do 20 MPa a maximální pracovní teplota může být až 730 °C. Tyto vysoké parametry dovolují dosahovat účinnosti až 33 % u výkonů od 8 kW do 25 kW. Výhodou Stirlingova motoru je účinnost, spolehlivost, nízká hlučnost a nižší emise. Další nespornou výhodou je možnost pracovat s různými typy tepelných zdrojů od sluneční energie po fosilní paliva nebo biomasu. Motor nespotřebovává žádný olej a má velmi dlouhou dobu mezi servisními prohlídkami (až 10 000 hodin). Nevýhodou je složitost motoru, velká hmotnost a technicky a ekonomicky náročná výroba z hlediska použitých materiálů a těsnění. [18], [19]



Obrázek 2.5: Schéma Stirlingova motoru a p-v diagram jeho provozu [19]

### 2.3.3 Mikroturbíny

V dnešní době lze díky technologickému rozvoji vyrobit i menší spalovací turbíny od 25 kW, které jsou konkurenceschopné a ekonomicky výhodné. Součástí mikroturbíny je kompresor, spalovací komora, regenerační výměník, turbína a generátor. Spojení s elektrizační soustavou zajišťuje frekvenční měnič, neboť mikroturbína se pohybuje rychlostí okolo 10 000 ot./min. Mikroturbíny využívají vzduchem chlazená ložiska, takže

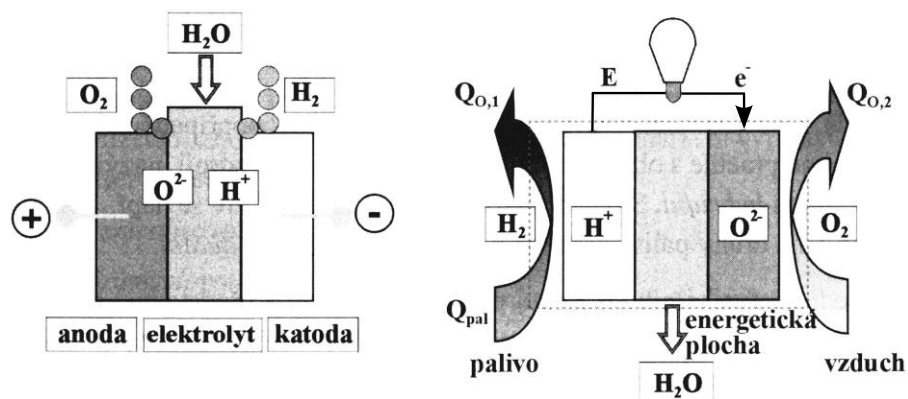


nepotřebují mazací olej. Jako palivo se nejčastěji používá zemní plyn (nebo bioplyn), ale mohou spalovat i jiná čistá paliva s velkou výhrevností (benzín, nafta). Výhodou použití tohoto primárního zdroje je dlouhodobý provoz bez nutnosti servisních odstávek, rychlé najíždění a změna výkonu, malá prostorová náročnost. Nevýhodou je požadavek na velmi čisté palivo a horší účinnost při nižším zatížení, než je jmenovité nebo při vyšší okolní teplotě. Další nevýhodou jsou velké investiční náklady pro malá zařízení. [19]

### 2.3.4 Palivové články

Pojem přímá transformace znamená že energie ze zdroje se přímo transformuje na elektrickou energii. Jejím hlavním zástupcem jsou palivové články.

Nejlepším palivem pro palivové články by byl čistý vodík, ale v současnosti je dostupný pouze zemní plyn. Ten se rozloží na vodík a oxidy uhlíku. Tato přeměna probíhá v procesní jednotce, kde metan reaguje s vodní párou (parní reforming). Podstatou palivového článku je štěpení atomů vodíku na porézní anodě pokryté vrstvou katalyzátoru, znázorněno na Obrázku 2.6. Vzniklé protony putují přes elektrolyt ke katodě, která je také pokryta katalyzátorem. Na katodě reagují protony s atomy kyslíku a vzniká vodní pára. Elektrony protékají uzavřeným elektrickým obvodem jako elektrický proud. Při provozu je nutné správně nastavit pracovní teplotu, jinak dochází k rozkládání elektrolytu a pohlcování vodní páry, což má za následek degradaci elektrolytu.



Obrázek 2.6: princip palivového článku [5]

Výzkum palivových článků se v posledních letech zintenzivnil a začal se používat komerčně v mikrokogeneračních jednotkách. Palivové články je možné rozdělit do skupin podle druhu elektrolytu a podle pracovní teploty. Nejrozvinutějším palivovým článkem je PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells), kde se pracovní teplota pohybuje v rozmezí od 170 do

250 °C. Jako elektrolyt se zde používá koncentrovaná kyselina fosforečná v pórovité mřížce karbidu křemičitého. Jako palivo se zde používá methan  $\text{CH}_4$ , který je nutné zpracovat na plyn s obsahem vodíku kolem 80 %. Energetickou účinnost okolo 42 % lze zvýšit použitím odpadního tepla až na 80 %. Z tohoto důvodu jsou tyto palivové články vhodné pro mikrokogenerační jednotky. Dalším poměrně novým typem palivového článku je MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells), což jsou články pracující s teplotou 600 °C a elektrolytem tvořeným tavnými uhličitany. Při použití v mikrokogenerační jednotce může dosahovat účinnosti až 85 %. Palivové články s označením SOFC (Solid Oxide Fuel Cells) pracují s nejvyššími teplotami v rozmezí od 900 do 1 000 °C. Jejich elektrolytem je keramický materiál se základem ze  $\text{ZrO}_2$ . Výhodou těchto článků je možnost pracovat nejen s vodíkem, ale i s plyny vzniklými zplyňováním uhlí. Palivem pro tento typ článku mohou být i nezpracované uhlovodíky (methan). [19]

### 2.4 Trigenerace

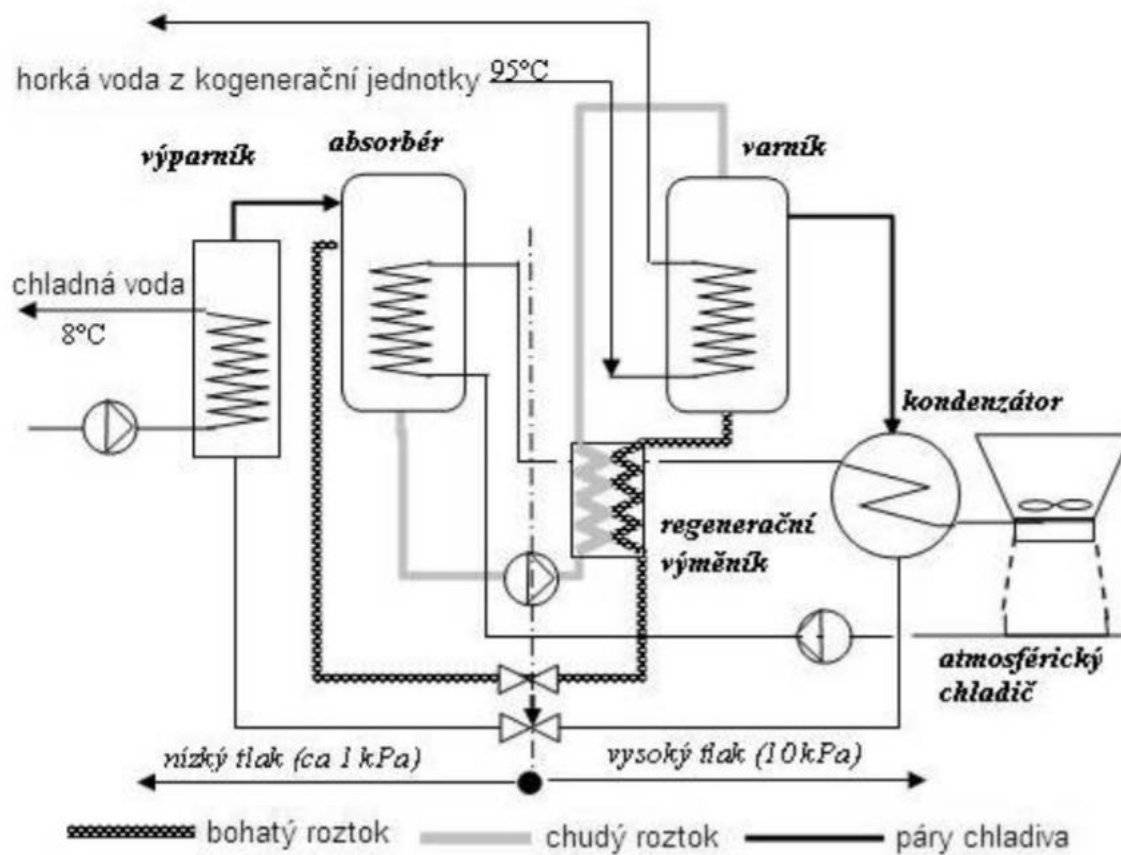
Vlivem rozvoje mikrokogeneračních jednotek a snížením nákladů na jejich pořízení se mikrokogenerační jednotky začínají více komerčně využívat. Zvětšuje se i poptávka po klimatizačních zařízeních. Z těchto důvodů vzniklo mikrokogenerační zařízení doplněné o chladicí jednotku a vznikl pojem trigenerace, což je právě kombinovaná výroba elektrické, tepelné energie a chladu. To má za následek větší využití mikrokogenerační jednotky, zvláště v letních měsících, kdy kogeneraci většinou nevyužíváme na výrobu tepelné energie. Důsledkem vyšší využitelnosti se snižuje spotřeba primárních zdrojů a zvyšují se ekonomického ukazatele mikrokogenerační jednotky. Jako chladicí systém se mohou použít dva způsoby (kompresorové nebo absorpční chlazení).

Kompresorové chlazení se skládá z kompresoru, výparníku, kondenzátoru a škrťacího ventilu. Pomocí výparníku se odvádí teplo z místnosti nebo z objektu chladícím médiem. Následně putuje toto médium do kompresoru, kde se stlačí a putuje do kondenzátoru. Zde se odvede teplo z média do atmosféry, a poté putuje chladicí médium přes škrťací ventil zpět do výparníku. [21], [19]

Absorpční chlazení obsahuje tři okruhy. V prvním okruhu proudí voda ohřívána pomocí mikrokogenerační jednotky do varníku. Ve varníku předá tato voda teplo druhému okruhu, který obsahuje vodu s absorbentem (nejčastěji lithium bromid nebo čpavek). Následně putuje odpařená voda do kondenzátoru, kde předá teplo třetímu chladicímu okruhu, který většinou obsahuje i chladicí věž. Zkondenzované chladicí médium poté pokračuje přes škrťací ventil do výparníku. Za škrťacím ventilem se pohybuje tlak pod 1 kPa. Před škrťacím



ventilem je tlak 10 kPa. Ve výparníku odebírá chladivo teplo (vypařuje se) z klimatizovaného objektu nebo místnosti. Odpařené chladivo následně putuje do absorbéru. V absorbéru se chladivo (voda) smísí s absorbentem za vzniku tepla, které se pomocí třetího chladicího okruhu odvede pryč. Vznikající bohatý roztok se přečerpává do varníku. Chudý roztok, který vzniká ve varníku je naopak pomocí škrťacího ventilu přepouštěn do absorbéru. Na Obrázku 2.7, kde je tento princip znázorněn, je regenerační výměník, který předeřívá pomocí chudého roztoku bohatý a tím zlepšuje účinnost. [19], [21]



Obrázek 2.7: Princip funkce trigenerační jednotky - absorpční zařízení [21]

### 3 Smart Home a Smart Village

Smart Home (neboli chytrou domácností) se označují objekty nebo domácnosti, které obsahují technologie, pomocí kterých může uživatel kontrolovat nebo ovládat zařízení v objektu. A to buď ovladačem přímo k tomu určeným, či pomocí bezdrátové technologie jako je Bluetooth nebo přes internet. Zařízeními může být ovládáno vytápění, větrání, zabezpečení nebo osvětlení. Chytrá domácnost má za cíl zlepšit komfort uživateli a snížit spotřebu energií.

K ovládání chytré domácnosti může sloužit i aplikace v mobilu, která postačí pro ovládání několika chytrých prvků. Pokud se jedná o komplexní systém kombinující například i výrobu elektrické energie z OZE nebo nabíjení a i vybíjení elektromobilů využívají se řídicí jednotky, které mohou ovládat až stovky zařízení a fungují na principu serveru, kdy jednotlivé senzory nebo chytrá zařízení komunikují s tímto systémem. Ten vyhodnocuje signály z jednotlivých přístrojů a následně může provádět změnu příslušného zařízení. Změny se provádějí v rámci předem nadefinovaných scénářů. V rámci ovládání mohou tyto systémy mít i hlasové ovládání. [22]

Připojením zařízení k řídicí jednotce nebo případně ovládaním mobilní aplikací, můžeme monitorovat jednotlivá zařízení a v případě poškození zařízení či havárie může probíhat rychlá reakce k zabráněním dalších škod. Chytrá domácnost může zlepšovat zabezpečení objektu proti vandalismu či cizímu vniknutí pomocí čidel, kamer nebo kombinací čidel a kamer.

V dnešní době jsou stále zařízení pro chytré domácnosti dražší než běžná zařízení. Pokud je systém připojen na internet, je možné riziko úniku citlivých dat. Při výpadku proudu je nutné vědět, jak systém přepnout do manuálního režimu či mít záložní zdroj energie, aby mohla domácnost normálně fungovat. [23], [24]

S rostoucím podílem obnovitelných zdrojů malých výkonů připojovaných do distribuční sítě, výkonovou elektronikou a s výstavbou akumulčních zařízení mohou tyto zdroje zvýšit efektivitu dodávané energie pro chytré domácnosti. Obousměrný tok informací od poskytovatelů energie k zákazníkovi umožňuje řídit spotřebu elektrické energie. V době vysoké ceny elektřiny nebo ohrožení dodávky energie, mohou chytré domácnosti snížit svoji spotřebu. Navíc v době chytrých měřících zařízení si mohou naplánovat automaticky nebo manuálně část své spotřeby na dobu s nízkou cenou energie a tím výrazně snížit náklady na provoz. [25]

Koncept Smart Village je integrace chytrých technologií a lokálních zdrojů elektrické a tepelné energie tak, aby byla pokryta lokální spotřeba s možností dodávky přebytečné elektrické energie do elektrizační soustavy. Tyto soustavy se nazývají mikrosítě a mohou fungovat bez ohledu na to, jestli jsou připojeny do elektrizační soustavy nebo ne (ostrovní režim).

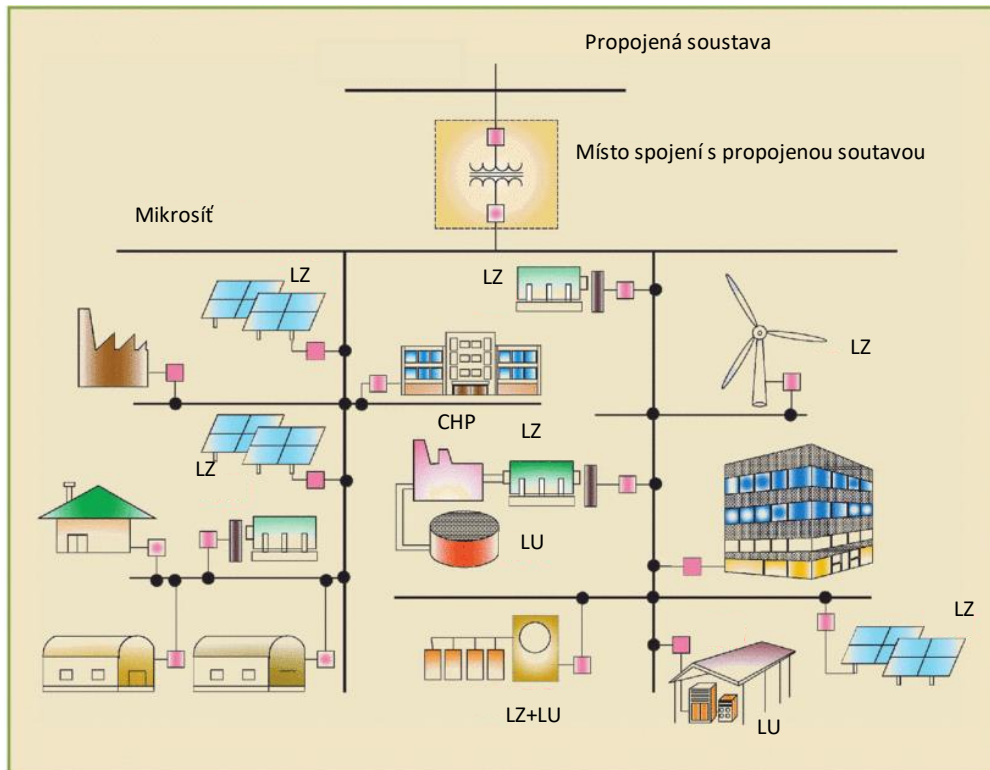
Mikrosít' můžeme definovat jako síť, která pojme lokální výrobu a umožní výrobnám mezi sebou komunikovat a tím se zvýší spolehlivost dodávky energií a mohou se tím snížit i náklady. Mikrosít' dokáže předpovídat hrozící problémy a přijímat opatření, aby se jim vyhnula nebo zmírnila jejich dopad. [26]

Vysoké spolehlivosti a obnovitelnosti systému se musí dosáhnout tak, že v mikrosíti nebude žádná centrální jednotka, bez které by přestala fungovat celá mikrosít'. To zahrnuje i trvalý provoz při zničení nebo ztrátě jakékoliv jednotky nebo výrobního modulu (kritérium N-1). Další důležitou vlastností je možnost připojit výrobní moduly přímo k zátěži bez úpravy nebo změny topologie sítě. To umožňuje zvýšení efektivity a využití odpadního tepla bez složitých systémů. Schopnost izolovat výrobu a spotřebu má potenciál poskytnout vyšší lokální spolehlivost při využití menších jednotek (tisíce kW). V případě modulárních jednotek lze dospět k rozhodnutí nakoupit více jednotek, než je potřeba a tím zajistit místní zálohu, pokud na jedné jednotce dojde k poruše. [27]

Implementace malých zdrojů do mikrosítí se neobejde bez řízení napětí a frekvence, které se řídí pomocí P-Q<sub>j</sub> řízení. Bez tohoto řízení by mohlo docházet v těchto sítích k oscilacím napětí a jalového výkonu. Dalším požadavkem je rychlé sledování zátěže a možnost akumulace energie. V dnešní elektrizační soustavě je zajištěna akumulace pomocí setrvačnosti velkých energetických zdrojů, které překlenou dobu, než zareagují systémy a zvýší potřebný výkon na zdrojích. U mikrosítí se toho může dosáhnout pomocí akumulace. Akumulaci v mikrosítích mohou zajistit baterie a setrvačníky. [28]

Řízení mikrosítě v případě připojení do distribuční sítě zajišťuje dispečer DS, kdy se centrální řídicí systém mikrosítě (MCC) řídí pokyny dispečera DS. MCC následně může řídit lokální řídicí systémy jednotlivých výrobních modulů a zátěží (LC). LC jednotka může pracovat i samostatně v závislosti na způsobu řízení či při výpadku spojení s MCC. Při centrálním řízení vydává příkazy MCC a LC je plní. Při decentralizovaném řízení se řídí LC podle předem nastavených parametrů. O kontrolu velikosti jmenovitého napětí se starají LC autonomně při jakémkoli řízení. [29]

Na Obrázku 3.1 je znázorněna implementace lokálních zdrojů (LZ) a lokálních úložišť energie (LU) v mikrosíti.



