

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DISERTAČNÍ PRÁCE

2019

Ing. Michal Špaček

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky



**VÝZKUM VYUŽITÍ BIOMASY JAKO AKUMULAČNÍ
ZDROJ ENERGIE S APLIKACÍ NA ŘÍZENÍ
KOGENERAČNÍCH JEDNOTEK**

**RESEARCH OF BIOMASS AS A ACCUMULATIVE
SOURCE OF ENERGY WITH APPLICATION FOR
CONTROL OF COGENERATING UNITS**

2019

Ing. Michal Špaček



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Doktorský studijní program: Elektrotechnika P2649

Studijní obor: Elektroenergetika 3907V001

Autor: Ing. Michal Špaček

Školitel: prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc.

Ostrava

březen 2019



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulární zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 3. dubna 2019

.....
Ing. Michal Špaček



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulární zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Poděkování:

Touto formou bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Zdeňku Hradílkovi, DrSc za cenné rady, které mi poskytl během vypracování této práce.



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Anotace

Tato disertační práce se zabývá problematikou kogeneračních jednotek (KGJ), jak z pohledu elektrické, tak i tepelné energie. Teoretická část se zabývá jednotlivými typy kogeneračních jednotek. Tato část se opírá o zhodnocení jednotlivých typů kogeneračních jednotek z pohledu dodávky elektrické energie. Kogenerační jednotky jsou hodnoceny za pomoci metody Multikriteriální analýzy shody a neshody (CDA). Posuzovanými jednotkami je spalovací motor, spalovací turbína a protitlakovou parní turbína. Hodnotící kritéria jsou elektrická účinnost, startovací čas, rozsah regulace výkonu a pořizovací náklady.

Následující kapitola popisuje jednotlivé části kogenerační jednotky. Tato část propojuje kogenerační technologii s praxí.

Třetí část práce se zabývá kogeneračními jednotkami v České republice z pohledu rozvoje a legislativy. Ta je v práci vysvětlena na konkrétních aplikacích v praxi. Při modelování kogeneračních jednotek z pohledu regulace je nutné být obeznámen s legislativou těchto zdrojů, aby se vymýšlely a zkoumaly věci, které mají využití v praxi. Za zásadní věci z pohledu legislativy jsou považovány velikost instalovaného zdroje, druh spalovaného paliva, hromadné dálkové ovládání (HDO), ovládání z dispečinku, zpětné vlivy, atd. Poslední část ukazuje simulaci ovládání kogenerační jednotky z centrálního dispečinku. V této kapitole jsou zhodnoceny kogenerační jednotky v zahraničí.

Na teoretickou část práce navazuje praktická část z měření na konkrétních kogeneračních jednotkách. Jedno z měření je na bioplynové stanici, na které byly změřeny nejdůležitější elektrické parametry vycházející z provozu kogenerační jednotky. Naměřená data byla vyhodnocena dle normy ČSN EN 50160, které nám vykazují kvalitu dodávané elektrické energie.

Následující část popisuje využití tepelné a elektrické energie na konkrétní aplikaci. Kogenerační jednotka je propojena s akumulační nádrží, pomocí které vyrovnává nepravidelné odběry tepla. Tato aplikace propojuje elektrickou a tepelnou regulaci v praxi.

Závěrečná část této práce se věnuje modelování kogeneračních jednotek. Tento model je naprogramován v prostředí Microsoft Excel. Vstupní parametry jsou různé, a to dle potřebných požadavků na výpočet. Program umí navrhnout kogenerační jednotku pro zadaný režim provozu. Taktéž umí počítat i ekonomickou stránku provozu kogenerační jednotky, mezi které mohou patřit výnosy v jednotlivých letech, náklady na provoz, zelené bonusy, cash flow, návratnost investice a ostatní ekonomické požadavky.

Klíčová slova

Bioplyn, bioplynová stanice, kogenerační jednotka, energetická bilance, regulace výkonu elektrická energie, tepelná energie, modelování.



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Annotation

This dissertation deals with the issue of cogeneration units (KGJ) both in terms of electric and thermal energy. The theoretical part deals with individual types of cogeneration units. This section is based on an assessment of the individual types of cogeneration units from the point of view of power supply. Cogeneration units are evaluated using the Multi-Criteria Analysis and Non-Compliance (CDA) method. The units considered are the combustion engine, the combustion turbine and the backpressure steam turbine. The evaluation criteria are electrical efficiency, start time, power control range and cost of ownership.

The following chapter describes the individual parts of the cogeneration unit.

The third part of the thesis deals with cogeneration units in the Czech Republic in terms of development and legislation. This is explained on practical applications in practice. When designing cogeneration units from a regulatory point of view, it is necessary to be familiar with the legislation of these sources to devise and examine things that they have usage in practice. For essential things in terms of legislation are considered the size of the installed power, the type of combustion fuel, the collective remote control (HDO), the control of dispatching, the feedback effects, etc. The last part shows the simulation of control of the cogeneration unit from the central dispatching center. This chapter evaluates cogeneration units abroad.

The theoretical part of the work follows the practical part of the measurements on specific cogeneration units. One of the measurements is on the biogas station where the most important electrical parameters from the cogeneration unit were measured. The measured data was evaluated according to ČSN EN 50160, which shows the quality of the supplied electric power.

The following section describes the use of thermal and electrical energy on the specific application. The cogeneration unit is connected to a accumulative tank, which helps to compensate for irregular heat withdrawals. This application connects electrical and thermal regulation in practice.

The final part of this work deals with the modeling of cogeneration units. This model is programmed in Microsoft Excel. The input parameters are different, according to the required calculation requirements. The program can design a cogeneration unit for the specified mode of operation. It can also count on the economic side of the cogeneration unit's operation, which may include revenue in individual years, operating costs, green bonuses, cash flow, return on investment and other economic requirements.

Keywords

Biogas, biogas plant, cogeneration unit, energy balance, power regulation, thermal energy, modelling.



Seznam symbolů a zkratek

$\cos \Phi$	(-)	účinník
I	(A)	proud zařízení
Q	(VAr)	jalový výkon
Q_i	(J/m ³)	výhřevnost zemního plynu
Q_{vyr}	(J)	teplo vyrobené za rok
Q_{v1}	(W)	tepelný výkon ve vodě zákaznického okruhu na vstupu do KGJ
Q_{v2}	(W)	tepelný výkon ve vodě zákaznického okruhu na výstupu do KGJ
ETA_C	(%)	celková účinnost KGJ
ETA_E	(%)	elektrická účinnost KGJ
ETA_g	(%)	účinnost generátoru KGJ
ETA_T	(%)	tepelná účinnost KGJ
E_{vyr}	(Wh)	elektrická energie vyrobená za rok
f	(Hz)	frekvence
f_{max}	(Hz)	frekvence maximální
f_{min}	(Hz)	frekvence minimální
L	(m)	délka
M_{pal1}	(J/h)	hodinová spotřeba paliva
M_{pal2}	(m ³ /h)	hodinová spotřeba paliva při obchodních podmínkách
M_{pal3}	(Wh)	hodinová spotřeba paliva vztažená k výhřevnosti
M_{palr1}	(J/h)	roční spotřeba paliva
M_{palr2}	(m ³ /h)	roční spotřeba paliva při obchodních podmínkách
M_{palr3}	(Wh)	roční spotřeba paliva vztažená k výhřevnosti
p	(Pa)	tlak
P	(VA)	zdánlivý výkon
P_C	(kW)	celkový výkon KGJ
P_E	(W _E)	výkon elektrický
P_m	(kW)	výkon motoru na hřídeli
P_T	(W _T)	výkon tepelný
P_T/P_E	(-)	poměr tepelného a elektrického výkonu
P_{pal}	(W)	příkon v palivu
$P\check{R}_M$	(W)	příkon KGJ (motor)
$Spal_{mp}$	(J/Wh)	měrná spotřeba tepla v palivu na výrobu 1 Wh mechanické práce
$Spal_{ee}$	(J/Wh)	měrná spotřeba tepla v palivu na výrobu 1 Wh elektrické energie
$Spal_t$	(J/Wh)	měrná spotřeba tepla v palivu na výrobu 1 Wh tepla
SP_T	(Wh/m ³)	spalné teplo zemního plynu
SP_{ZP}	(Nm ³ /h)	spotřeba zemního plynu při normálních podmínkách (0°C, 101 325 Pa)
$SP_{ZP OP}$	(Nm ³ /h)	spotřeba zemního plynu, obchodní podmínky
\check{S}	(m)	šířka
t	(°C)	teplota
U	(V)	napětí
U_{max}	(V)	napětí maximální
U_{min}	(V)	napětí minimální
U_n	(V)	jmenovité napětí