Obrázek 3.1: Typická struktura mikrosítě [29]

### 3.1 Zhodnocení primárních zdrojů ve Smart Home a Smart Village

S rostoucím vývojem udržitelných energetických technologií a tlakem na nízkoemisní zdroje se mikrokogenerační jednotky využívající obnovitelné zdroje jeví jako velmi slibná vyhlídka pro chytré domácnosti. Z technickoekonomického hlediska je náhrada fosilních paliv za obnovitelné zdroje energie proveditelná. V inteligentních domech se mohou využívat různé typy obnovitelné energie jako je sluneční, větrná, geotermální a biomasa. [25]

Solární energie je z dnešního hlediska nejbohatší nevyčerpatelný a čistý zdroj energie. Energie ze slunce se může pomocí fotovoltaických panelů přeměnit na elektrickou energii nebo pomocí solárních termálních panelů ohřát teplou užitkovou vodu. Fotovoltaické panely převládají v místech, kde je sluneční svit velmi hojný (jižní země, země u rovníku). Vzhledem k snadné údržbě a instalaci je vhodná do chytrých domácností, aby obyvatelům poskytovala energii, a kromě toho jsou většinou Smart Home vybaveny akumulacním zařízením (bateriemi), kde se může tato energie ukládat pro pozdější využití. Baterie slouží i k vyrovnávání změny výkonu FV panelů a tím přispívá ke stabilitě a spolehlivosti systému. [25]

Větrná energie je další alternativní energií, která se může využívat v chytrých domácnostech. Zařízení pro využití větrné energie se nazývá větrná turbína a obsahuje vrtuli, generátor, řídicí a ochranná zařízení, sloup a akumulční zařízení. Budova brání lineárnímu proudění vzduchu, a tak vzduch obíhá budovu přes střechu nebo po stranách a tím vytváří tlakový rozdíl, který pohání vrtuli a tím se v generátoru vyrábí elektrická energie. Většinou se tato energie využívá pro osvětlení, elektrické spotřebiče nebo se uloží do akumulčního zařízení. Vzhledem k nestálosti a přerušovanému proudění vzduchu se musí počítat s instalací akumulací, která zvýší spolehlivost a stálost dodávky energie. Velikost hodnoty instalované akumulace závisí na přesné předpovědi rychlosti větru. [25]

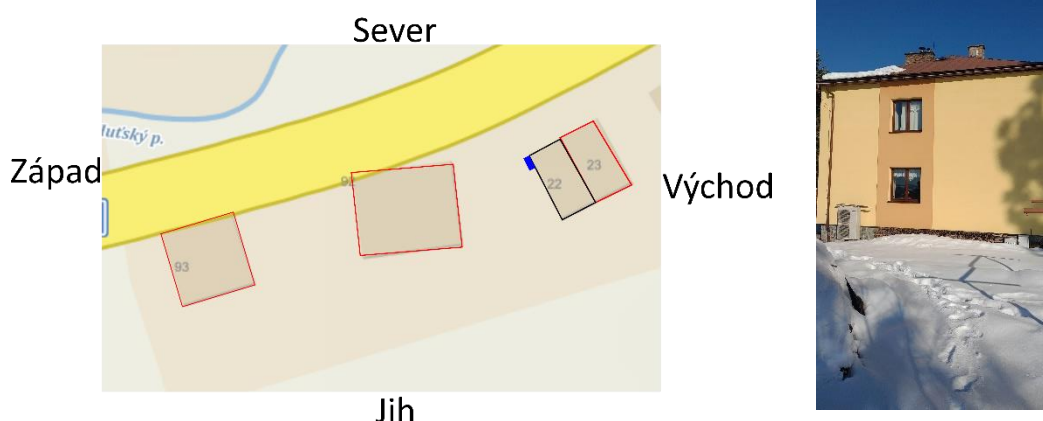
Jedním z nejrozšířenějších zdrojů používaných na výrobu tepla a elektrické energie je spalování biomasy v mikrokogeneračních jednotkách. Jednou z největších výhod použití mikrokogenerační jednotky je stálost výroby, která závisí pouze na potřebě mít palivo (biomasu, či jiné druhy paliva). V dnešní době se pro spalování biomasy v chytrých domech používá jak pevná, tak i plynná biomasa. Pevná biomasa se spálí v kotli s přebytkem vzduchu, kde vznikne pomocí výměníku pára, ta následně putuje do parní turbíny, kde se přemění energie páry na rotační pohyb, který pohání generátor a ten vyrábí elektrickou energii. Nevyužitá energie ze spalin a páry se použije pro ohřev teplé užitkové vody. Plynná biomasa se spaluje spalovacím motorem, který je spojený s generátorem a ten vyrábí elektrickou energii. Teplo odváděné z motoru a z výfukových plynů se použije pro ohřev teplé užitkové vody. [25]

Malé decentralizované zdroje mohou mít velmi pozitivní vliv na distribuční soustavu v místě připojení. Se správným řízením a akumulací se může dosáhnout zvýšení spolehlivosti a udržení napěťových poměrů v místě připojení, popřípadě i snížení ztrát přenosem výkonu po vedení.

Zdroje spalující biomasu či bioplyn (nebo zemní plyn) jsou velmi podobné klasickým elektrárnám z hlediska regulovatelnosti, a proto jsou vhodné jako zdroje pro udržení spolehlivosti a kvality elektrické a tepelné energie. Snadno regulovatelným zdrojem je i malá vodní elektrárna, musí se ale v lokalitě nacházet vhodný vodní tok. Další obnovitelné zdroje jako jsou fotovoltaické systémy nebo malé větrné elektrárny, které mohou spolu s akumulací pomáhat s výrobou elektrické energie. [30]

## 4 Návrh energeticky soběstačného domu

Zvolený objekt, který slouží jako předloha pro simulaci zde dále navržené regulace spotřeby a výroby tepelné energie se nachází ve městě Rokytnice nad Jizerou (50.7286097N, 15.4822578E) v okrese Semily a v Libereckém kraji. Rodinný dům se nachází v nadmořské výšce 635 metrů nad mořem.



Obrázek 4.1: Vlevo: Obrázek mapy s orámovaným objektem (černý rámeček) a vyznačenými světovými stranami, vyznačena poloha tepelného čerpadla (modrý čtvereček), další domácnosti pro dodávku tepelné energie (červené rámečky) [31], Vpravo: Fotografie objektu

Objekt je dvojdomek, pro počítání tepelných ztrát stačí uvažovat pouze polovinu domu za předpokladu, že jsou obě poloviny domu identické. Dům se skládá ze sklepa, půdy a dvou obyvatelných podlaží. Půdorysy obou podlaží se nachází v Příloze I. V Tab.4.1 jsou uvedeny průměrné teploty v jednotlivých měsících naměřené Českým hydrometeorologickým ústavem.

Tab. 4.1: Průměrné teploty v jednotlivých měsících [32]

Měsíc	Teplota (°C)
Leden	-1,2
Únor	1,3
Březen	0,9
Duben	5,8
Květen	8,4
Červen	14,5
Červenec	15,1
Srpen	16
Září	11,2
Říjen	7,8
Listopad	2,7
Prosinec	0,5

#### 4.1 Výpočet tepelné spotřeby objektu

Tepelné ztráty se počítají bez uvažování zisku ze slunečního záření dopadajícího na počítaný objekt a bez zisku z vnitřních zdrojů tepla. Pro samotný výpočet se používá metoda ochlazovacích ploch (obálková metoda). Princip metody spočívá ve vyčíslení ztrát prostupem tepla jednotlivými konstrukčními prvky, které oddělují vytápěné místnosti od nevytápěných, či od okolního prostředí. Součinitel prostupu tepla ( $U$ ) se spočítá dle [33] pomocí vztahu (4.1). [33]

$$U = \frac{1}{R_{SI} + R_{SE} + R} \quad (4.1)$$

Kde:

$U$  – součinitel prostupu tepla ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ )

$R_{SI}$  – tepelný odpor přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce ( $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ )

$R_{SE}$  – tepelný odpor přestupu tepla na vnější straně konstrukce ( $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ )

$R$  – tepelný odpor konstrukce

Praktické použití tohoto vztahu je zde následně ukázáno pro obvodovou zeď.

$$U = \frac{1}{0,04 + 0,13 + 1,25 + 2,353 + 0,011 + 0,025} = 0,263 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.2)$$

Tepelný odpor přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce je dán normou ČSN 73 0540-3 [34], jejich hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Tabulka odporu přestupu tepla pro vnitřní a venkovní konstrukce

	<b>Stěna</b>	<b>Strop</b>	<b>Podlaha</b>
$R_{SI}$ $(\frac{m^2 \cdot K}{W})$	0,13	0,1	0,17
$R_{SE}$ $(\frac{m^2 \cdot K}{W})$	0,04	-	-

Tepelný odpor konstrukce se spočítá pomocí rovnice (4.3) dle [33]: Příklad výpočtu je pro železobeton:

$$R = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,21}{1,74} = 0,121 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (4.3)$$

Kde:

$d$  – tloušťka konstrukce (m)

$\lambda$  – tepelná vodivost materiálu  $(\frac{W}{m \cdot K})$

Hodnoty tepelné vodivosti materiálu jsou uvedeny v normě ČSN 73 0540–3. Všechny použité materiály a jejich tloušťky jsou uvedeny v Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Hodnoty tepelné vodivosti a tepelného odporu pro materiály využití v objektu

<b>Materiál</b>	$\lambda_u$ $(\frac{W}{m \cdot K})$	<b>d (m)</b>	<b>R <math>(\frac{m^2 \cdot K}{W})</math></b>
<b>Železobeton</b>	1,74	0,21	0,121
<b>Plynosilikát</b>	0,20	0,25	1,25
<b>Polystyren</b>	0,051	0,12	2,353
<b>Vápenná omítka</b>	0,88	0,01	0,011
<b>Fasáda</b>	0,8	0,02	0,025
<b>Dlaždice</b>	1,01	0,15	0,015
<b>PVC</b>	0,17	0,015	0,088

V Tab. 4.4 jsou uvedeny součinitele prostupu tepla pro obvodovou zeď ( $U_{OZ}$ ), podlahu ke sklepu a strop ve druhém patře, který vede na půdu. Poté byly ještě z normy ČSN 73 0540–3 zjištěny hodnoty pro prostup tepla pro okna, venkovní a vnitřní dveře.



Tab. 4.4 Tabulka prostupu tepla v jednotlivých konstrukcích domu

	$U \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$
$U_{Oz}$	0,263
$U_{Podlaha \text{ přízemí}}$	2,039
$U_{Strop \text{ 2. Patro}}$	2,487
$U_{Stěna}$	1,277
$U_{Podlaha \text{ předsíň, koupelna1}}$	2,025
$U_{Schody}$	2,213
$U_{Bal. \text{ dveře}}$	2,9
$U_{Okna}$	2,9
$U_{Venkovní \text{ dveře}}$	4
$U_{Vnitřní \text{ dveře}}$	2

Následně byla určena vnitřní teplota ve vytápěných a nevytápěných prostorech uvnitř domu a venkovní teplota. Jako vnitřní teplota ve vytápěných místnostech byla zvolena teplota 20 °C. V nevytápěných místnostech (sklep a půda) byla zvolena teplota 5 °C. Venkovní teplota byla určena z normy jako -15 °C.

Celkové tepelné ztráty se následně vypočítají jako součet tepelných ztrát prostupem tepla a větráním pomocí vztahu (4.4). Tepelné ztráty prostupem tepla se dopočítají z rovnice (4.5) dle [33] a tepelné ztráty větráním dle rovnice (4.8) dle [33].

$$Q_C = Q_P + Q_V \quad (4.4)$$

Kde:

$Q_P$  – Tepelná ztráta prostupem tepla (W)

$Q_V$  – Tepelná ztráta větráním (W)

$$Q_P = \sum_{i=1}^n U_i \cdot S_i \cdot (t_i - t_{ei}) \quad (4.5)$$

Kde:

$U_i$  – součinitel prostupu tepla jednotlivých konstrukcí  $\left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$

$S_i$  – ochlazovaná plocha jednotlivých konstrukcí (m<sup>2</sup>)

$t_i$  – zvolená vnitřní teplota (°C)

$t_{ei}$  – zvolená teplota prostředí na vnější straně konstrukce (°C)

K tepelným ztrátám prostupem tepla dle vztahu (4.6) se musí ještě přidat přírážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí ( $p_1$ ), přírážka na urychlení zátoku ( $p_2$ ) a přírážka na

světovou stranu ( $p_3$ ). Tyto přírážky se získají z normy ČSN 06 02 1 [35], pouze  $p_1$  se vypočítá podle vztahu (4.7) dle [33]:

$$Q_{PC} = Q_P \cdot (1 + p_1 + p_2 + p_3) \quad (W) \quad (4.6)$$

$$p_1 = 0,15 \cdot \frac{Q_P}{\sum S \cdot (t_i - t_e)} \quad (4.7)$$

Kde:

$\sum S$  – Celková plocha všech stavebních konstrukcí obepínající počítanou místnost ( $m^2$ )

$t_i$  – zvolená vnitřní teplota ( $^{\circ}C$ )

$t_e$  – zvolená teplota prostředí na vnější straně konstrukce ( $^{\circ}C$ )

Tepelná ztráta větráním se vypočítá dle [33]:

$$Q_V = 1\,300 \cdot \frac{n_h}{3\,600} \cdot V_m \cdot (t_i - t_e) \quad (4.8)$$

Kde:

$n_h$  – intenzita výměny vzduchu (pro obytné domy 0,5)

$V_m$  – vnitřní objem místnosti ( $m^3$ )

#### 4.1.1 Ilustrativní výpočet pro obývací pokoj

Zde je uveden pro názornost výpočet pro obývací pokoj v analyzovaném objektu. Pro ostatní místnosti jsou hodnoty výpočtů uvedeny v Příloze I. Tepelné ztráty přestupem tepla:

$$Q_P = (0,263 \cdot 23,672 + 2,9 \cdot 4,5) \cdot 35 + 2,039 \cdot 17,88 \cdot 15 = 1\,220,449 \text{ W} \quad (4.9)$$

Přirážka vyrovnání vlivu chladných konstrukcí:

$$p_1 = 0,15 \cdot \frac{1\,220,449}{80,102 \cdot (20 + 15)} = 0,069 \quad (4.10)$$

Tepelné ztráty přestupem tepla se započítáním přírážek:

$$Q_{PC} = 1\,304,987 \cdot (1 + 0,0693 + 0 + 0) = 1\,304,987 \text{ W} \quad (4.11)$$

Tepelné ztráty větráním:

$$Q_V = 1\,300 \cdot \frac{0,5}{3\,600} \cdot 37,517 \cdot (20 + 15) = 291,803 \text{ W} \quad (4.12)$$

Celkové ztráty poloviny objektu:

$$Q_C = 7\,093,944 + 1\,405,145 = 8,499 \text{ kW} \quad (4.13)$$

Celková tepelná ztráta pro daný objekt vyšla výpočtem 8,499 kW.

Pro roční potřebu tepla na pokrytí tepelných ztrát objektu se nejdříve musí vypočítat dle [36] a vztahu (4.14) takzvaný počet denostupňů  $D$ . Průměrná denní teplota v topném období je  $3,29 \text{ }^{\circ}C$  a topné období má 243 dní.

$$D = (t_i - t_{es}) \cdot d_n = (20 - 3,29) \cdot 243 = 4\,060,53 \text{ d} \cdot K \quad (4.14)$$

Kde:

$t_{es}$  – průměrná venkovní teplota v topném období (°C)

$d_n$  – počet dnů v topném období.

Roční spotřeba tepla pro vytápění [36]:

$$Q_{RC} = \frac{24 \cdot Q_C \cdot D}{t_i - t_e} = \frac{24 \cdot 8,499 \cdot 4\,060,53}{20 - (-15)} = 23\,664 \text{ kWh/rok} \quad (4.15)$$

Denní spotřeba tepla na výrobu teplé užitkové vody  $Q_{TUVd}$  [36]:

$$Q_{TUVd} = (1 + z) \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot V_{2P} \cdot (t_1 - t_2)}{3\,600} \text{ (kWh/den)} \quad (4.16)$$

$$Q_{TUVd} = (1 + 0,5) \cdot \frac{1\,000 \cdot 4,19 \cdot 0,18 \cdot (55 - 10)}{3\,600} = 14,13 \text{ kWh/den} \quad (4.17)$$

Kde:

$\rho$  – měrná hmotnost vody (1 000 kg/m<sup>3</sup>)

$z$  – koeficient energetických ztrát systému (0,5)

$C_p$  – měrná tepelná kapacita vody (4,19 kJ/(kg · K))

$V_{2P}$  – denní potřeba vody pro přípravu TUV (pro tuto domácnost 0,18 m<sup>3</sup>/den)

$t_1$  – teplota ohřáté vody

$t_2$  – teplota studené vody

Spotřeba tepla na výrobu teplé užitkové vody v zimě  $Q_{TUVZ}$  [36]:

$$Q_{TUVZ} = Q_{TUVd} \cdot d_n = 14,13 \cdot 243 = 3\,433,59 \text{ kWh/rok} \quad (4.18)$$

Spotřeba tepla na výrobu teplé užitkové vody v létě  $Q_{TUVL}$  [36]:

$$Q_{TUVL} = 0,8 \cdot Q_{TUVd} \cdot \frac{55 - t_{sL}}{55 - t_{sZ}} \cdot (350 - d_n) \text{ (kWh/rok)} \quad (4.19)$$

$$Q_{TUVL} = 0,8 \cdot 14,13 \cdot \frac{55 - 15}{55 - 10} \cdot (350 - 243) = 1\,075,136 \text{ kWh/rok} \quad (4.20)$$

Roční spotřeba tepla na výrobu teplé užitkové vody  $Q_{TUV}$ :

$$Q_{TUV} = Q_{TUVZ} + Q_{TUVL} = 3\,433,59 + 1\,075,136 = 4\,508,73 \text{ kWh/rok} \quad (4.21)$$

$Q_{TUVd}$  – denní potřeba tepla na ohřev TUV (kWh/den)

$t_{sL}$  – teplota studené vody v létě (zpravidla kolem 15 °C)

$t_{sZ}$  – teplota studené vody v zimě (zpravidla kolem 10 °C)

Celková potřeba tepla za celý rok dle [36] se vypočítá ze vztahu (4.19):

$$Q = Q_{RC} + Q_{TUV} = 23\,664 + 4\,508,73 = 28\,172,73 \text{ kWh/rok} \quad (4.22)$$

V roce 2020 byla podána a schválena žádost o dotace z programu Kotlíkové dotace v Libereckém kraji III. Před tímto rokem se vytápěl objekt pomocí kotle na fosilní paliva

(jako palivo sloužilo dřevo a uhlí). Parametry tohoto kotle jsou uvedeny v Tab. 4.5. Na podzim roku 2020 bylo instalováno tepelné čerpadlo vzduch/voda jeho parametry jsou v Tab. 4.6. Z podkladů pro dotaci vyšla celková ztráta objektu 8,5 kW, pro venkovní teplotu -15 °C. Hodnota vypočtená v této kapitole a hodnota z žádosti o dotace se tedy shodují.

Tab. 4.5 Parametry kotle na fosilní palivo [37]

<b>Dakon DOR 24</b>	
<b>Jmenovitý výkon</b>	7-24 kW
<b>Předepsané palivo</b>	hnědé uhlí - ořech
<b>Spotřeba paliva při jmenovitém výkonu</b>	7,6 kg/h
<b>Náhradní palivo</b>	dřevo, hnědé uhlí - ořech, brikety, černé uhlí
<b>Rozsah teploty otopné vody</b>	65 – 95 °C

Tab. 4.6 Parametry Tepelného čerpadla vzduch/voda [38]

<b>Panasonic WH-UX09HE8/WH SXC09H3E8</b>	
<b>Topný výkon</b>	9 kW
<b>Maximální výstupní teplota</b>	60 °C
<b>Konstantní tepelný výkon až do teploty</b>	-20 °C
<b>Maximální pracovní teplota</b>	-28 °C
<b>COP</b>	2,02 - 4,84

## 4.2 Elektrická spotřeba objektu

Elektrická spotřeba objektu se před instalací tepelného čerpadla pohybovala okolo 4,092 MWh za rok. Po instalaci tepelného čerpadla se spotřeba elektrické energie zvýšila na hodnotu 9,699 MWh. Pro zvolení správné mikrokogenerační jednotky, budeme vycházet ze spotřeby elektrické energie před instalací tepelného čerpadla. Hodnotu spotřeby elektrické energie za hodinu získáme pomocí podílu energie za rok a počtu hodin za rok (8760 hodin). Tento výpočet není úplně přesný, nicméně tak lze získat dobrou představu o parametrech mikrokogenerační jednotky, kterou by bylo možné použít. [40]

$$P_{el} = \frac{E}{T} = \frac{4\,092}{8\,760} = 0,467 \text{ kW} \quad (4.23)$$

## 4.3 Návrh mikrokogenerační jednotky

Mikrokogenerační jednotka bude spolupracovat s fotovoltaickým systémem a bude v provozu pouze v topném období, kdy bude dodávat elektrickou a tepelnou energii objektu.

Objekt bude zároveň napojen na distribuční soustavu, aby byl zajištěn provoz domácností i v případě poruchy na mikrokogenerační jednotce či nedostatku dodávané energie. V případě přebytku elektrické energie se bude energie dodávat do distribuční soustavy. Po zbytek roku (převážně letní měsíce) bude elektrickou a tepelnou energii dodávat fotovoltaický systém, při nedostatku pak distribuční soustava, jelikož by se z ekonomického hlediska provoz mikrokogenerační jednotky nevyplatil. Navrhovaná mikrokogenerační jednotka by měla mít elektrický výkon alespoň 0,467 kWe a tepelný výkon 8,5 kWt. Mnoho mikrokogeneračních jednotek s těmito parametry se nevyrábí a jako palivo se zde používá zemní plyn. Mikrokogenerační jednotka tohoto výkonu na bioplyn se nevyrábí. Z tohoto důvodu jsem byl nucen vybrat jednotku Micro 30 od firmy TEDOM, která má vyšší výkon, ale jako palivo se může použít i bioplyn (viz. Tab. 4.7).

Tab. 4.7: Parametry mikrokogenerační jednotky TEDOM Micro 30 [39]

<b>TEDOM Micro 30</b>	
<b>Maximální tepelný výkon (<math>Q_{KJt}</math>)</b>	41,8 kW
<b>Elektrický výkon (<math>P_{KJe}</math>)</b>	20 kW
<b>Celková účinnost</b>	91,5 %
<b>Palivo</b>	Bioplyn
<b>Příkon v palivu</b>	67,17 kW

Zvolená mikrokogenerační jednotka je pro řešenou část objektu příliš velká, proto se dále bude uvažovat, že tato mikrokogenerační jednotka dodává tepelnou a elektrickou energii pro 4 domácnosti. Předpokladem je obdobná spotřeba tepelné a elektrické energie pro všechny domácnosti jako v řešeném objektu, to znamená v polovině daného dvojdomku. Celková spotřeba elektrické energie objektu je tedy 16,368 MW<sub>e</sub>h/rok a spotřeba tepelné energie je 112,69 MW<sub>t</sub>h/rok.