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Δu	(V)	úbytek napětí
V	(m ³)	objem
V	(m)	výška
$VSEE_{pr}$	(W)	vlastní spotřeba elektrické energie KGJ
α	(%)	statistická hladina významnosti



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

AGREPREF	Aggregation Preferences
AM	asynchronní motor
a.s.	akciová společnost
BTE	Brake Thermal Efficiency
CC	kombinovaná výroba tepla a elektřiny s kombinovaným cyklem
CDA	multikriteriální analýza shody a neshody
CH ₄	metan
D	délka
DP	dispečink provozovatele
Dyn1	zapojení transformátorů
F	jištění
FVE	fotovoltaická elektrárna
G	generátor
h	hodina
HDO	hromadné dálkové ovládání
ICE	spalovací motor
IPA	metoda ideálních bodů
Kč/kW	ceny za 1 kW
KGJ	kogenerační jednotka
L1	první fáze
L2	druhá fáze
L3	třetí fáze
LTO	lehký topný olej
mn	nízké napětí
OTE	operátor trhu s energií (OTE, a.s.)
OZE	obnovitelné zdroje energie
PC	počítač
PDS	provozovatel distribuční soustavy
PEZ	primární energetické zdroje
PID	regulace se zpětnou vazbou
PLC	automat
PPDS	pravidla provozování distribučních soustav
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
PT1000	teplotní čidlo
RS485	sběrnice
RTU	řídící rozvaděč
s	sekunda
S	spínač
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
Š	šířka
T	transformátor
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
V	výška
vn	vysoké napětí
WSA	metoda váženého součtu



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulární zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

* *Tyto symboly a zkratky jsou platné jen tehdy, není-li v textu blíže specifikováno.*



Obsah

Úvod	14
1 Cíle a etapy disertační práce	15
2 Průzkum současného stavu kogeneračních zdrojů.....	16
2.1 Spalovací motor	16
2.2 Spalovací turbína	18
2.3 Protitlaková parní turbína	19
2.4 Posouzení jednotlivých typů kogeneračních jednotek z pohledu elektrické energie	21
2.5 Popis jednotlivých částí kogenerační jednotky na konkrétním případě.....	22
2.6 Výroba tepelné energie	25
2.6.1 Spalinový výměník tepla	26
2.6.2 Výměník chladící vody.....	26
2.6.3 Chlazení paliva	28
2.6.4 Výroba elektrické energie.....	29
2.6.4.1 Asynchronní generátor.....	30
2.6.4.2 Synchronní alternátor.....	31
2.6.4.3 Kompenzace jalového výkonu	32
2.6.4.4 Fázovací podmínky.....	33
3 Kogenerační jednotky z pohledu provozování v České republice	33
3.1 Kogenerace v České republice.....	33
3.2 Regulace KGJ	35
3.3 Požadavky na výroby s výkonem od 30 kW do 100 kW připojených do DS	38
3.4 Požadavky na výroby s výkonem od 30 kW do 100 kW připojených do DS	38
3.4.1 Bioplyn a biomasa	38
3.4.2 RTU jednotka	38
3.5 Zpětné vlivy	40
3.6 Rozvoj kogeneračních jednotek v zahraničí	41
3.6.1 Slovensko	41
3.6.2 Polsko	42
3.6.3 Německo.....	43
3.6.4 Francie	44
3.6.5 Itálie.....	45
3.6.6 Anglie	46
4 Měření elektrických parametrů na konkrétní kogenerační jednotce	47
4.1 Elektrický výkon	49
4.2 Měření napětí	50
4.3 Měření účinníku	51
5 Řízení jalového výkonu u kogeneračních jednotek	53
5.1 Analýza naměřených hodnot.....	54



5.2	Spouštění kogenerační jednotky v praxi	59
5.3	Spouštění asynchronních generátorů s menšími proudovými rázy	59
6	Aplikace využití tepelné a elektrické energie z kogenerační jednotky	60
6.1	Kogenerační jednotka	61
6.2	Energetická bilance kogenerační jednotky	63
6.3	Akumulace tepelné energie	64
6.4	Připojení kogenerační jednotky do sítě	66
6.5	Měření na kogenerační jednotce	67
6.6	Regulace kogenerační jednotky	69
7	Model kogenerační jednotky	69
7.1	Analýza tepelného výkonu pro návrh kogenerační jednotky s pístovým motorem	69
7.2	Modelování kogenerační jednotky	73
7.2.1	Energetická bilance kogenerační jednotky	73
7.3	Ekonomické zhodnocení	82
	Kritéria efektivity projektu	93
8	Přínosy disertační práce	93
9	Závěr	95
10	Možnosti dalšího rozvoje výzkumu	97
	Seznam použité literatury	98
	Vlastní publikace	101
	Účast na projektech:	102
	Výpočetní aplikace:	102
	Seznam obrázků	103
	Seznam tabulek	105
	Seznam příloh	106
	Příloha A	107
	Příloha B	114



Úvod

V posledních dvaceti letech se stále setkáváme s ochranou životního prostředí. Mezi obnovitelné zdroje patří vodní elektrárny, větrné elektrárny, solární elektrárny, biomasa atd. S každým z vyjmenovaných obnovitelných zdrojů jsme se setkali za posledních 20 let.

První impuls s ochranou životního prostředí byl spojen se vstupem České republiky do evropské unie. U nás začal rozvoj větrných elektráren po vzoru Německa. Tam došlo k neřízenému rozvoji těchto větrných elektráren, kdy docházelo k výpadkům elektrické energie. První větrné elektrárny v České republice se začaly objevovat kolem roku 2002. S větrnými elektrárnami se plánoval větší rozvoj, kterému zabránili většinou obyvatelé, kde měly vyrůst tyto stavby.

Po větrných elektrárnách nastal rozvoj solární energie, která nabrala ve vývoji stavby neuvěřitelnou rychlost. S tímto problémem se setkáváme až do dnes, a to zabráním orné půdy, zvýšení cen elektřiny a podobně.

S koncem solární energie se objevila biomasa, konkrétně bioplynové stanice, kterých vyrostlo velké množství.

S jejich rozvojem nastal problém s nedostatkem potravy pro dobytek a výsadbou kukuřičných polí, které mají decimující vliv na půdu.

V minulosti jsme se setkali s několika typy obnovitelných zdrojů, které zaznamenaly významný rozvoj a následně silný úpadek. V budoucnu se jistě setkáme s dalšími zdroji elektrické energie, které budou z počátku silně podporovány a následně dojde k jejich výraznému útlumu. Při každé propagaci obnovitelného zdroje si každý musí udělat svůj vlastní názor na to, co je vhodné a co ne.



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

1 Cíle a etapy disertační práce

Hlavní cíl: Vytvořit model pro regulaci kogenerační jednotky.

Dílčí cíle:

- I. Vývoj a realizace měřících metod pro získání podkladů ke konkrétní aplikaci na reálných kogeneračních jednotkách.
- II. Dalším cílem je vytvoření programu pro modelování kogeneračních jednotek v programu Microsoft Excel.
- III. Cílem modelování, podle vytvořeného programu bude vyhodnocení energetické bilance kogenerační jednotky a její ekonomické zhodnocení s uplatněním v provozu.

2 Průzkum současného stavu kogeneračních zdrojů

Kogenerace je společná, nebo-li též nazývaná kombinovaná výroba elektřiny a tepla. Umožňuje zvýšení účinnosti energie paliv, která v posledních letech zaujímá významné postavení.