#### 4.4 Návrh fotovoltaického systému

Navrhovaný výkon fotovoltaické elektrárny bude pouze pro polovinu dvojdomku. Pro návrh výkonu FVE je potřeba zjistit nejprve potřebný výkon za den, který zjistíme pomocí podílu energie za rok a dní za rok (365 dní). Z toho vyjde hodnota  $E_{den} = 11,21$  kWh/den.

Při přeměně sluneční energie na elektrickou vznikají na fotovoltaickém systému ztráty vlivem neoptimální teploty nebo ztrát na střídači, s těmito ztrátami je nutné počítat. Pro

výpočet potřebného výkonu FVE se budou uvažovat ztráty 13 %. Potřebný elektrický výkon dle [41]:

$$P_{FVE} = E_{den} \cdot 1,13 = 11,21 \cdot 1,13 = 12,68 \text{ kW} \quad (4.24)$$

Fotovoltaická elektrárna bude sestavena z fotovoltaických panelů Trina Vertex 550 W TSM-DE19 o výkonu 550 W<sub>p</sub> s maximální účinností 21,2 %. Panely budou montovány na střechu se sklonem 35°. Jako střídač bude použit měnič Victron Quattro 48V 15 000VA /200 A -100A/100A. [42], [43]

Potřebný počet panelů [41]:

$$n_{panelů} = \frac{P_{FVE}}{550} = \frac{12\,680}{550} = 23 \text{ ks} \quad (4.25)$$

Takovýto počet panelů by se bohužel na střechu nevešel. Z důvodu místa se dále bude počítat pouze se 12. panely.

Maximální výkon panelů [41]:

$$P_{CFVE} = n_{panelů} \cdot 550 = 12 \cdot 550 = 6,6 \text{ kW}_p \quad (4.26)$$

Pro ukládání nespotřebované energie z fotovoltaických panelů budou použity baterie Banner Energy Bull 230 Ah, které mají napětí 12V. Množství baterií a tím pádem možné množství uložené energie závisí na připojení a využívání elektrizační soustavy. Pokud uvažujeme plně soběstačný dům, musí baterie být schopny pokrýt minimálně dvoudenní spotřebu elektrické energie objektu [39].

$$n_{aku} = \frac{E_{den} \cdot dny}{U \cdot Kapacita} = \frac{11\,210 \cdot 2}{12 \cdot 230} = 8 \text{ ks} \quad (4.27)$$

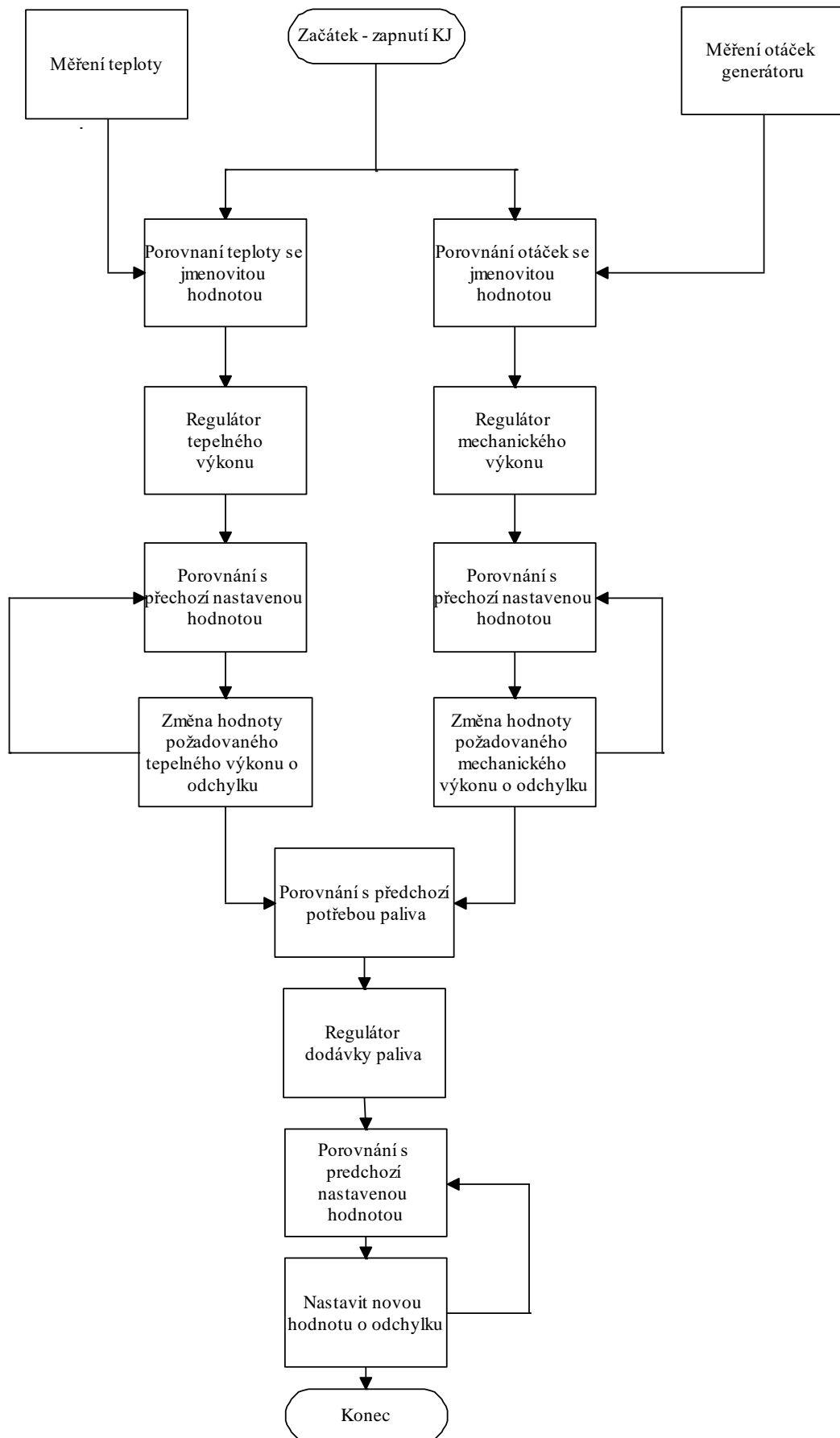
$U$  – napětí (V)

## 5 Logika řízení mikrokogenerační jednotky a simulace

Na Obrázku 5.1 je pomocí vývojového diagramu zobrazena jedna z možných posloupností řízení mikrokogenerační jednotky (výroby elektrické a tepelné energie). Po uvedení mikrokogenerační jednotky do provozu se začínají měřit otáčky a teplota. Naměřené hodnoty se porovnají s jmenovitými hodnotami. Pokud se nerovnají, regulátory nastaví novou požadovanou hodnotu navýšeními či snížením mechanického nebo tepelného výkonu. Nově nastavené hodnoty se ukládají do paměti. Následně jsou tyto signály dopraveny do regulátoru výkonu spalovací komory. Zde se přepočítají na potřebný výkon spalovací komory (SK). Podle potřebného výkonu se zvětšuje nebo zmenšuje množství dopravovaného paliva do spalovací komory.

Regulátor spalovací komory má za úkol primárně zajistit dodávku tepelného výkonu na vytápění a ohřev teplé užitkové vody. Z toho vyplývá, že mohou nastat tři situace.

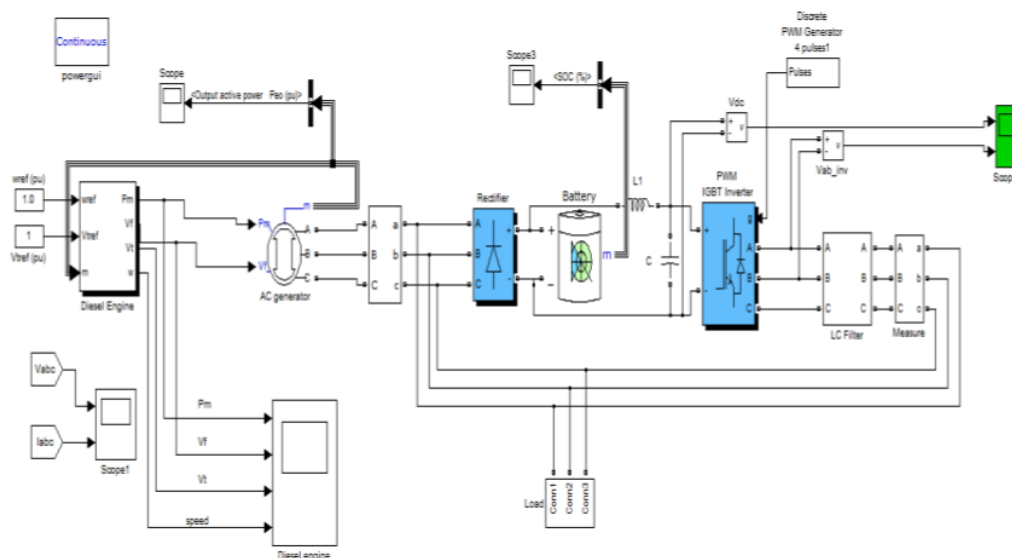
První situací je stav, kdy dodávka tepelné a elektrické energie je menší než maximální výkon spalovací komory, proto regulátor nastaví dodávku potřebného množství paliva. Druhou situací je zvýšení potřebného tepelného výkonu, kdy je v součtu s potřebným elektrickým výkonem tato hodnota větší než maximální hodnota výkonu SK. V tomto případě regulátor SK omezí hodnotu mechanického výkonu a zbytek elektrické energie se musí dodat z akumulace nebo musí dojít k omezení elektrické zátěže. Třetí situace je obdobná té předchozí, ale dochází ke zvýšení elektrické zátěže při maximálním výkonu SK. I v této situaci musí zbylou elektrickou energii dodat akumulace nebo se musí omezit nepotřebná elektrická zátěž.



Obrázek 5.1: Vývojový diagram řízení výroby tepelné a elektrické energie mikrokogenerační jednotky



Jako základ pro elektrickou část simulace v Simulinku byla použita práce z univerzity zemědělství Mokundi, kterou napsali Abuku, Genger a Udenze z roku 2016, kteří se zabývali návrhem modelu mikrokogenerační jednotky ve spolupráci s akumulací (tepelnou i elektrickou) [45]. Pomocí softwaru MATLAB Simulink vytvořili model mikrokogenerační jednotky a akumulačního zařízení (viz. Obrázek 5.2) a simulovali připojování a odpojování různých zátěží při konstantní výrobě elektrické energie z asynchronního motoru.



Obrázek 5.2: Model kogenerační jednotky s elektrickým úložištěm [45]

Výsledkem simulace bylo zjištění, že pokud je výkon zátěže menší, než výkon generátoru ukládá se nespotřebovaná energie do baterií. V případě, že dojde ke zvýšení zátěže nad výkon generátoru, dodá chybějící množství energie baterie (akumulace). Napětí generátoru se při změně zátěže rozvlní, ale díky reakci řídicího systému generátoru se rychle vrátí na ustálenou jmenovitou hodnotu. Při použití akumulace (baterie) nemusí být použita tak velká jednotka a snižuje se tím i nevyužitá tepelná energie, která by se v opačném případě musela vyrobit.

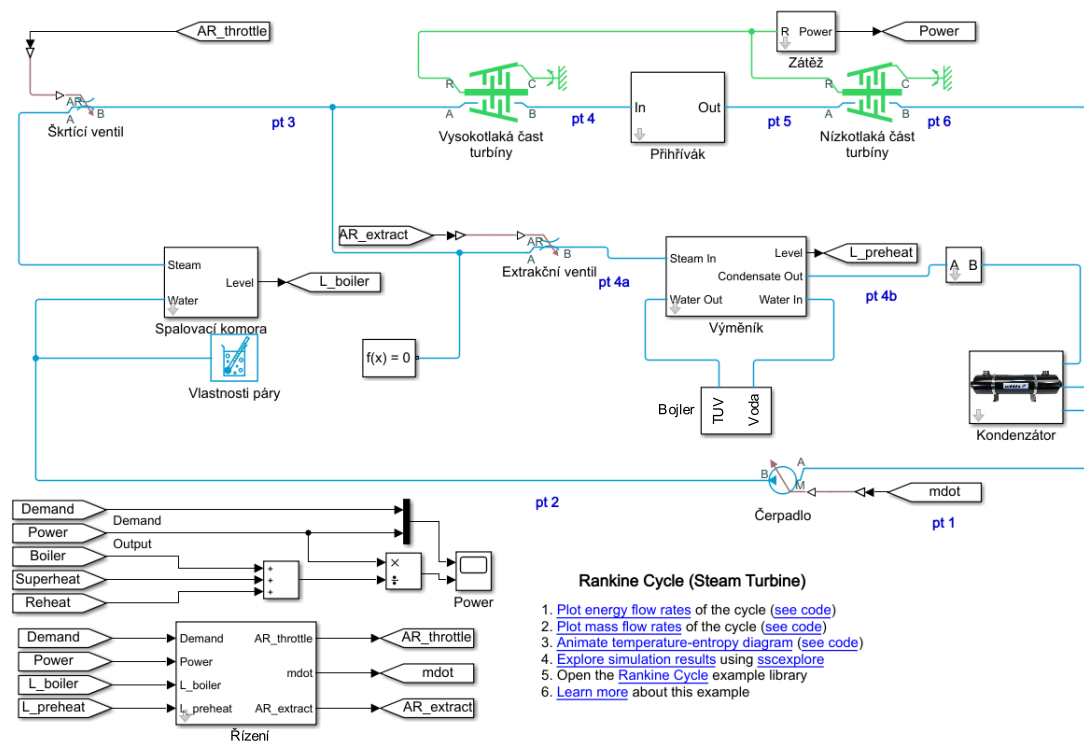
V další části simulovali tepelnou akumulaci, která musela být vlivem rozdílných fyzikálních prostředí elektrické a tepelné části díky nekompatibilitě bloků termodynamických prvků a bloků elektrických prvků v knihovně Simulinku, modelována zvlášť mimo model na Obrázku 5.2. Simulace probíhala při konstantní výrobě tepelné energie a měnila se spotřeba tepelné energie. Výsledkem simulace bylo zjištění, že v případě,

kdy se uloží přebytečná energie do tepelné akumulace, tak se může použít později a není třeba se zbytečně zbavovat vyrobené energie (zvýšení účinnosti).

V závěru bylo zmíněno, že přidáním akumulárního zařízení (tepelného i elektrického) se může zvýšit účinnost až o 30 %.

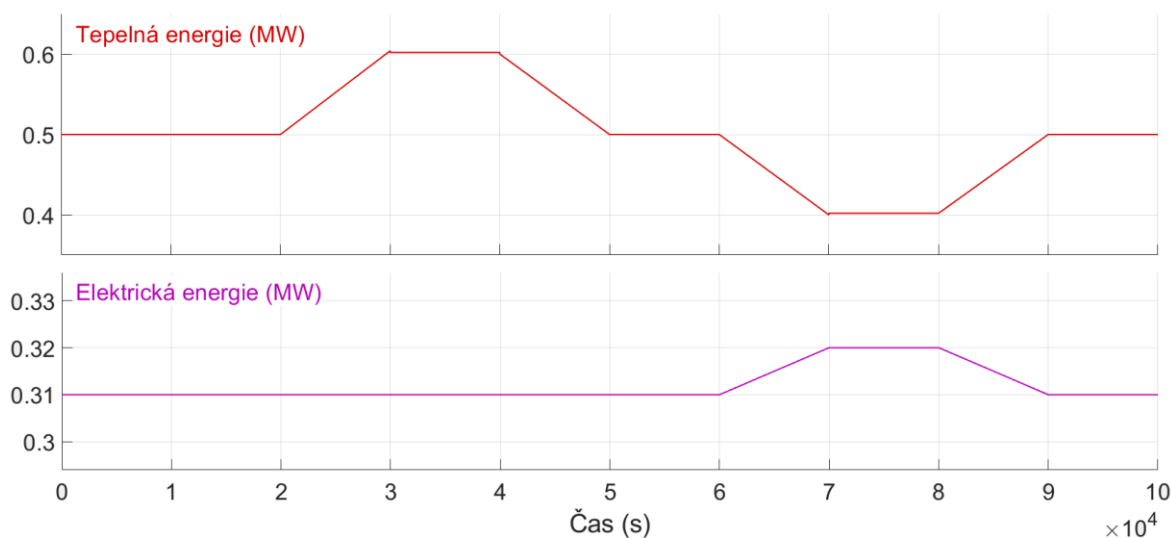
Tento model byl předlohou pro vytvoření modelu v rámci této diplomové práce a pro simulaci spotřeby a výroby elektrické energie.

Jako základ pro ukázkou tepelného obvodu mikrokogenerační jednotky (Rankinův cyklus) bylo použito schéma dostupné z Mathworks Rankinova cyklu [46]. Schéma v Simulinku je zobrazeno na Obrázku 5.3. Tento model se skládá z bloků knihovny Simscape Two phase fluid. V bloku spalovací komory se nachází bloky Saturated fluid chamber a Pipe, pomocí kterých se simuluje vypařování a následně přehřátí páry. Pára putuje přes škrtící ventil do vysokotlaké části turbíny a část páry se odebere přes extrakční ventil do výměníku (bloky Saturated fluid chamber a Pipe) pro ohřev TUV a vytápění. Na výstupu vysokotlaké části turbíny se zbylé množství páry přehřívá na teplotu před vstupem do vysokotlaké části turbíny pomocí bloku Pipe. Následně vstupuje do nízkotlaké části turbíny, kde se odebere zbylá část energie, kterou pára obsahuje. Z výstupu výměníku a nízkotlaké části turbíny vstupuje částečně zkondenzovaná pára do kondenzátoru, kde se přemění na kapalinu (skládá se z bloků Saturated fluid chamber a Pipe).

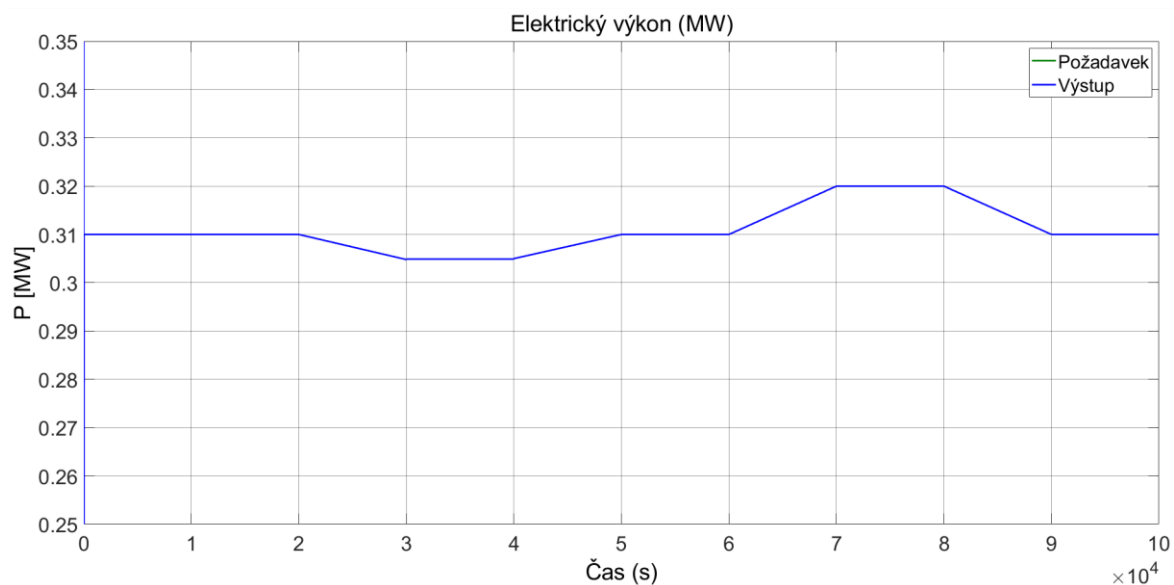


Obrázek 5.3: Rankinův cyklus [46]

Ačkoli výše popsáný model je určen pro energetická zařízení vyšších výkonů, než zde zvolená mikrokogenerační jednotka. Tak byl tento model vybrán a částečně upraven, aby bylo možno ukázat možný princip řízení a je zřejmé, že parametry jednotlivých technologických částí a jejich zapojení by se u reálné mikrokogenerační jednotky lišily. Nicméně dle fyzikálního principu je to velmi podobné, proto byl tento model zvolen. Z důvodu nedostatečného množství dat o všech prvcích modelu se nepodařilo upravit simulaci na navrhovanou mikrokogenerační jednotku, ale pouze snížit výkon na 310 kW. Tento model a výsledky simulace jeho provozu se zde uvádí pouze pro zobrazení regulace výroby. Na Obrázku 5.4 jsou požadavky na dodávku elektrického a tepelného výkonu. Pokud přesáhne tepelný výkon určitou hodnotu musí dojít ke snížení elektrického výkonu v případě, že spalovací komora dodává konstantní výkon, jak je zobrazeno na Obrázku 5.5.