Pod pojmem kogenerační výroba si lze představit sdruženou výrobu elektřiny a tepla. Tento způsob transformace energie byl znám již dříve, a to jako teplárenská výroba elektrické energie a tepla. Většinou se místo spojení kogenerační výroba používá zkrácený tvar kogenerace.

Hlavním cílem kogenerace je snížení spotřeby primárních energetických zdrojů (PEZ), kdy je využíváme efektivně. Se snížením této spotřeby pak souvisí snížení škodlivých emisí, jež vznikají při transformaci PEZ do požadovaných forem energie.

S kogeneračními jednotkami se můžeme setkat od výkonu řádově jednotek wattů až do stovek MW. Naše zhodnocení se bude zabývat jednotkami kolem 1 MW, se kterými se nejčastěji setkáváme v bioplynových stanicích. V České republice se při spalování bioplynu nejčastěji setkáváme se spalovacími motory. Méně často se setkáváme s plynovými turbínami, které se objevují zejména na americkém trhu. Při porovnávání budou posuzovány spalovací motor, spalovací turbína a protitlaková parní turbína. Do hodnocení je zahrnuta i protitlaková parní turbína, která u nás představuje největší podíl v kombinované výrobě elektrické a tepelné energie. Tyto tři zdroje budou srovnávány zejména z pohledu dodávky elektrické energie.

Spalováním uhlovodíkových paliv nebo využíváním jiných primárních zdrojů tepla v energetice a v dopravě při použití v motoru či turbíně se pro vlastní mechanickou práci nebo výrobu elektřiny využije cca 30÷35% [1] energie obsažené v palivu. Vzniká velké množství nízkopotenciálového tepla, které u běžných motorů odchází z největší části (cca 50% energetického obsahu paliva) v podobě horkých výfukových plynů a další ztrátové teplo, které je nutno odvádět z hlediska zachování funkčnosti motoru chladicí soustavou. Toto teplo představuje tepelné ztráty procesu výroby a přeměny energie. Vzhledem k fyzikálním omezením (Carnotův cyklus) toto teplo není možno použít k výrobě mechanické práce nebo elektřiny. U automobilů uniká bez užitku do okolí, ve velkých tepelných elektrárnách je vypouštěno chladicími věžemi.

Při kogeneračním procesu je toto odpadní teplo výhodně využíváno k ohřevu teplé vody, vytápění a dalším podobným účelům. Tak je současně využita energie pro výrobu elektřiny a ztrátové teplo je k dispozici k dalšímu použití. Lze tak dosáhnout přibližně 80% tepelné účinnosti vztahované na energetický obsah výhřevnosti paliva. Proto kogenerace může být jednou z cest snižování emise skleníkových plynů lepším využitím primárních paliv.

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla ve větších zdrojích se uplatní zejména ve spojení s dálkovým vytápěním, které umožní efektivní využití ztrátového tepla.