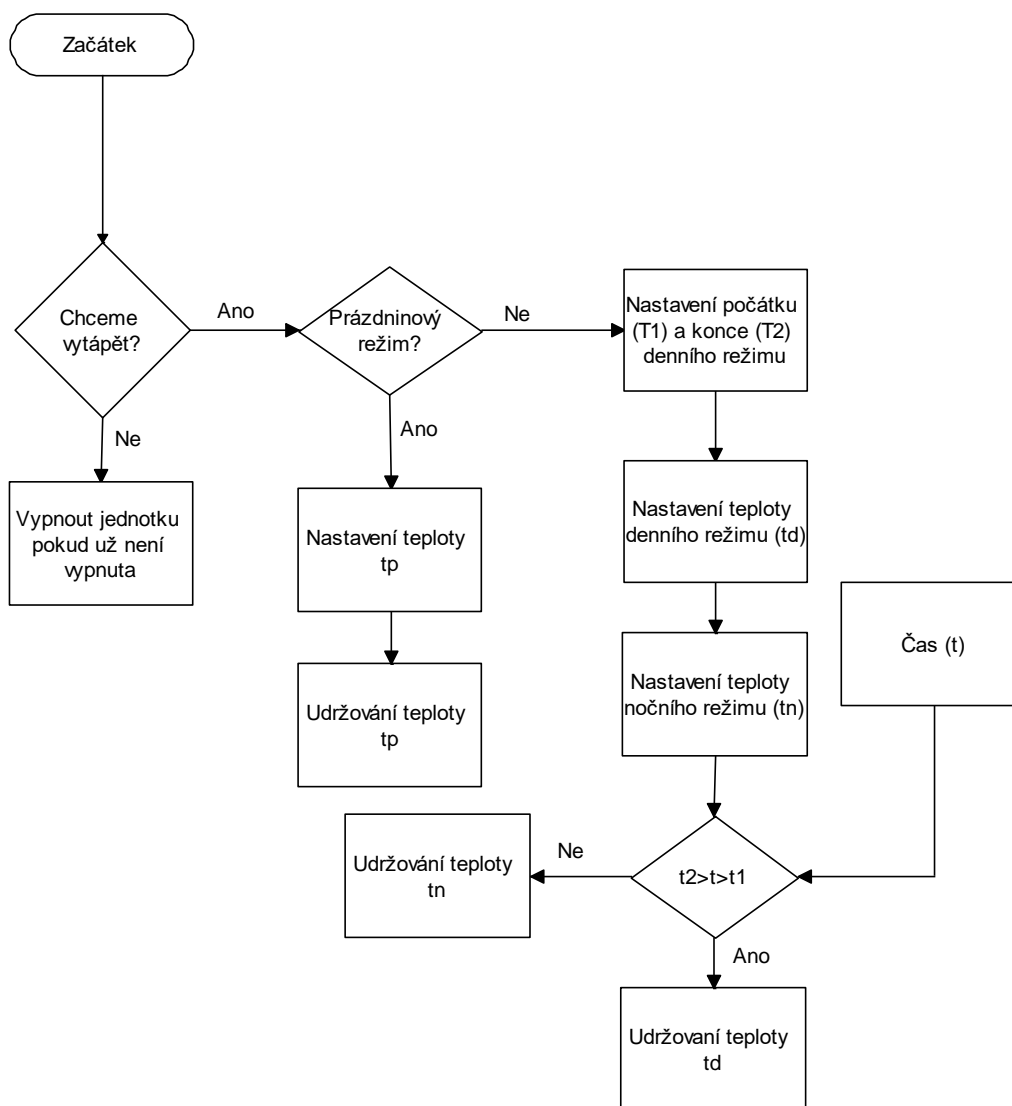
Obrázek 5.4: Průběh požadovaného a skutečného elektrického výkonu



Obrázek 5.5: Průběh požadovaného a výstupního výkonu pro Rankinův cyklus

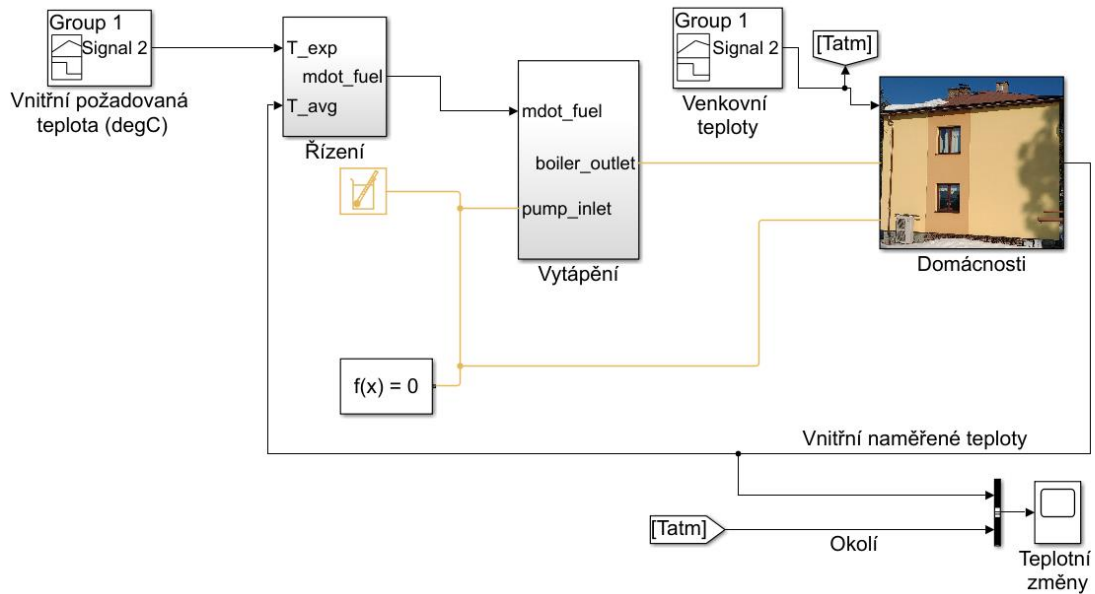
## 5.1 Řízení spotřeby a výroby tepelné energie

Vývojový diagram řízení spotřeby tepelné energie (vytápění) je na Obrázku 5.6. Nejdříve se rozhoduje, zda je zapotřebí vytápět či nikoli (jednotka se následně vypne). Pokud chceme vytápět, přejde se k nastavení, zda chceme takzvaný prázdninový režim (nastavuje se pouze jedna hodnota udržované teploty po celou dobu zapnutého režimu) či normální režim (denní a noční režim). Nejprve se nastaví čas pro denní režim (od kdy do kdy) a z něho se automaticky nastaví čas pro noční režim. Poté se pro oba režimy nastaví požadovaná konstantní teplota v domě.



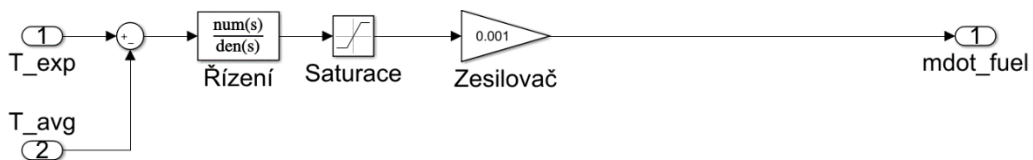
Obrázek 5.6: Vývojový diagram řízení spotřeby tepelné energie (vytápění)

Pro simulaci vytápění a řízení spotřeby tepelné energie byl využit model vytápění domu dostupného z Mathworks [47]. Model byl upraven, aby odpovídal navržené mikrokogenerační jednotce a modelové situaci se čtyřmi domácnostmi (viz. Obrázek 5.7). Model se skládá z řízení, vytápění (v tomto případě tepelná energie z mikrokogenerační jednotky) a bloku domu, ve kterém jsou simulovány čtyři domácnosti. Každá domácnost je reprezentována tepelnou ztrátou zdmi, okny a střechou. Každá cesta tepelné ztráty (zdmi, okny a střechou) je simulována pomocí konvekce, vedení, a tepelnou hmotou. Vytápěcí systém je tvořen tepelným zdrojem, bojlerem, akumulací, potrubím a čerpadlem sloužícím k cirkulaci teplé vody. Pomocí bloku Signal Builder je simulováno nastavení vnitřní teploty, kdy od 6 hodin ráno do 22 hodin večer je nastavena hodnota 22 °C a v noci od 22 hodiny do 6. hodiny ráno je nastavená hodnota teploty 18°C.



Obrázek 5.7: Schéma vytápění domácností [47]

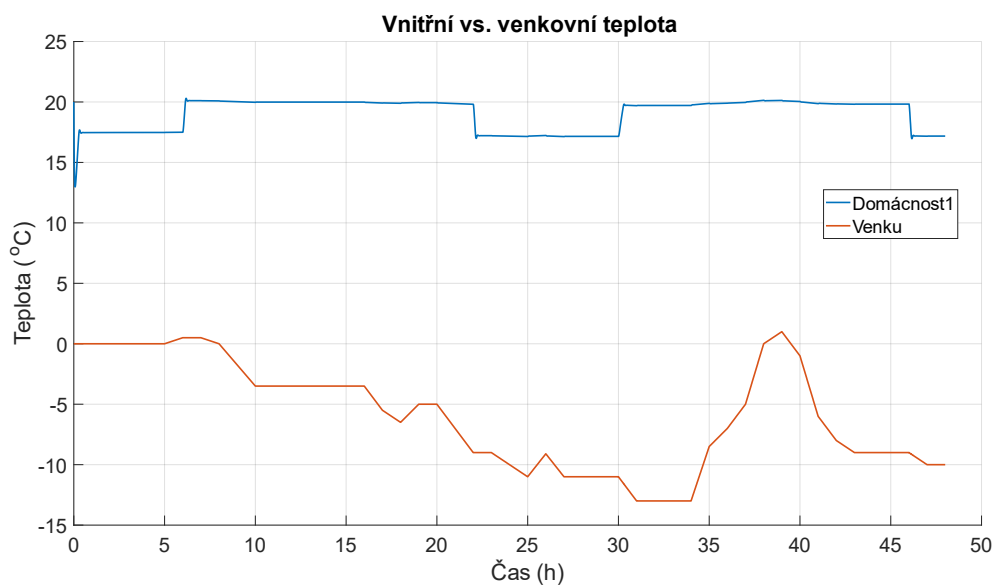
Řízení (Obrázek 5.8) porovnává nastavenou hodnotu, která je předávána přes regulátor, saturaci (zajišťuje nepřekročení maximálního výkonu tepelného zdroje) a zesilovač na akční člen otevření ventilu spalovací komory.



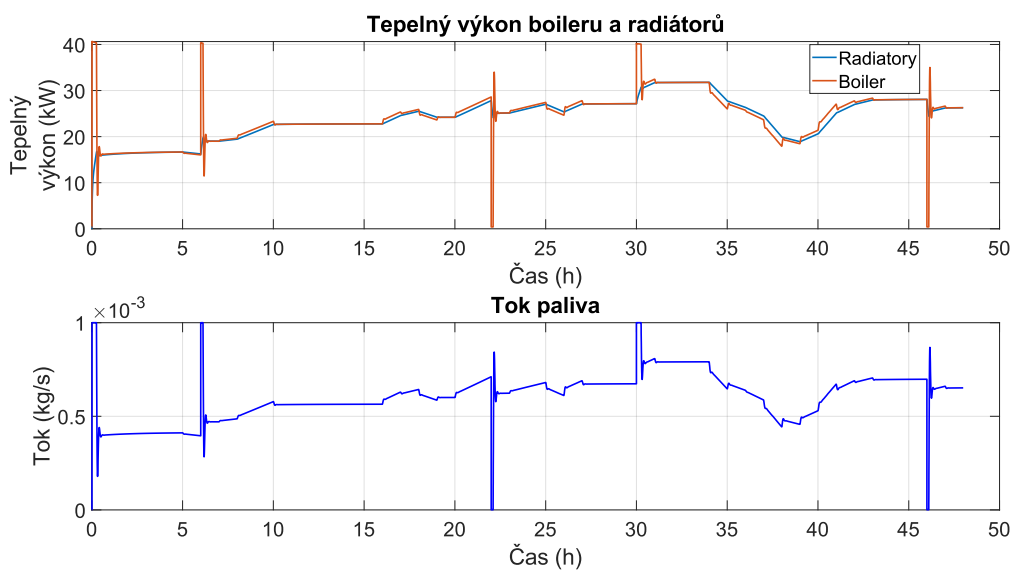
Obrázek 5.8: Schéma řízení výroby tepelné energie

Během simulace byly uvažovány a použity reprezentativní hodnoty teplot pro dva dny v zimě a dva dny v létě. Hodnoty venkovních teplot se měnily v průběhu jedné hodiny. Výsledná průběh venkovní teploty a vnitřní teploty ze simulace je vidět na Obrázku 5.9. Modrou barvou je vyobrazena hodnota teploty uvnitř domácnosti 1 a oranžovou barvou je zobrazena venkovní teplota. Průběh vnitřních teplot domácnosti 1 kopíruje nastavenou hodnotu teploty pro denní a noční režim. Venkovní teplota se pro dva sledované dny pohybuje v rozmezí mezi 2 °C a -15 °C. Z průběhu dodávaného tepelného výkonu zdroje (Obrázek 5.10) je možné vidět nárůst na maximální výkon TZ při změně z nočního režimu na denní a při obrácené změně (denní → noční režim) zase pokles tepelného výkonu TZ

téměř k nule. Průběh dodávaného paliva kopíruje průběh dodávaného tepelného výkon zdroje.

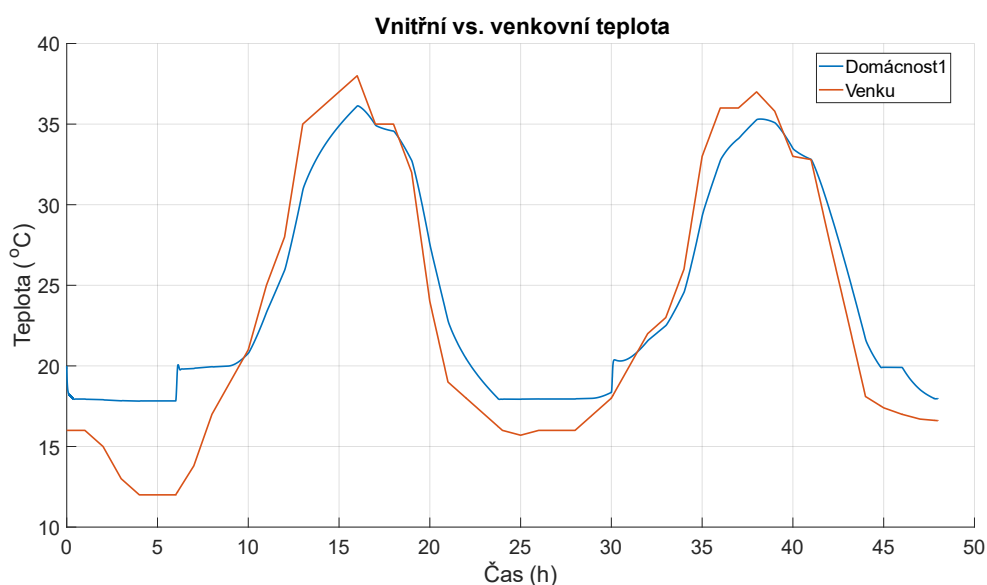


Obrázek 5.9: Průběhy venkovních a vnitřních teplot v zimě

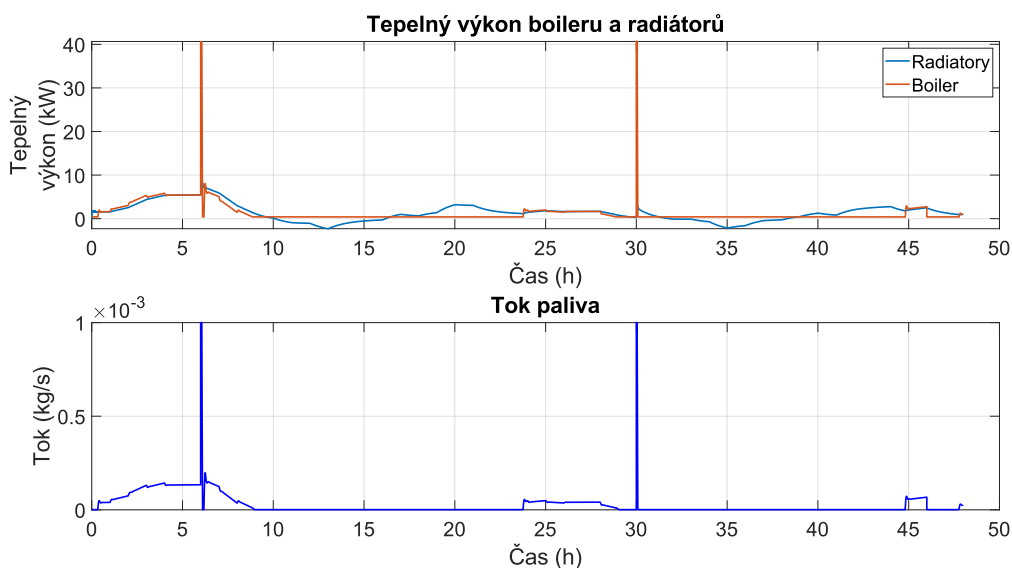


Obrázek 5.10: Průběhy tepelného výkonu zdroje a radiátorů v horní polovině a toku paliva v dolní polovině v zimě

Z průběhů teplot pro dva letní dny (Obrázek 5.11) rostou hodnoty teplot přes 30 °C, což je způsobeno absencí klimatizace (chlazení). V průbězích dodávaného tepelného výkonu od zdroje (Obrázek 5.12) je patrná dodávka tepelného výkonu pouze pár hodin v noci, když teplota v domácnosti klesne pod nastavenou mez. To by bylo z hlediska provozu mikrokogenerační jednotky neekonomické a je výhodnější dodávat tepelný výkon pomocí fotovoltaického systému, který naakumuluje energii přes den do baterií a v noci se tato energie využije přes topné spirály v bojleru na vytápění.



Obrázek 5.12: Průběhy teplot uvnitř domácnosti 1 a venku v létě

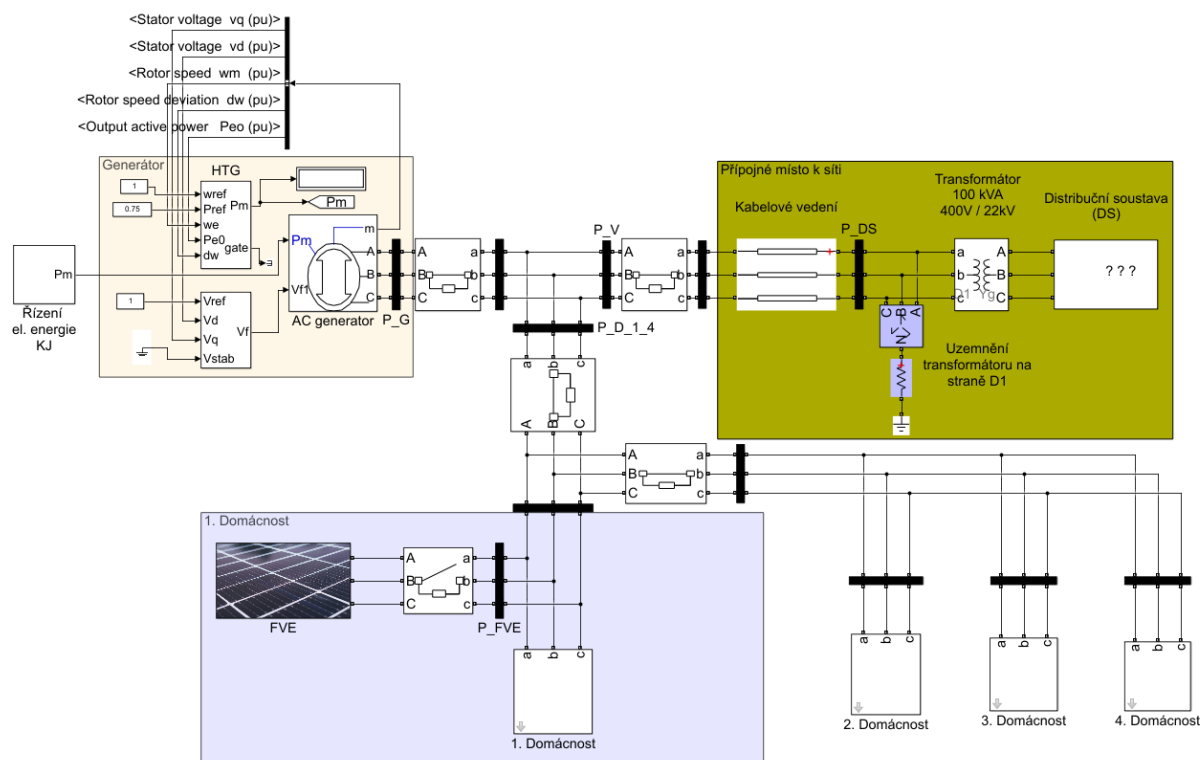


Obrázek 5.11: Průběhy tepelného výkonu zdroje a radiátorů v horní polovině a toku paliva v dolní polovině v létě



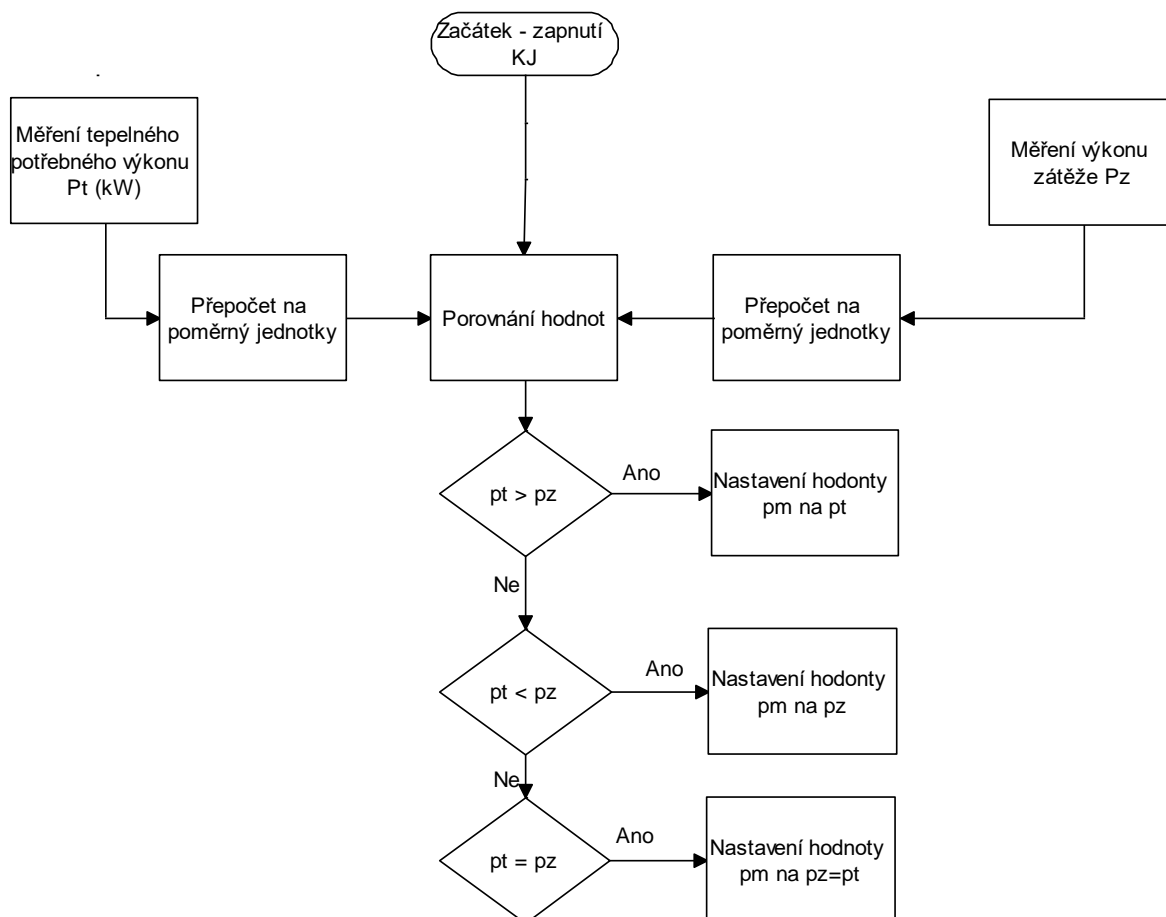
## 5.2 Řízení výroby elektrické energie

V této části práce jsou ukázány výsledky ze simulace zde vytvořeného modelu regulace výroby elektrické energie z mikrokogenerační jednotky s asynchronním generátorem. Model se skládá z několika částí (Obrázek 5.13). Žlutou barvou je zvýrazněna část asynchronního generátoru, řízení napětí a řízení ovládání servomotoru (HTG, sloužící k nastavení potřebného mechanického výkonu, který se rovná požadovanému elektrickému výkonu). Asynchronní generátor (20 kW, 400 V, 50 Hz) je spojen se zátěží přes vypínač. Paralelně k asynchronnímu generátoru je přípojné místo k elektrizační soustavě skládající se z distribuční soustavy 22 kV. Napětí z distribuční soustavy je sníženo pomocí transformátoru 22/0,4 kV ( $p = 55$ ). Na straně nižšího napětí je transformátor uzemněn a spojen se zátěží s asynchronním generátorem pomocí 100 m kabelu. Zátěž je rozdělena na čtyři domácnosti. Detailněji je ukázána pouze domácnost 1 v kapitole 5.3 o řízení spotřeby elektrické energie. Zbývající domácnosti se skládají ze stálé zátěže a manuálně odpínatelné zátěže. K domácnosti 1 je připojen fotovoltaický systém o výkonu 6,6 kW. Fotovoltaický systém se skládá z ideálního stejnosměrného zdroje (650 V), IGBT střídače a filtru ( $L = 17$  mH,  $C_{\text{kond}} = 15$   $\mu\text{F}$ ).



Obrázek 5.13: Silové schéma řízení výroby elektrické energie

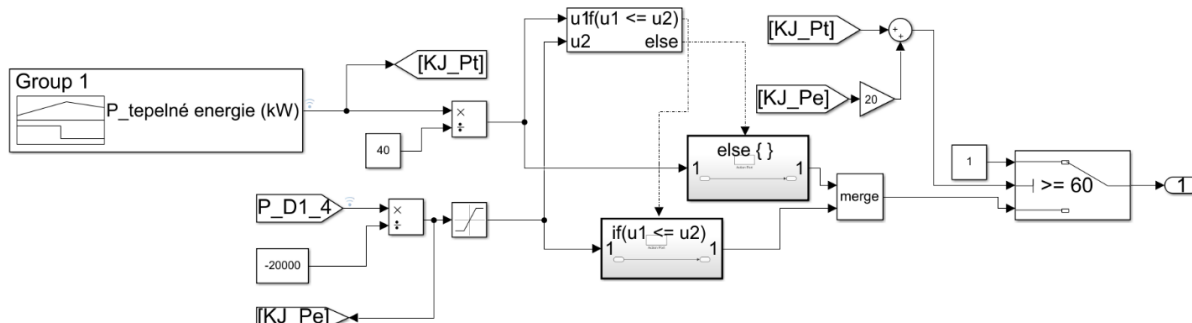
Vývojový diagram zde navrženého řízení výroby elektrické energie (Obrázek 5.14) začíná měřením a přepočtem na poměrné jednotky potřebného elektrického (pz) a tepelného výkonu (pt). Pokud je požadavek  $pt > pz$ , pak se nastaví mechanický výkon na pt. V opačném případě se nastaví hodnota pz na vstupující mechanický výkon do generátoru.



Obrázek 5.14: Vývojový diagram řízení výroby elektrické energie

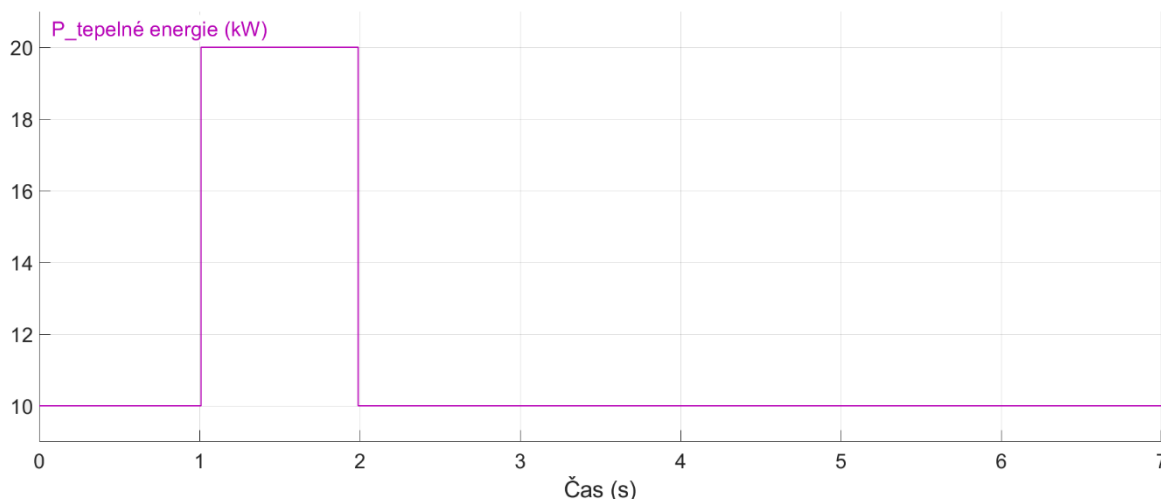
Samotné schéma řízení v Simulinku je na Obrázku 5.15. Blokem Signal Builder se simuluje dodávaná hodnota tepla. Blokem P\_D1\_4 se přivádí měření výkonu elektrické spotřeby. Hodnoty spotřeby tepelného a elektrického výkonu se převádí na poměrné jednotky (u elektrického výkonu je nastavena saturace na 1, protože generátor by se při větším zatížení, než jmenovitém dostal do nestabilní části momentové charakteristiky a při delším provozu by hrozilo přehřátí a zničení generátoru) a blok podmínky if porovnává tyto dvě hodnoty. Pokud bude poměrná hodnota tepelného výkonu větší, než poměrná hodnota elektrického výkonu nastaví se výstupní hodnota z logiky řízení na poměrnou hodnotu tepelného výkonu. V opačném případě se nastaví poměrná hodnota elektrického výkonu. V poslední řadě se kontroluje hodnota maximálního výkonu spalovací komory. V případě,

že jsou požadavky vyšší než schopnost spalovací komory, nastaví se poměrná hodnota na 1. Výsledný signál se přivádí na mechanický vstup asynchronního generátoru (vstup Pm na generátoru znázorňující mechanický výkon na Obrázku 5.13).



Obrázek 5.15: Schéma řízení výroby elektrické energie z asynchronního generátoru

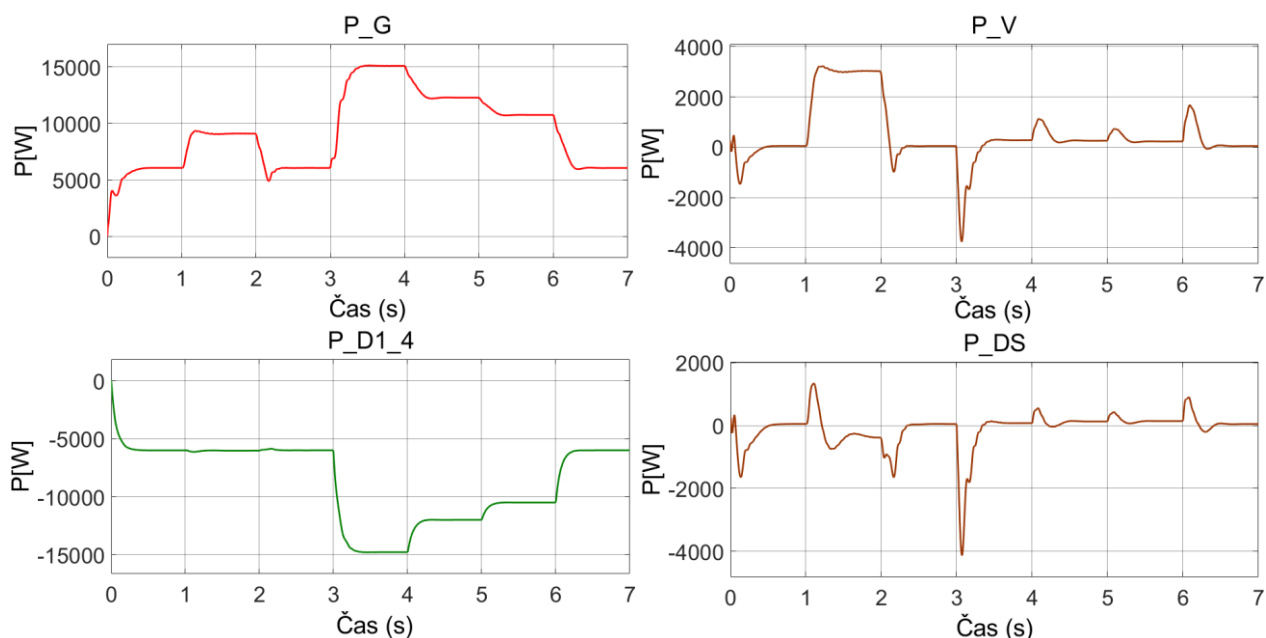
Na Obrázku 5.16 je simulovaný průběh tepelné energie.



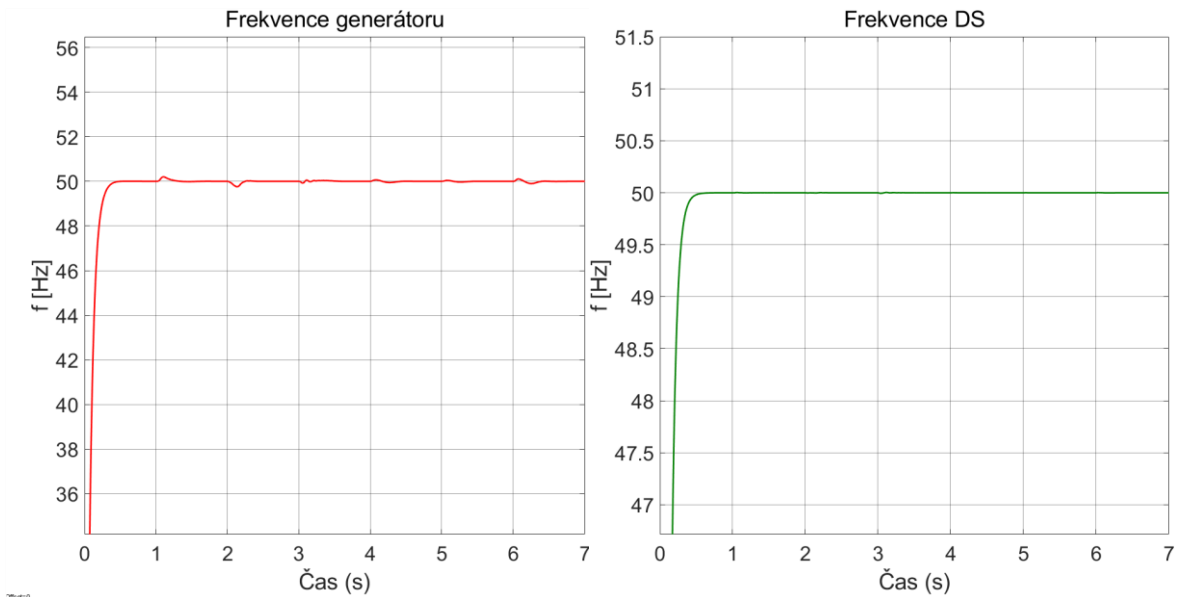
Obrázek 5.16: Průběh tepelné energie

Simulace probíhaly v průběhu 7 sekund. Během první sekundy se zvyšuje výkon generátoru na hodnotu požadovanou zátěží (6 kW). V první až druhé sekundě nastal případ, kdy poměrná hodnota tepelné energie je vyšší než poměrná hodnota elektrického výkonu. Generátor během této doby napájí jak zátěž, tak i dodává energii do sítě. Poté sníží svůj výkon na potřebný výkon zátěže (na 6 kW). Ve třetí sekundě se zvětší zátěž na 14,8 kW. Ve 4. sekundě se sníží zátěž na 12 kW, v 5. sekundě se sníží na 10,5 kW a v 6 sekundě se sníží na 6 kW. Průběhy vyráběného výkonu generátoru (P<sub>G</sub>), spotřebovávaného výkonu zátěží (P<sub>D1\_4</sub>), výkonu dodávaného z distribuční soustavy za kabelem (P<sub>V</sub>) a před distribučním

transformátorem ( $P_{DS}$ ) jsou zaneseny do grafu na Obrázku 5.17. Jak je možné vidět z průběhu výkonu na distribuční soustavě ( $P_{DS}$ ) při každé změně zátěže distribuční soustava dodává výkon zátěži (záporné hodnoty) nebo odebírá výkon (kladné hodnoty) vyrobený z generátoru, do doby, než generátor upraví svůj výkon spotřebě. Pokud se generátor řídí hodnotou tepelné energie, dodává do distribuční sítě výkon po celou dobu tohoto stavu. Změnu zátěže je možné pozorovat i v průběhu frekvence (viz. Obrázek 5.18). Při zvýšení výkonu zátěže dojde v prvních okamžicích ke snížení frekvence na generátoru (ve 3. sekundě) a naopak při snížení zátěže dojde ke zvýšení frekvence (například ve 4. sekundě).



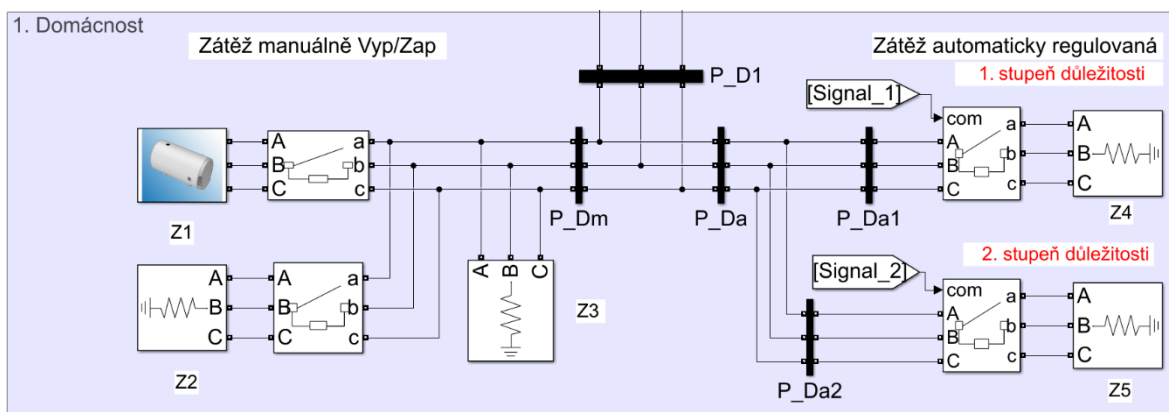
Obrázek 5.17: Grafy průběhů výkonu během připínání zátěže a fungování regulace



Obrázek 5.18: Průběhy frekvencí generátoru a distribuční soustavy

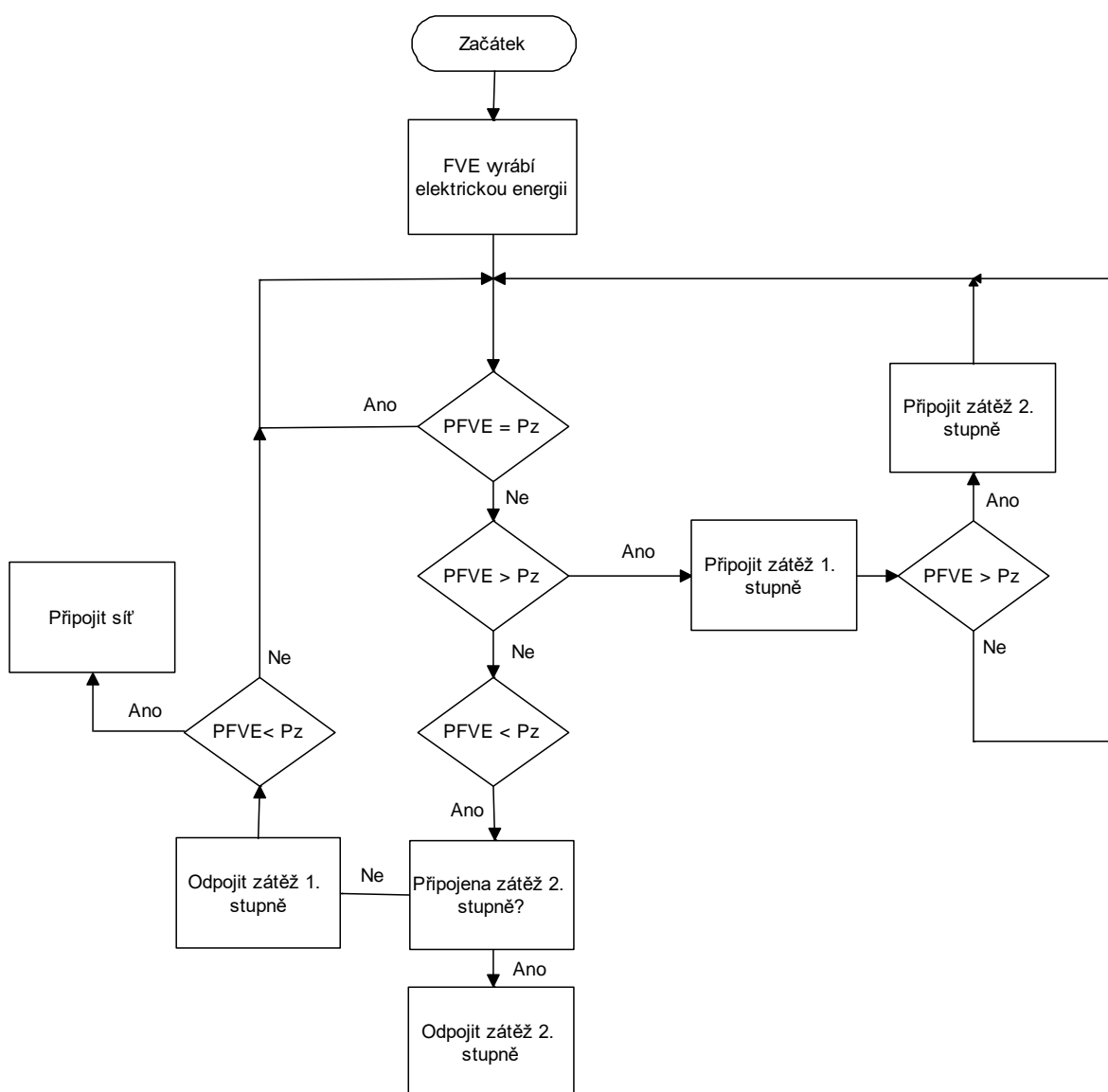
### 5.3 Řízení spotřeby elektrické energie

V této části simulace se uvažoval letní provoz, kdy mikrokogenerační jednotka je odstavena a fotovoltaický systém dodává výkon pouze na pokrytí spotřeby domácnosti 1, takže vyrábí elektrickou a tepelnou energii. Zátěž se v tomto případě skládá ze stále připojené zátěže, manuálně zapojované zátěže a automaticky regulovatelné zátěže (to neznamená, že v případě potřeby se automaticky regulovaná zátěž nemůže manuálně zapnout, ale na ukázkou regulace spotřeby se automaticky zapíná). Automaticky regulovaná zátěž má dva stupně důležitosti. Schéma zátěže v domácnosti 1 je na Obrázku 5.19.