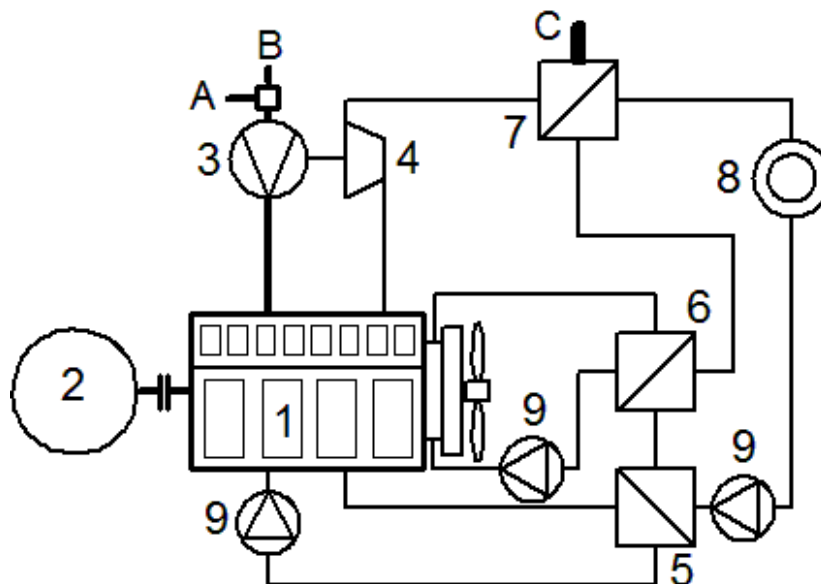
2.1 Spalovací motor

Patří mezi tepelné motory, u kterých se tepelná energie vznikající při spalování paliva mění v mechanickou práci. Činnost spalovacího motoru je charakterizovaná dvěma základními ději. Prvním z nich je fyzikálně chemický proces, kdy při spalování vzniká teplo. Druhým je fyzikální proces, při kterém se část tepelné energie změní na mechanickou práci. Spalováním paliva ve válci vznikají spaliny o vysokém tlaku a teplotě. Přeměna tepelné energie na mechanickou se děje přenosem energie expandujících spalin na píst, ojnici a klikový hřídel. Posuvně vratný pohyb pístu se převádí pomocí klikového mechanismu na rotační pohyb klikového hřídele motoru [1]. Ta je pomocí spojky spojena s elektrickým generátorem.

Se spalovacím motorem v kogeneračním režimu se nejčastěji setkáváme při spalování bioplynu v bioplynových stanicích. Tyto motory lze rozdělit na dva základní druhy, kterými je zážehový a vznětový motor. U zážehového motoru je výhradním palivem pouze bioplyn. Naopak u vznětových motorů se využívá zápalné médium, kterým je nejčastěji motorová nafta nebo LTO. Využit lze i biopaliva (bionafta a rostlinné oleje). Spotřeba doplňkového paliva se pohybuje v rozmezí 4 – 10 % z celkového množství paliva [2]. Z pohledu elektrické účinnosti se zážehové motory pohybují v rozsahu 37 – 42 %, u vznětových motorů to je 40 – 45 % [3]. V porovnání se zážehovými motory jsou vznětové motory zpravidla investičně méně náročné. Nároky na údržbu jsou zde ovšem vyšší.

Spalovací motor obsahuje mnoho součástí s posuvným a rotačním pohybem v oblasti vysokých teplot. Mazání jejich třecích ploch je obtížné, proto se tyto součásti opotřebovávají mnohem více než například u spalovacích turbín [4].

Velkou výhodou spalovacích motorů jsou rozsáhlé zkušenosti s výrobou a provozem velkého množství těchto strojů. Schéma kogenerační jednotky je na obrázku 1 [5].



Obr. 1 Schéma zapojení kogenerační jednotky se spalovacím motorem

- kde:
- 1 – spalovací motor,
 - 2 – elektrický generátor,
 - 3 – kompresor turbodmýchadla,
 - 4 – turbína turbodmýchadla,
 - 5 – výměník mazací olej/voda,
 - 6 – výměník voda/voda,
 - 7 – výměník spaliny/voda,
 - 8 – spotřebič tepla,
 - 9 – čerpadlo,
 - A – přívod paliva,
 - B – přívod vzduchu,
 - C – odvod spalin [1],



Rozdělení spalovacích motorů:

- čtyřdobé – pracovní oběh probíhá během 4 zdvihů pístu (dvou otáček klikového hřídele),
 - dvoudobé – pracovní oběh realizován během dvou zdvihů pístu (jedné otáčky klikového hřídele).
- a. Dle použitého paliva
- motory na kapalná paliva (benzín, nafta, líh biopaliva),
 - motory na plynná paliva (zemní plyn, bioplyn),
 - motory duální, což jsou v principu vznětové motory se vstřikem cca 10% dávky nafty k zapálení směsi plynu se vzduchem (základním palivem je zemní plyn, zápalným palivem nafta),
 - motory více palivové (pracují s několika druhy kapalných lehkých po těžké).
- b. Podle stupně rychloběžnosti
- motory volnoběžné (se střední pístovou rychlostí pod 6,5 m/s),
 - motory rychloběžné (se střední pístovou rychlostí 6,5 m/s a vyšší).
- c. Dle plnění pracovního válce náplní
- Motory bez přeplňování (sání vzduchu nebo směsi probíhá pod tlakem vznikajícím při sacím zdvihu pístu ve válci motoru)
 - motory s přeplňováním (přívod vzduchu nebo směsi do válce se děje za pomoci dmychadla, které vytváří přetlak zvyšující měrný výkon motoru).
- d. Dle způsobů tvoření směsi
- s vnějším tvořením směsi (směs je tvořena mimo pracovní válec z par snadno odpařitelného kapalného paliva se vzduchem nebo plynu se vzduchem),
 - s vnitřním tvořením směsi (pracovní směs je tvořena uvnitř pracovního válce spalovacího motoru rozprášením paliva do válce pod vysokým tlakem, do kterého je palivo a vzduch přiveden odděleně).