Obrázek 5.19: Schéma zátěže v domácnosti 1

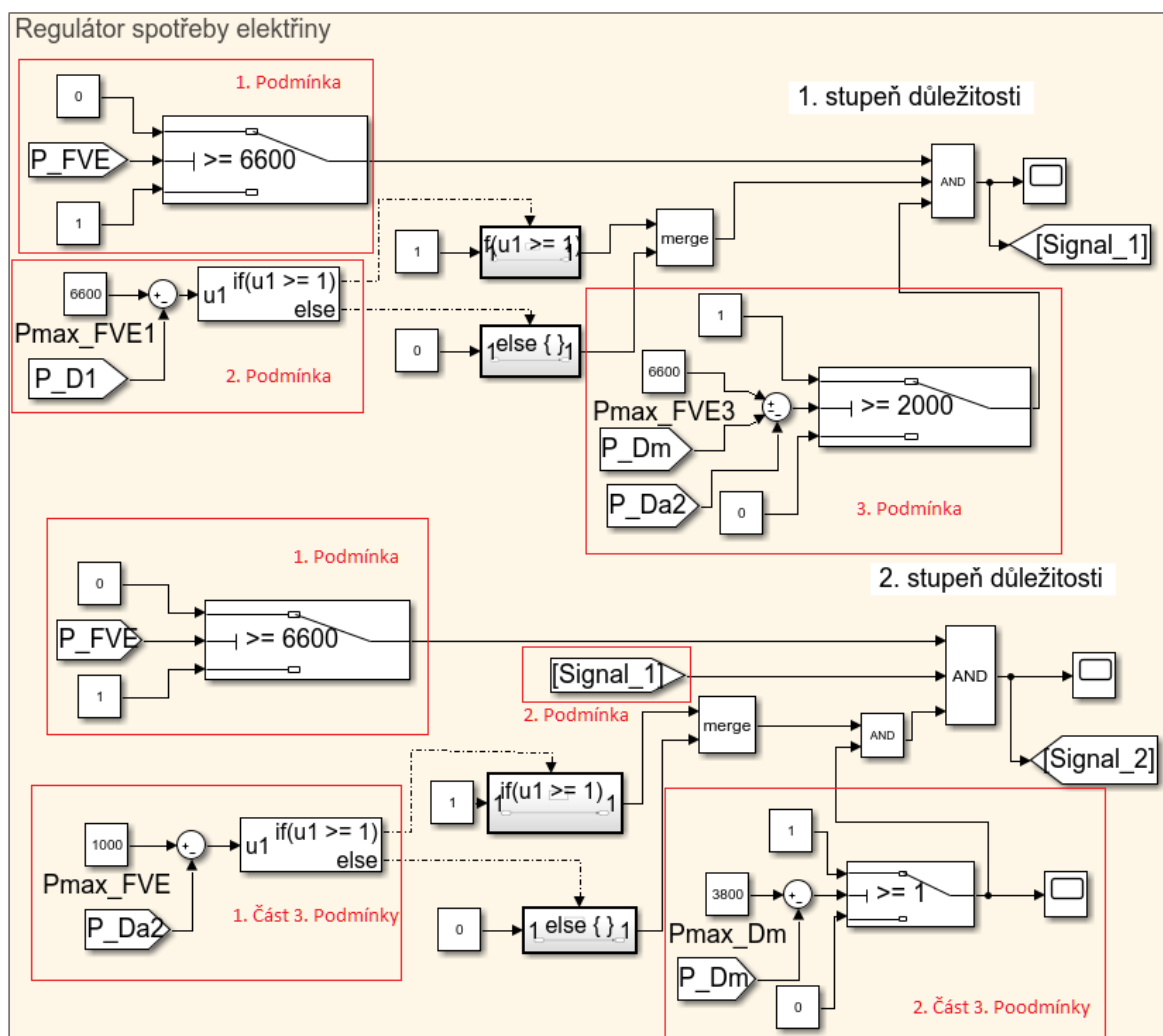
Na Obrázku 5.20 je vývojový diagram řízení spotřeby elektrické energie. Dodávaný výkon z fotovoltaického systému se porovnává s připojenou zátěží. V případě rovnosti dodávaného a odebíraného výkonu se žádná další zátěž nepřipojuje. Pokud je přebytek vyrobené energie z fotovoltaického systému, pak se nejprve připojí zátěž 1. stupně důležitosti a následně se, pokud je stále přebytek energie připojí se i druhý stupeň zátěže (v opačném případě se nepřipojí). Při snížení elektrického výkonu dodávaného z fotovoltaického systému dojde k odpojení 2. stupeň důležitosti (pokud je připojen) a v případě stálého nedostatku energie dojde k odpojení 1. stupeň důležitosti (pokud je připojen) a zbývající energie se až poté dodá pomocí sítě.



Obrázek 5.20: Vývojový diagram řízení spotřeby elektrické energie při výrobě z FVE

Schéma řízení spotřeby (Obrázek 5.21) je rozděleno na dvě části. V první části je logika připojování pro 1. stupeň důležitosti. Logický součinový blok zajišťuje splnění všech tří podmínek. První podmínkou je nepřesáhnutí maximálního výkonu fotovoltaického systému pomocí switche (ano = 0, ne = 1). Druhou podmínkou je nepřesáhnutí výkonu zátěže maximálnímu výkonu FV systému. Pokud platí  $P_z \leq 6,6 \text{ kW}$  nastaví podmínka hodnotu 1, jinak se nastaví hodnota 0. Třetí poslední podmínkou pro tento stupeň důležitosti je zjištění, zda je dostatek výkonu na připojení 1. stupně zátěže. V případě že ano nastaví switch na svém výstupu 1, v opačném případě 0.

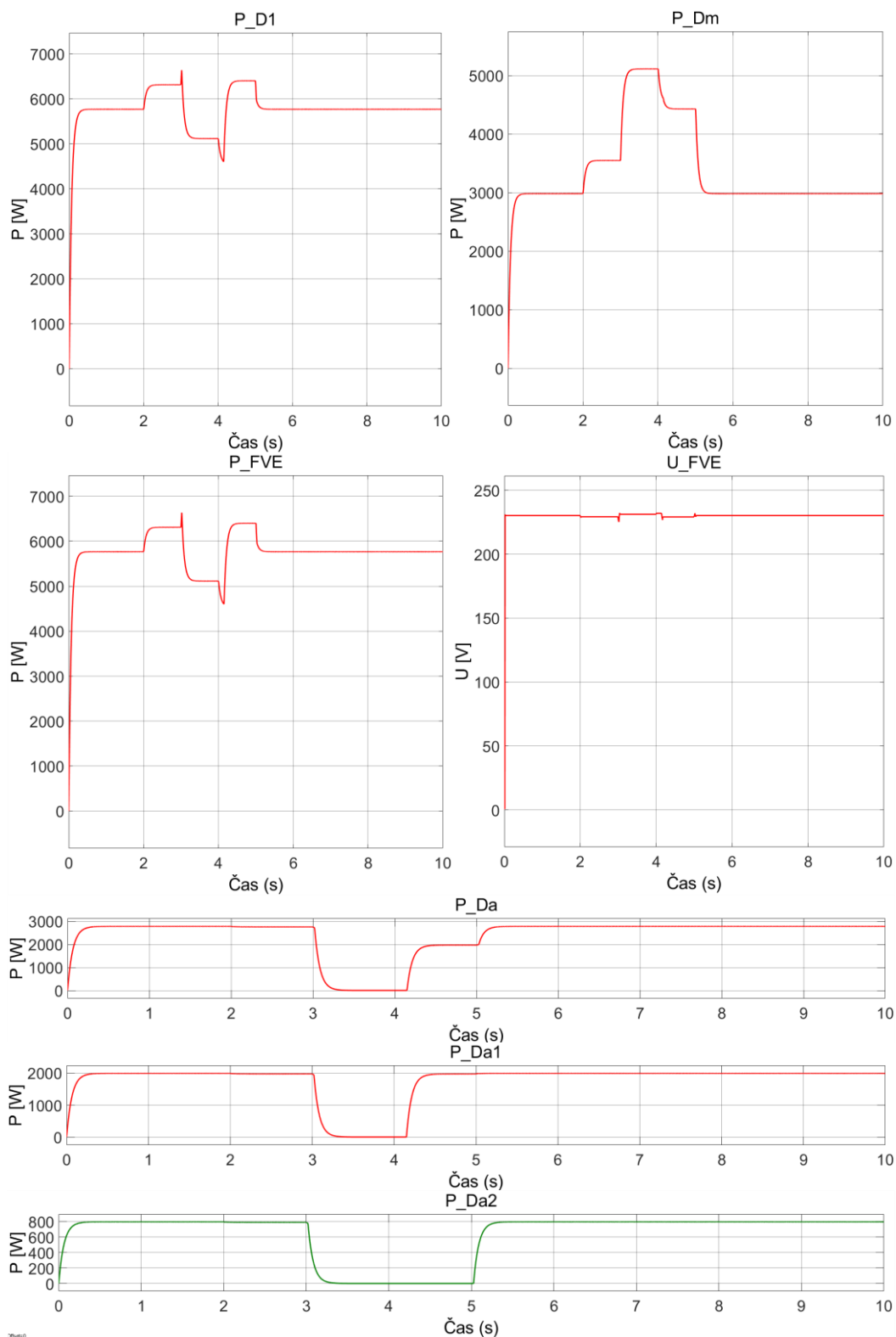
Řízení druhého stupně důležitosti je podobné tomu prvnímu. Logický součinový blok zajišťuje splnění tří podmínek. První podmínka je stejná jako u 1. stupně důležitosti. Druhá podmínka se uplatňuje, pokud je již sepnutý 1. stupeň důležitosti. Třetí podmínka je rozdělena na 2 části. První část se stará o to, aby výkon 2. stupně nepřesáhl určitou hodnotu (1 000 W). Druhá část zajišťuje připojení 2. stupně i v případě, že nejsou zapojeny všechny manuální zapínatelné zátěže.



Obrázek 5.21: Schéma řízení spotřeby elektrické energie 1. a 2. stupně důležitosti

Ke stálé zátěži Z3 o výkonu 3 kW se v druhé sekundě připojila zátěž Z1 (600 W) a ve třetí sekundě zátěž Z2 (1,5 kW). Odpojení zátěže Z1 proběhlo ve 4 sekundě a Z2 v 5 sekundě. Regulátor od začátku do třetí sekundy připojil zátěže Z4 (2 kW) a Z5 (800 W), protože všechny podmínky byly splněny. Ve třetí sekundě obě zátěže odpojil (podmínka o maximálním výkonu z fotovoltaického systému nebyla dodržena). Ve 4 sekundě po odpojení zátěže Z1 jsou splněny všechny podmínky pro připojení 1. stupně důležitosti a zátěž Z4 se připojí. V 5. sekundě po odpojení Z2 jsou splněny všechny podmínky pro připojení 2. stupně a zátěž Z5 se připojí. Průběhy dodávaného výkonu z fotovoltaického systému ( $P_{FVE}$ ), automaticky regulované zátěže (1. stupeň -  $P_{Da1}$  a 2. stupeň -  $P_{Da2}$ , celkový výkon z obou stupňů  $P_{Da}$ ), manuálně ovládané zátěže ( $P_{Dm}$ ) a napětí fotovoltaického systému ( $U_{FVE}$ ) jsou znázorněny v grafech na Obrázku 5.22.



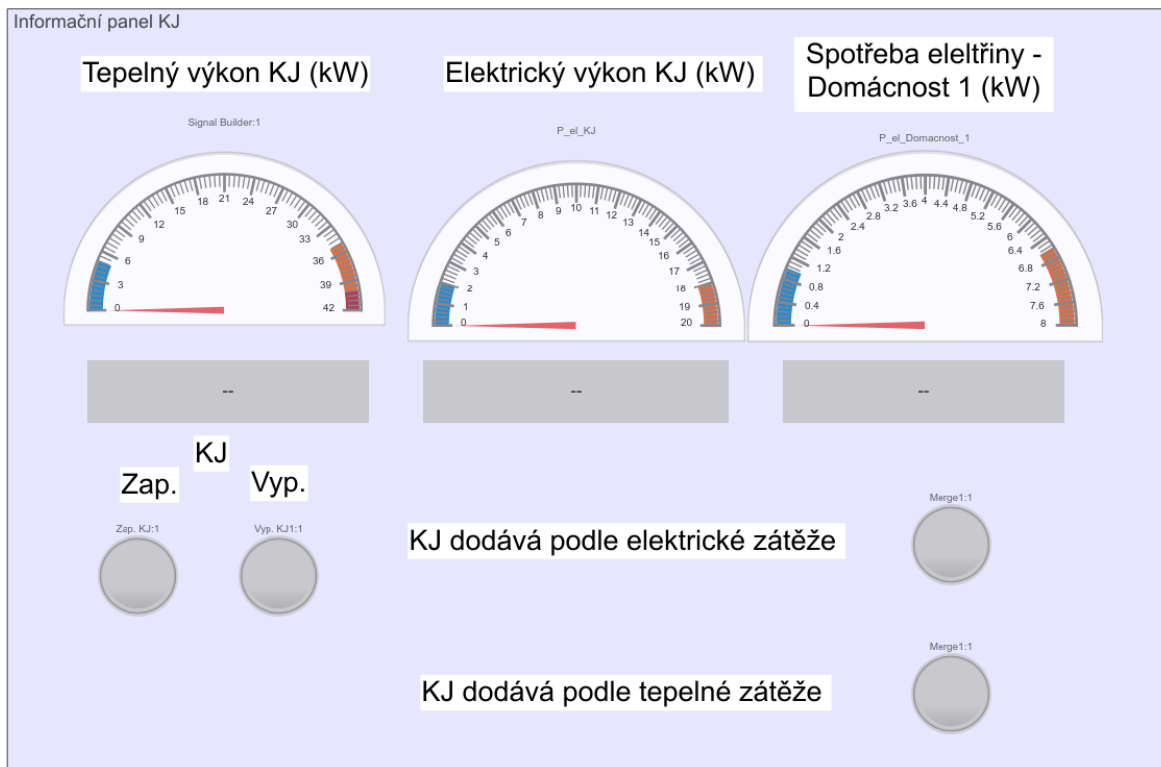


Obrázek 5.22: Průběhy výkonů a napětí řízení spotřeby elektrické energie

## 5.4 Informační panely

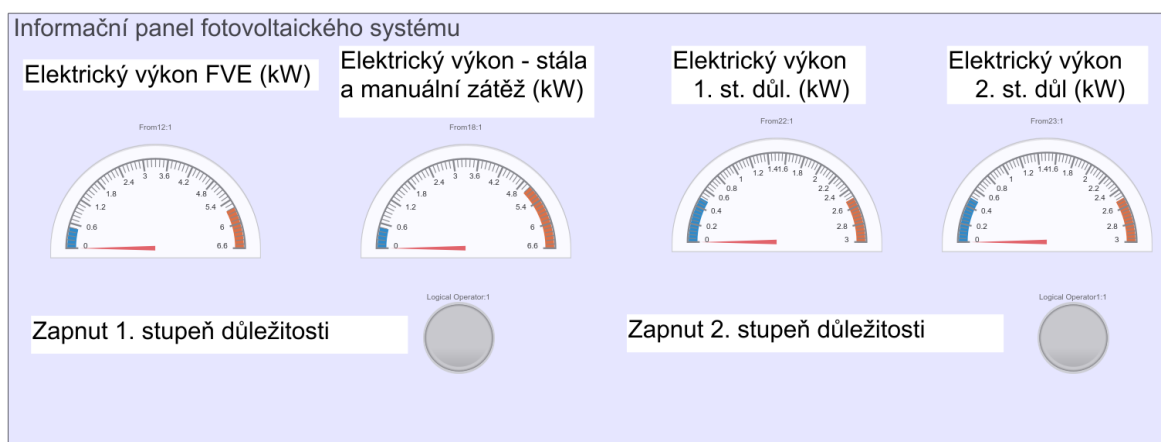
Pro mikrokogenerační jednotku a fotovoltaický systém byly vytvořeny informační panely, kde je zobrazen tepelný a elektrický výkon mikrokogenerační jednotky, spotřeba

domácnosti 1 (řešené poloviny dvojdomku), zapnutí mikrokogenerační jednotky a zda dodává mikrokogenerační jednotka elektrický výkon podle elektrické zátěže nebo podle tepelného výkonu popsáno v kapitole 5.3 řízení výroby elektrické energie.



Obrázek 5.23: Informační panel pro mikrokogenerační jednotku

V informačním panelu pro fotovoltaický systém je zobrazen dodávaný elektrický výkon z fotovoltaického systému, zatížení manuálně zapojované a stálé zátěže, zapnutí a vypnutí stupňů důležitosti i s jejich výkony.



Obrázek 5.24: Informační panel pro fotovoltaický systém

## 6 Energetické a ekonomické zhodnocení mikrokogenerační jednotky

### 6.1 Energetické zhodnocení

Diplomová práce je zaměřena zejména na využití biomasy, proto se vyhodnocení zaměřuje pouze na mikrokogenerační jednotku. Předpokladem návrhu je nepřetržitý provoz mikrokogenerační jednotky po celou dobu topné sezóny, zbylé dny v roce bude dodávat energii (tepelnou i elektrickou) fotovoltaický systém. Kogenerační jednotka nepracuje po celou dobu při svém maximálním výkonu, z tohoto důvodu se bude počítat energetické zhodnocení pro různá zatížení mikrokogenerační jednotky (100 %, 75 % a 50 % zatížení).

- 100 % výkon:

Výpočet počtu pracovních hodin  $t_p$ :

$$t_p = d_n \cdot 24 = 243 \cdot 24 = 5\,832 \text{ hodin} \quad (6.1)$$

Výpočet vyrobené tepelné energie  $Q_{100\%}$  [48]:

$$Q_{100\%} = Q_{KJt} \cdot t_p = 41,87 \cdot 5\,832 = 244\,185,84 \text{ kWh/rok} \quad (6.2)$$

$Q_{KJt}$  – Maximální tepelný výkon jednotky (41,87 kW)

Výpočet vyrobené elektrické energie  $E_{100\%}$  [48]:

$$E_{100\%} = P_{KJe} \cdot t_p = 20 \cdot 5\,832 = 116\,640 \text{ kWh/rok} \quad (6.3)$$

$P_{KJe}$  – Maximální elektrický výkon jednotky (20 kW)

- 75 % výkon:

Výpočet vyrobené tepelné energie  $Q_{75\%}$ :

$$Q_{75\%} = 0,75 \cdot Q_{KJt} \cdot t_p = 41,87 \cdot 0,75 \cdot 5\,832 = 183\,139,38 \text{ kWh/rok} \quad (6.4)$$

Výpočet vyrobené elektrické energie  $E_{75\%}$ :

$$E_{75\%} = 0,75 \cdot P_{KJe} \cdot t_p = 0,75 \cdot 20 \cdot 5\,832 = 87\,480 \text{ kWh/rok} \quad (6.5)$$

- 50 % výkon:

Výpočet vyrobené tepelné energie  $Q_{50\%}$ :

$$Q_{50\%} = 0,5 \cdot Q_{KJt} \cdot t_p = 0,5 \cdot 41,87 \cdot 5\,832 = 122\,092,92 \text{ kWh/rok} \quad (6.6)$$

Výpočet vyrobené elektrické energie  $E_{50\%}$ :

$$E_{50\%} = 0,5 \cdot P_{KJe} \cdot t_p = 0,5 \cdot 20 \cdot 5\,832 = 58\,320 \text{ kWh/rok} \quad (6.7)$$

Dále se bude uvažovat že bioplyn má stejnou výhřevnost jako zemní plyn (34 MJ/m<sup>3</sup>), můžeme vypočítat spotřebu paliva  $V_{pal}$  (vztah 6.8):

$$V_{pal} = \frac{\text{Příkon paliva}}{\text{Výhřevnost}} * tp = \frac{67,7}{\frac{34\,000}{3\,600}} * 5\,832 = 41\,805,15 \text{ m}^3 \quad (6.8)$$

Tab. 6.1: Hodnoty vyrobené energie kogenerační jednotkou rok

Výkon jednotky (%)	100	75	50
<b>Příkon paliva (kW)</b>	67,7	50,775	33,85
<b>Vyrobena elektrická energie (kWh/rok)</b>	116 640	87 480	58 320
<b>Vyrobena tepelná energie (kWh/rok)</b>	244 185,84	183 139,38	122 092,92
<b>Spotřeba paliva [m<sup>3</sup>/rok]</b>	41 805,15	31 354	20 902,67

V Tab.6.1 jsou vypočítány hodnoty vyrobené elektrické a tepelné energie pro různé výkony mikrokogenerační jednotky. Na posledním řádku se nachází vypočítaná hodnota spotřebovaného paliva při jednotlivých zatížení. Při jmenovitém výkonu (100 %) se vyrobí 116 640 kWh/rok elektrické energie a tepelné energie 244 185 kWh/rok. Spotřeba paliva je při tomto zatížení 41 805 m<sup>3</sup>/rok. Při zatížení 75 % se vyrobí 87 480 kWh/rok elektrické energie a tepelné energie 183 139 kWh/rok. Spotřeba paliva je 31 354 m<sup>3</sup>/rok. Při polovičním výkonu se vyrobí 122 092 kWh/rok tepelné energie a 58 320 kWh/rok elektrické energie. Spotřeba paliva je v tomto případě 20 902,67 m<sup>3</sup>/rok.

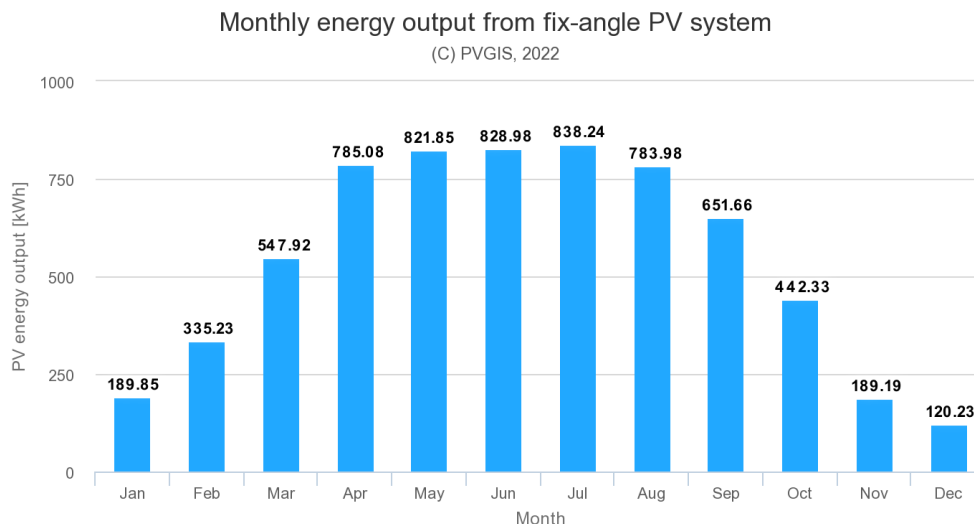
Spotřeba čtyř domácností je 112,69 MWh/rok, proto by navrhovaná jednotka pravděpodobně pracovala při svém polovičním výkonu, kdy vyrobí 122,09 MWh/rok tepelné energie a 58,32 MWh/rok elektrické energie.

Tato práce je zaměřena zejména na využití biomasy pro energetickou soběstačnost domu, a proto se nezabývá detailním ekonomickým a energetickým zhodnocením fotovoltaického systému. Hodnota vyrobené energie z FVE je převzata z výsledků zadaných parametrů zde navrženého FVE do aplikace PVGIS (Obrázku 6.1). V této práci je tedy především zhodnoceno energetické využití energie pocházející z biomasy pomocí mikrokogenerační jednotky a využití biomasy obecně.

Celková vyrobená energie z FVE je 6,53 MWh. Pokud vynásobíme denní potřebu energie, kterou musí systém vyrobit pro pokrytí ztrát a spotřeby energie, s počtem dní v měsíci (vztah 6.9), lze vyhodnotit, že FVE je schopna pokrýt plnou spotřebu elektrické a tepelné energie po většinu letních měsíců. Zbylá energie se může akumulovat do baterií

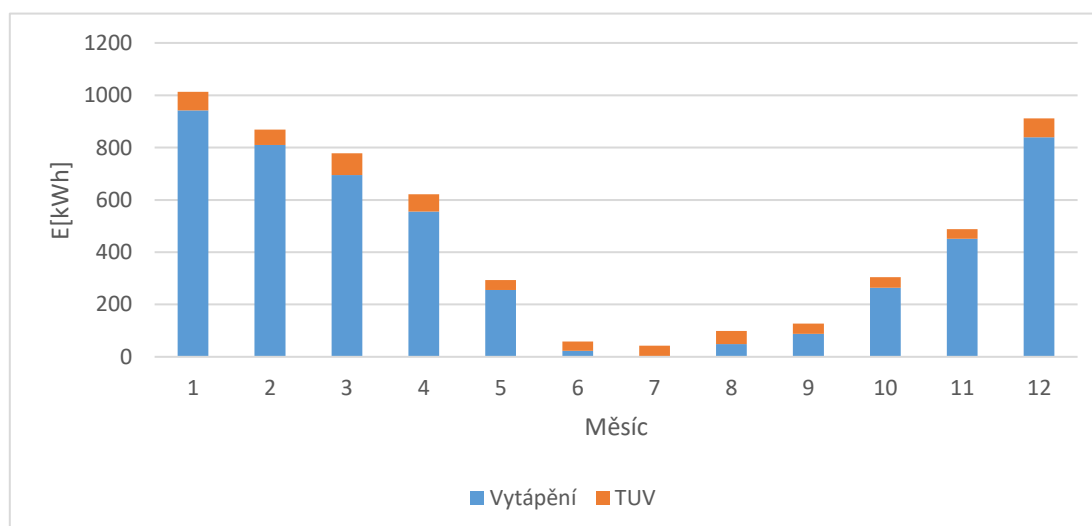
nebo se prodá do sítě v případě, že akumulace je plná. Provoz mikrokogenerační jednotky tedy v letních měsících není nutný.

$$E_{\text{měsíc}} = P_{FVE} \cdot n = 12,68 \cdot 31 = 393,08 \text{ kWh} \quad (6.9)$$



Obrázek 6.1: Vyrobená energie z navržené fotovoltaické elektrárny z programu PVGSI [44]

Vybraný objekt je v tuto chvíli vytápěn pomocí tepelného čerpadla. Množství spotřebované energie tepelného čerpadla na vytápění a ohřev teplé užitkové vody je získán z jeho informačního systému, který uchovává historická data spotřebované energie tepelným čerpadlem a spotřeba je vyobrazena po jednotlivých měsících na Obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Potřebovaná energie TČ na vytápění (modrá barva) a ohřev teplé vody (oranžová barva)

## 6.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomickou výhodnost navrhovaného řešení bohužel nebylo možné plně vyhodnotit, jelikož se i přes mnoho pokusů o kontaktování výrobce kogenerační jednotky, nepodařilo zjistit prodejní cenu řešení.

Ekonomické a energetické zhodnocení se zabývá i cenou dřeva, uhlí a elektřiny, jelikož v uvažovaném objektu se v předchozích letech topilo v kotli na tuhá paliva a nyní je objekt vytápěn tepelným čerpadlem.

Palivo vybrané kogenerační jednotky je bioplyn. V České republice se nachází pouze jedna bioplynová stanice, která dokáže přepravovat bioplyn. Kvůli nemožnosti zjistit reálnou cenu za  $\text{m}^3$  bioplynu je uvažovaná cena bioplynu rovna ceně za zemní plyn:  $N_{ZP} = 22.97 \text{ Kč/m}^3$  [50]. V současné době dochází ke změně ceny paliv především zemního plynu a elektrické energie každý den. Uvedené ceny se proto mohou lišit od aktuálních cen na trhu.

Spotřeba tepelné energie čtyř domácností je v topném období (pracovní oblast mikrokogenerační jednotky) 108,39 MWh/rok a mikrokogenerační jednotka vyrobí při polovičním výkonu 122,092 MWh/rok (o 11,22 % více než je spotřeba). Kogenerační jednotka potřebuje 20 902,67  $\text{m}^3$  plynu za rok na pokrytí spotřeby. Náklady a výnosy jsou počítány pro 4 stejné domácnosti se stejnou spotřebou elektrické a tepelné energie.

Náklady na palivo mikrokogenerační jednotky  $N_{PKJ}$ :

$$N_{PKJ} = V_{pal} \cdot N_{ZP} = 20\,902,67 \cdot 22,97 = 480\,134 \text{ Kč/rok} \quad (6.10)$$

Náklady při vytápění kombinovaným kotlem (uhlí a dřevo)  $N_{KK}$ :

Uhlí – typ Ořech (10,4 t)

Dřevo – Smrk (20  $\text{m}^3$ ) a Buk (20  $\text{m}^3$ )

Cena uhlí: 504 Kč/q [51]

Cena Smrku: 1 150 Kč/ $\text{m}^3$

Cena buku: 1 450 Kč/ $\text{m}^3$

$$N_{KK} = \text{cena uhlí} \cdot m + \text{cena smrku} \cdot V + \text{cena buku} \cdot V \text{ (Kč/rok)} \quad (6.11)$$

$$N_{KK} = 504 \cdot 104 + 1\,150 \cdot 20 + 1\,450 \cdot 20 = 104\,416 \text{ Kč/rok} \quad (6.12)$$

Náklady na vytápění tepelného čerpadla  $N_{TČ}$ :

Spotřeba tepelného čerpadla: 22,428 MWh/rok

Cena za elektrickou energii: 6 530 Kč/MWh od E-ON [51]

$$N_{TČ} = \text{Spotřeba} \cdot \text{cena} = 22,428 \cdot 6\,530 = 146\,455 \text{ Kč/rok} \quad (6.13)$$

Zisk za vlastní výrobu elektrické energie  $V_{el.e}$ :

$$E_{el.e} = E_{den} \cdot d_n \cdot 4 = 11,21 \cdot 243 \cdot 4 = 10\,896,12 \text{ kWh} \quad (6.14)$$

$$V_{el.e} = E_{el.e} \cdot cena = 10,896 \cdot 6\,530 = 71\,152 \text{ Kč/rok} \quad (6.15)$$

Zisk za dodanou nespotřebovanou elektrickou energii  $V_{el.e2}$ :

Cena za vykoupenou elektrickou energii: 1 245 Kč/MWh [52]

$$V_{el.e2} = (E_{50\%} - E_{el.e}) \cdot \text{výkupní cena (Kč/rok)} \quad (6.16)$$

$$V_{el.e2} = (58,32 - 10,896) \cdot 1\,245 = 59\,043 \text{ Kč/rok} \quad (6.17)$$

Srovnání kogenerační jednotky a kombinovaného kotle  $Z_{KJKotel}$ :

$$Z_{KJKotel} = N_{KK} + V_{el.e} + V_{el.e2} - N_{PKJ} \text{ (Kč/rok)} \quad (6.18)$$

$$Z_{KJKotel} = 104\,416 + 71\,151 + 59\,043 - 480\,134 = -245\,524 \text{ Kč/rok} \quad (6.19)$$

Srovnání kogenerační jednotky a tepelného čerpadla  $Z_{KJTČ}$ :

$$Z_{KJTČ} = N_{TČ} + V_{el.e} + V_{el.e2} - N_{PKJ} \text{ (Kč/rok)} \quad (6.20)$$

$$Z_{KJTČ} = 146\,455 + 71\,151 + 59\,043 - 480\,134 = -203\,485 \text{ Kč/rok} \quad (6.21)$$

V případě, že by domácnosti topily v kombinaci dřeva a uhlí a platily za elektrickou energii 6 530 Kč/MWh, roční náklady za energie by se vyšplhaly na 175 567 Kč. Pokud by využívaly tepelné čerpadlo, zaplatily by za energie o 42 039 Kč ročně více než při vytápění pomocí dřeva a uhlí.

Z vypočtených hodnot nákladů a zisků je vidět, že pokud by se bioplyn prodával za stejnou cenu jako zemní plyn, provoz mikrokogenerační jednotky by byl dražší než ten za tepelné čerpadlo nebo kombinovaný kotel. Oproti kombinovanému kotli by provoz jednotky stál o 245 524 Kč více a oproti tepelnému čerpadlu o 203 485 Kč více.

## Závěr

Tato diplomová práce se zabývá energetickým využitím biomasy v České republice pro kombinovanou výrobou elektrické a tepelné energie se zaměřením na mikrokogenerační jednotky. Nejrozšířenějším typem mikrokogenerační jednotky je jednotka se spalovacím motorem. Jejich hlavní výhodou oproti ostatním typům mikrokogeneračních jednotek spočívá ve vysoké účinnosti v širokém výkonovém spektru, menších investiční náklady a možnost opravit motor v místě použití. Jejich hlavní nevýhodou je množství pohyblivých částí a vysoké pracovní teploty.

V první třetině praktické části se diplomová práce zabývá výpočtem tepelných ztrát vybraného objektu (8,5 kW). Z výpočtu tepelných ztrát a spotřeby elektrické energie byla následně pro potřeby objektu navržena mikrokogenerační jednotka TEDOM Micro 30 na bioplyn (použita pro čtyři domácnosti, kvůli své velikosti), která spolupracuje s vybraným fotovoltaickým systémem (pro jedinou domácnost o výkonu 6,6 kW<sub>p</sub>) a distribuční soustavou. Provoz mikrokogenerační jednotky je předpokládán pouze v topném období, kdy je spotřeba tepelné a elektrické vyšší než v letních měsících, kdy není potřeba tolik tepelné energie. Distribuční soustava v navrhovaném systému slouží pro vykrytí situací, kdy systém nebyl schopen dodávat dostatek výkonu. Případný přebytek elektřiny by byl dodán do distribuční soustavy. Fotovoltaický systém by měl zajistit elektrickou a tepelnou energii po zbytek roku.

Ve druhé třetině praktické části bylo navrženo a simulováno řízení výroby a spotřeby elektrické a tepelné energie. Regulace elektrické a tepelné části se musela simulovat odděleně vlivem nekompatibilních rozdílných fyzikálních prostředí elektrické a tepelné části.

V poslední třetině praktické části se diplomová práce zabývá energetickým a ekonomickým zhodnocením provozu mikrokogenerační jednotky oproti kombinovanému kotli na tuhá paliva (dřevo a uhlí) a tepelnému čerpadlu, které vytápí a dodává teplou užitkovou vodu do objektu v současné době. Zhodnocení je počítáno pro 4 domácnosti, přičemž při vytápění pomocí kotle by domácnosti zaplatily za tepelnou a elektrickou energii 175 567 Kč za rok. Při použití tepelného čerpadla by domácnosti zaplatily 217 606 Kč za rok. Při použití mikrokogenerační jednotky by za rok zaplatili za bioplyn (v případě že by cena bioplynu a zemního plynu byla totožná) 480 134 Kč. V porovnání s kotlem by při použití mikrokogenerační jednotky (se započítáním zisku z prodané elektřiny 59 042 Kč)



zaplatily o 245 524 Kč více za rok. Při srovnání s tepelným čerpadlem je provoz jednotky dražší o 203 485 Kč za rok.

Z toho vyplývá, že pro takto malé aplikace jsou zatím mikrokogenerační jednotky neekonomické. Čistě nejekonomičtější je vytápění kombinovaným kotlem na tuhá paliva, za předpokladu vlastní přípravy dřeva na palivo. Lepší variantou z hlediska ekologického i jednoduchosti používání je tepelné čerpadlo.

Mikrokogenerační jednotky mají velký potenciál použití v budoucnosti i v těchto malých aplikacích díky ubývajícím fosilním palivům a jejich rostoucí ceně. Navíc jsou snadno regulovatelné a představují zástupce decentralizovaných zdrojů.

## Literatura

- [1] Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: [https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/potencial\\_biomasy\\_druhy\\_bilance\\_a\\_vlastnosti\\_paliv\\_z\\_biomasy.pdf](https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/potencial_biomasy_druhy_bilance_a_vlastnosti_paliv_z_biomasy.pdf)
- [2] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVÍČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-865-3406-5.
- [3] Energie větru, vody, biomasy [online]. Brno: Publi.cz, 2016 [cit. 2021-11-14]. ISBN 978-80-88058-08-3. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/Impresum.html>
- [4] DVORSKÝ Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
- [5] POHOŘELÝ, Michael a Michal JEREMIÁŠ. Zplyňování [online]. 24.11. 2010 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>
- [6] ERÚ. ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2020 [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173](https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni_zprava_provoz_ES_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173)
- [7] ERÚ. ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU TEPLÁRENSKÝCH SOUSTAV ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2020 [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/7156840/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_TS\\_2020.pdf/f353f7f2-ad73-4a82-8bb2-c0209b38b26a](https://www.eru.cz/documents/10540/7156840/Rocni_zprava_provoz_TS_2020.pdf/f353f7f2-ad73-4a82-8bb2-c0209b38b26a)
- [8] MPO. Rozvoj podporovaných zdrojů energie do roku 2030 [online]. In: . 11.3.2019 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/elektroenergetika/obnovitelne-zdroje/rozvoj-podporovanych-zdroju-energie-do-roku-2030-podkladovy-dokument-nkep--244303/>
- [9] Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu. In: . 2019. Dostupné také z: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/cs\\_final\\_necp\\_main\\_cs.pdf#page=33&zoom=100,90,504](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/cs_final_necp_main_cs.pdf#page=33&zoom=100,90,504)
- [10] VRBOVÁ, Zuzana. Směrnice o obnovitelných zdrojích dozná významných změn [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/evropska-unie/smernice-obnovitelnych-zdrojich-dozna-vyznamnych-zmen>

- [11] HABART, Jan. Podpora na udržení zdroje v provozu [online]. 2018 [cit. 2021-11-24].  
Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/podpora-na-udrzeni-zdroje-v-provozu>
- [12] Možnosti podpory v oblasti úspor energie [online]. MPO, 2017 [cit. 2021-11-24].  
Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/dotace-na-uspory-energie/moznosti-podpory-v-oblasti-uspor-energie--233023/>
- [13] LYČKA, Zdeněk. Pohledem znalce: Připravované dotace na biomasové kotle budou v maximální možné míře [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/22512-pohledem-znalce-pripravovane-dotace-na-biomasove-kotle-budou-v-maximalni-mozne-mire>
- [14] KAŠINSKÝ, Jan. Jaký je potenciál využití biomasy v Česku a ve světě. O energetice [online]. 18.2.2019 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nazory/jaky-potencial-vyuziti-biomasy-cesku-ve-svete>
- [15] BEDNÁR, Jan. Podpora pěstování energetické biomasy v ČR a v kontextu s EU [online]. 2008 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/podpora-pestovani-energeticke-biomasy-v-cr-a-v-kontextu-s-eu>
- [16] ČEPRO A.S. Biopaliva [online]. [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.ceproas.cz/produkty-a-sluzby/biopaliva>
- [17] Nová zelená úsporám [online]. MŽP, 2014 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://novazelenausporam.cz/rodinne-domy/#grant-156>
- [18] MARTINEZ Simon, MICHAUX Ghislain, SALAGNAC Patrick, BOUVIER Jean-Louis. Micro-combined heat and power systems (micro-CHP) based on renewable energy sources, Energy Conversion and Management, Vol. 154, 2017, str. 262-285, ISSN 0196-8904.
- [19] Mikrokogenerace – efektivní nástroj stability a bezpečnosti dodávek energie [online]. MPO, 2011 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e1fa66875530f33e8a/mikrokogenerace.pdf>
- [20] ŠPALE, Jan. Wave120 - kogenerační ORC jednotka na dřevní štěpku v kontejnerovém provedení [online]. 20.1.2021 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/obnovitelne-zdroje/wave120-kogeneracni-orc-jednotka-na-drevni-stepku-v-kontejnerovem-provedeni-322>
- [21] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Kogenerační jednotky - zřizování a provoz [online]. Praha: GAS, 2007 [cit. 2021-11-14]. GAS. ISBN 978-80-7328-151-9.
- [22] TOMANOVÁ, Amaya. Co to vlastně je Smart Home? [online]. 2018 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.ujezd.net/co-vlastne-je-smart-home>

- [23] RAKOVÁ, Lenka. Nové technologie v elektrotechnice [online]. In: 2021. [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://classroom.google.com/u/1/c/MzKxNDM5NDUxMzI0>
- [24] ČEZ. Smart technologie [online]. [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://euroinfoproject.eu/wp-content/uploads/2018/12/2-smart-technologie.pdf>
- [25] ZHOU, Bin a and colleagues. Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies [online]. 2016 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116002823>
- [26] FARHANGI, Hassan. The path of the smart grid [online]. In: . 2010 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5357331>
- [27] LASSETER, Robert H. a Paolo PIAGI. Microgrid: a conceptual solution [online]. In: . 2004 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1354758>
- [28] LASSETER, Robert H. MicroGrids [online]. In: . 2002 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/985003>
- [29] KATIRAEI, Farid, Reza IRAVANI, Nikos HATZIARGYRIOU a Aris DIMEAS. Microgrids management [online]. In: . 2008 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4505827>
- [30] RAKOVÁ, Lenka. Obnovitelné zdroje energie [online]. In: 2021. [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://classroom.google.com/u/1/c/MzKxMjcZMDYyODYz>
- [31] Mapy.cz [online]. Praha: Seznam.cz, 2021 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=15.3307000&y=50.6064000&z=11>
- [32] ČCHMÚ [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2020 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-data-dle-z.-123-1998-Sb#>
- [33] SVATOŠOVÁ, Irena. *Tepelné ztráty objektu* [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/tzb-fbi/6.html>
- [34] Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin: ČSN 730540-3. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [35] Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění: ČSN 06 0210. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [36] ČVUT. Celková roční potřeba tepla [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/?mod=podklady&id=1>
- [37] MALL.CZ. Dakon DOR 24 [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://www.mall.cz/kotle/dakon-dor-24>

- [38] PANASONIC. Panasonic KIT-WXC09H3E8 (WH-SXC09H3E8 + WH-UX09HE8) [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: [https://www.aircon.panasonic.eu/CZ\\_cs/model/kit-wxc09h3e8/](https://www.aircon.panasonic.eu/CZ_cs/model/kit-wxc09h3e8/)
- [39] TEDOM [online]. Výčapy [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.tedom.com/cs/kogeneracni-jednotky/biopllyn/>
- [40] Mikrokogenerační jednotka v aplikaci pro rodinný dům nebo menší objekt komerčního typu [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18766/1/Mikrokogeneracni%20jednotka%20v%20aplikaci%20pro%20rodinny%20dum%20nebo%20mensi%20objekt%20komerčního%20typu\\_Martin%20Mlynarik.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18766/1/Mikrokogeneracni%20jednotka%20v%20aplikaci%20pro%20rodinny%20dum%20nebo%20mensi%20objekt%20komerčního%20typu_Martin%20Mlynarik.pdf). Diplomová práce. ZČU.
- [41] Návrh energeticky soběstačné ekofarmy [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/23158/1/BP%20Hejtmankova%20Petra.pdf>. Bakalářská práce. ZČU.
- [42] Trina Solar [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.trinasolar.com/en-glb/product>
- [43] Eco Product [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://ecoproduct.cz/p/82032-menic-victron-quattro-48v-15000va-200a-100a-100-21824>
- [44] PV GIS [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)
- [45] Developing a Model for a CHP System with Storage [online]. 13 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.ajer.org/papers/v5%2804%29/B0504015027.pdf>
- [46] Rankine Cycle (Steam Turbine) [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/rankine-cycle-steam-turbine.html>
- [47] House Heating System [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/ug/house-heating-system.html?searchHighlight=heating%20system&s\\_tid=srchtitle\\_heating%20system\\_2](https://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/ug/house-heating-system.html?searchHighlight=heating%20system&s_tid=srchtitle_heating%20system_2)
- [48] KOGENERAČNÍ JEDNOTKY PRO DOMÁCÍ VYUŽITÍ [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5078](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5078). Diplomová práce. VUT Brno.

- [49] PXE - Zemní plyn [online]. 2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/pxe-zemni-plyn-graf-vyvoje-ceny/>
- [50] Paliva Makový [online]. 2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.palivamakovy.cz/cenik/>
- [51] Kalkulátor cen energií [online]. 2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://kalkulator.tzb-info.cz/cz/dodavka-elektricke-energie-porovnani-nabidek?id=4346>
- [52] TBZ - info [online]. 2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energie/91-vyse-vykupnich-cen-a-zelenych-bonusu>

**Seznam obrázků:**

Obrázek 1.1: Vývoj biomasy v České republice [6] .....	- 8 -
Obrázek 1.2: Podíl jednotlivých druhů paliv na výrobě elektrické energie v roce 2020 [6] .....	- 9 -
Obrázek 1.3: Podíl jednotlivých druhů biomas na dodávce tepla v roce 2020 [7] .....	- 9 -
Obrázek 2.1: Schéma kombinované výroby elektrické energie a tepla s protitlakovým parním okruhem [4] .....	- 12 -
Obrázek 2.2: T-s diagram Rankinova tepelného oběhu [5] .....	- 13 -
Obrázek 2.3: Kontejnerové schéma mikrokogenerační jednotky Wave120 [20] .....	- 16 -
Obrázek 2.4: Technologické schéma Wave120 [20] .....	- 17 -
Obrázek 2.5: Schéma Stirlingova motoru a p-v diagram jeho provozu [19] .....	- 19 -
Obrázek 2.6: princip palivového článku [5] .....	- 20 -
Obrázek 2.7: Princip funkce trigenerační jednotky - absorpční zařízení [21] .....	- 22 -
Obrázek 3.1: Typická struktura mikrosítě [29] .....	- 25 -
Obrázek 4.1: Vlevo: Obrázek mapy s orámovaným objektem (černý rámeček) a vyznačenými světovými stranami, vyznačena poloha tepelného čerpadla (modrý čtvereček), další domácnosti pro dodávku tepelné energie (červené rámečky) [31], Vpravo: Fotografie objektu .....	- 27 -
Obrázek 5.1: Vývojový diagram řízení výroby tepelné a elektrické energie mikrokogenerační jednotky .....	- 37 -
Obrázek 5.2: Model kogenerační jednotky s elektrickým úložištěm [45] .....	- 38 -
Obrázek 5.3: Rankinův cyklus [46] .....	- 39 -
Obrázek 5.4: Průběh požadovaného a skutečného elektrického výkonu .....	- 40 -
Obrázek 5.5: Průběh požadovaného a výstupního výkonu pro Rankinův cyklus .....	- 41 -
Obrázek 5.6: Vývojový diagram řízení spotřeby tepelné energie (vytápění) .....	- 42 -
Obrázek 5.7: Schéma vytápění domácností [47] .....	- 43 -
Obrázek 5.8: Schéma řízení výroby tepelné energie .....	- 43 -
Obrázek 5.9: Průběhy venkovních a vnitřních teplot v zimě .....	- 44 -
Obrázek 5.10: Průběhy tepelného výkonu zdroje a radiátorů v horní polovině a toku paliva v dolní polovině v zimě .....	- 44 -
Obrázek 5.11: Průběhy tepelného výkonu zdroje a radiátorů v horní polovině a toku paliva v dolní polovině v létě .....	- 45 -
Obrázek 5.12: Průběhy teplot uvnitř domácnosti 1 a venku v létě .....	- 45 -

---

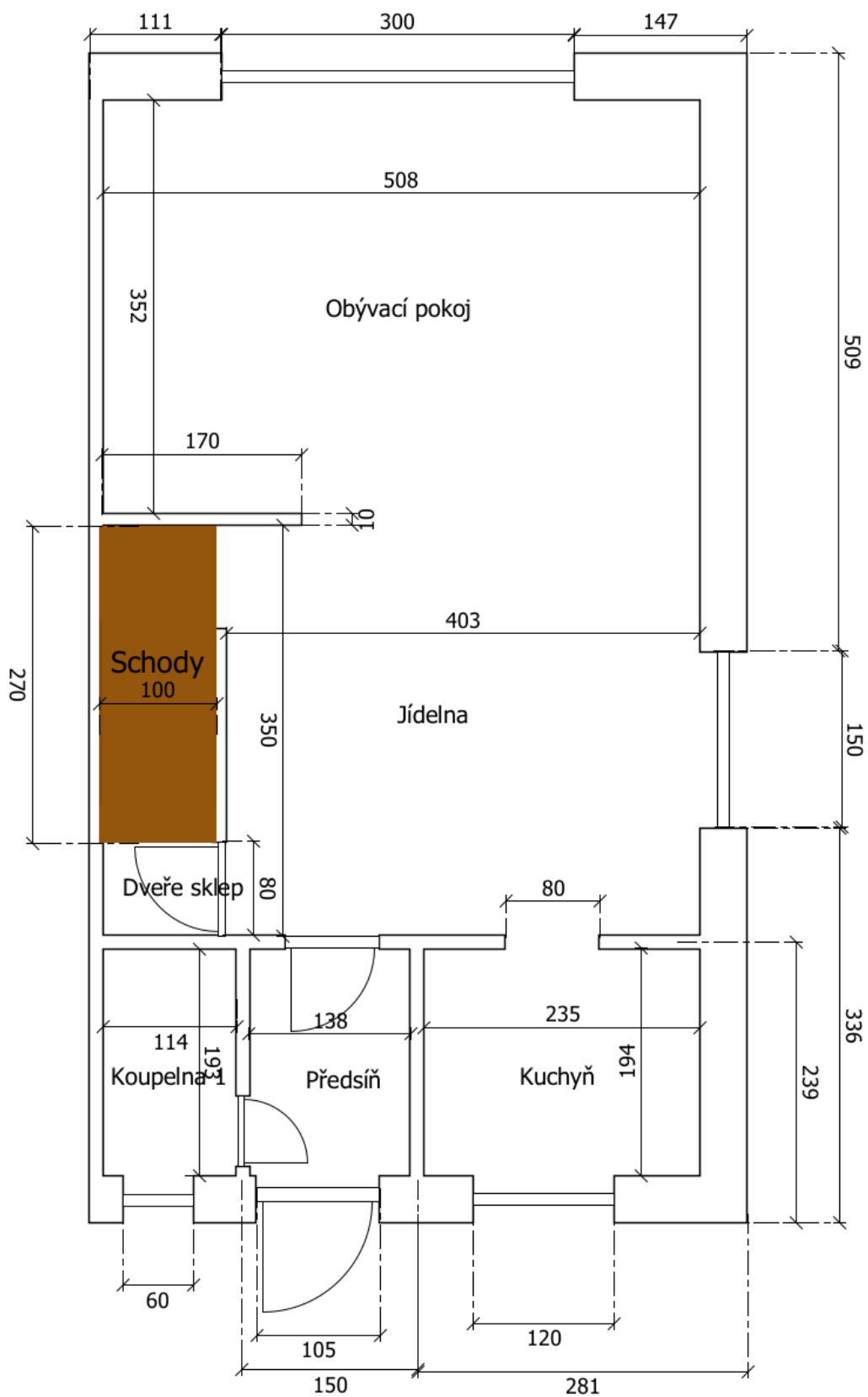
Obrázek 5.13: Silové schéma řízení výroby elektrické energie.....	- 46 -
Obrázek 5.14: Vývojový diagram řízení výroby elektrické energie.....	- 47 -
Obrázek 5.15: Schéma řízení výroby elektrické energie z asynchronního generátoru-	48
-	
Obrázek 5.16: Průběh tepelné energie .....	- 48 -
Obrázek 5.17: Grafy průběhů výkonu během připínání zátěže a fungování regulace-	49 -
Obrázek 5.18: Průběhy frekvencí generátoru a distribuční soustavy .....	- 50 -
Obrázek 5.19: Schéma zátěže v domácnosti 1 .....	- 50 -
Obrázek 5.20: Vývojový diagram řízení spotřeby elektrické energie při výrobě z FVE ...-	
51 -	
Obrázek 5.21: Schéma řízení spotřeby elektrické energie 1. a 2. stupně důležitosti. -	52 -
Obrázek 5.22: Průběhy výkonů a napětí řízení spotřeby elektrické energie .....	- 54 -
Obrázek 5.23: Informační panel pro mikrokogenerační jednotku.....	- 55 -
Obrázek 5.24: Informační panel pro fotovoltaický systém.....	- 55 -
Obrázek 6.1: Vyrobena energie z navržené fotovoltaické elektrárny z programu PVGSI [44] .....	- 58 -
Obrázek 6.2: Potřebovaná energie TČ na vytápění (modrá barva) a ohřev teplé vody (oranžová barva).....	- 58 -



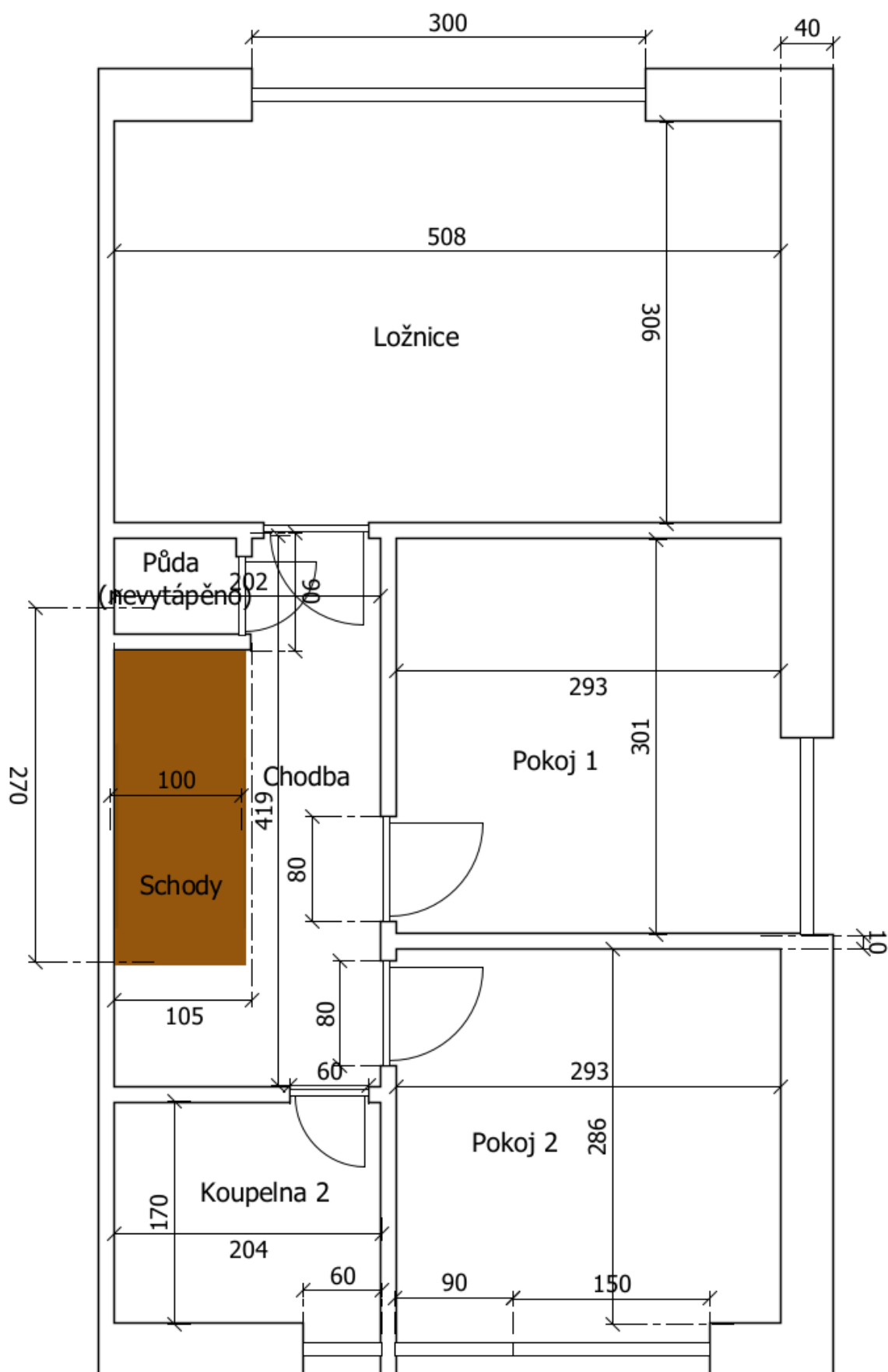
**Seznam tabulek:**

Tab. 1.1: Tabulka druhů paliv a jejich parametry [4], [2] .....	- 2 -
Tab. 4.1: Průměrné teploty v jednotlivých měsících [32].....	- 28 -
Tab. 4.2 Tabulka odporu přestupu tepla pro vnitřní a venkovní konstrukce .....	- 29 -
Tab. 4.3: Hodnoty tepelné vodivosti a tepelného odporu pro materiály využité v objektu .....	- 29 -
Tab. 4.4 Tabulka prostupu tepla v jednotlivých konstrukcích domu.....	- 30 -
Tab. 4.5 Parametry kotle na fosilní palivo [37] .....	- 33 -
Tab. 4.6 Parametry Tepelného čerpadla vzduch/voda [38] .....	- 33 -
Tab. 4.7: Parametry mikrokogenerační jednotky TEDOM Micro 30 [39].....	- 34 -
Tab. 6.1: Hodnoty vyrobené energie kogenerační jednotkou rok.....	- 57 -

## Přílohy I



Obr. 1: Půdorys 1. podlaží



Obr. 2: Půdorys 2. podlaží

## Příloha II

Tabulka 1: Obývací pokoj

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zeď	11,586	216,6261
Okna	4,5	456,75
Podlaha	17,8816	547,0737
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	46,1754	
ΣS (m <sup>2</sup> )	80,102	
Q <sub>P</sub> (W)	1220,45	
Q <sub>PC</sub> (W)	1304,987	
Q <sub>V</sub> (W)	291,8029	
Q <sub>C</sub> (W)	1596,79	

Tabulka 2: Jídelna

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zeď	8,334	76,573
Okna	2,25	228,375
Podlaha	14,105	431,532
Stěna	3,149	60,347
Dveře	1,576	47,28
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	37,517	
ΣS (m <sup>2</sup> )	60,178	
Q <sub>P</sub> (W)	844,106	
Q <sub>PC</sub> (W)	894,849	
Q <sub>V</sub> (W)	237,083	
Q <sub>C</sub> (W)	1131,933	

Tabulka 3: Kuchyň

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zeď	13,459	123,658
Okna	1,8	182,7
Podlaha	4,371	133,727
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	12,109	
ΣS (m <sup>2</sup> )	32,809	
Q <sub>P</sub> (W)	440,085	
Q <sub>PC</sub> (W)	487,389	
Q <sub>V</sub> (W)	76,525	
Q <sub>C</sub> (W)	563,914	

Tabulka 4: Předsíň

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zeď	2,071	19,025
Podlaha	2,7324	83,005
Dveře	2,31	323,4
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	7,377	
ΣS (m <sup>2</sup> )	25,154	
Q <sub>P</sub> (W)	425,429	
Q <sub>PC</sub> (W)	477,538	
Q <sub>V</sub> (W)	46,622	
Q <sub>C</sub> (W)	524,159	

Tabulka 5: Koupelna 1

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zeď	3,433	31,539
Okna	0,36	36,54
Podlaha	2,200	79,162
Stěna	2,7	51,513
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	5,941	
ΣS (m <sup>2</sup> )	22,896	
Q <sub>P</sub> (W)	198,753	
Q <sub>PC</sub> (W)	216,085	
Q <sub>V</sub> (W)	37,541	
Q <sub>C</sub> (W)	253,626	

Tabulka 6: Chodba a schody

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Podlaha	5,09	189,900
Stěna	3,948	75,624
Dveře	1,182	35,46
Schody	2,7	89,639
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	11,333	
ΣS (m <sup>2</sup> )	46,956	
Q <sub>P</sub> (W)	390,622	
Q <sub>PC</sub> (W)	404,549	
Q <sub>V</sub> (W)	71,619	
Q <sub>C</sub> (W)	476,168	

Tabulka 7: Koupelna 2

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zed'	5,737	52,708
Okna	0,702	71,253
Strop	3,468	129,386
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	9,364	
ΣS (m <sup>2</sup> )	29,713	
Q <sub>P</sub> (W)	253,347	
Q <sub>PC</sub> (W)	275,272	
Q <sub>V</sub> (W)	59,1728	
Q <sub>C</sub> (W)	334,445	

Tabulka 8: Ložnice

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zed'	22,225	204,200
Okna	4,5	456,75
Strop	15,545	579,953
Stěna	2,7	58,482
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	41,971	
ΣS (m <sup>2</sup> )	77,396	
Q <sub>P</sub> (W)	1292,622	
Q <sub>PC</sub> (W)	1385,144	
Q <sub>V</sub> (W)	265,233	
Q <sub>C</sub> (W)	1650,377	

Tabulka 9: Pokoj 1

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zed'	6,893	63,337
Okna	2,25	228,375
Strop	8,819	329,035
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	25,929	
ΣS (m <sup>2</sup> )	52,442	
Q <sub>P</sub> (W)	620,747	
Q <sub>PC</sub> (W)	652,236	
Q <sub>V</sub> (W)	163,855	
Q <sub>C</sub> (W)	816,092	

Tabulka 10: Pokoj 2

	S (m <sup>2</sup> )	Q (W)
Obvodová zed'	15,646	143,752
Okna	2,25	228,375
Balkonové okno	1,848	187,572
Strop	8,379	312,638
V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	24,637	
ΣS (m <sup>2</sup> )	51,041	
Q <sub>P</sub> (W)	885,735	
Q <sub>PC</sub> (W)	995,896	
Q <sub>V</sub> (W)	155,689	
Q <sub>C</sub> (W)	1151,585	

Tabulka 11: Rozměry oken, dveří a výška místností a konstrukce

Okna	Obývací pokoj, Ložnice	3x1,5 m
	Jídelna, Pokoj 1	1,5x1,5 m
	Kuchyň	1,2x1,5 m
	Pokoj 2	1,5x1,5 m
	Koupelna 1	0,6x0,6 m
	koupelna 2	0,6x1,17 m
Dveře	Sklep	0,8x1,97 m
	Půda	0,6x1,97 m
	Balkonové dveře pokoj 2	0,9x2,2 m
Konstrukční výška		2,94 m
Výška místnosti		2,7 m