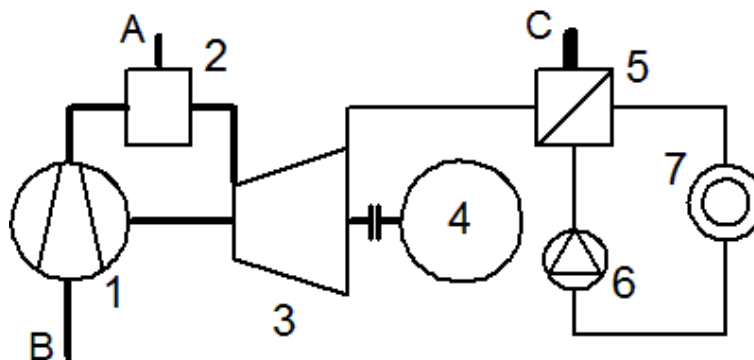
2.2 Spalovací turbína

Podmínky pro připojování zdrojů do distribuční soustavy popisují Pravidla provozování distribučních soustav (PPDS) v příloze 4 – Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy, dále také doplněk 1 přílohy 4 [10].

Při zřizování výroben je třeba dbát na platná nařízení a předpisy pro paralelní provoz se sítí provozovatele distribučních soustav a také na to, aby byly vyloučené zpětné a rušivé vlivy na síť nebo zařízení dalších odběrů. Posouzení možností připojení z hlediska zpětných vlivů na síť vychází z impedance sítě ve společném napájecím bodě (zkratového výkonu), připojovaného výkonu, druhu a způsobu provozu vlastní výroby.

Patří také jako spalovací motor mezi tepelné motory, ve kterých se chemická energie paliva mění na tepelnou a mechanickou energii. Pracovní látkou spalovacích turbín jsou obecně horké plyny, proto se mohou nazývat také plynové.

Plynová turbína se skládá z kompresoru, spalovací komory, plynové turbíny, elektrického generátoru a pomocných zařízení. Schéma zapojení těchto komponentů je na obrázku 2. Kompresor vstříkává vzduch pod tlakem do spalovací komory, ve které dochází k hoření paliva a tím k nárůstu teploty a objemu procházejících plynů, které pak expandují v plynové turbíně. Ta je spojena pomocí spojky s generátorem, který následně vyrábí elektrickou energii.



Obr. 2 Schéma zapojení kogenerační jednotky se spalovací turbínou

- kde:
- 1 – kompresor,
 - 2 – spalovací komora,
 - 3 – plynová turbína,
 - 4 – elektrický generátor,
 - 5 – výměník spaliny/voda,
 - 6 – čerpadlo,
 - 7 – spotřebič tepla,
 - A – přívod paliva,
 - B – přívod vzduchu,
 - C – odvod spalin.

Elektrická účinnost těchto strojů se pohybuje od 25 do 48 % [2]. Účinnost závisí na velikosti dané turbíny, která roste s výkonem jednotky. U jednotky o výkonu kolem výkonu 1 MW se účinnost pohybuje kolem hodnoty 30% [3]. Teploty spalin na výstupu z turbíny se pohybují ve velkém rozmezí teplot. Nejčastěji se setkáváme s teplotami od 450 – 550 °C, což dává předpoklady pro dodávku i vysoko potenciálního tepla.

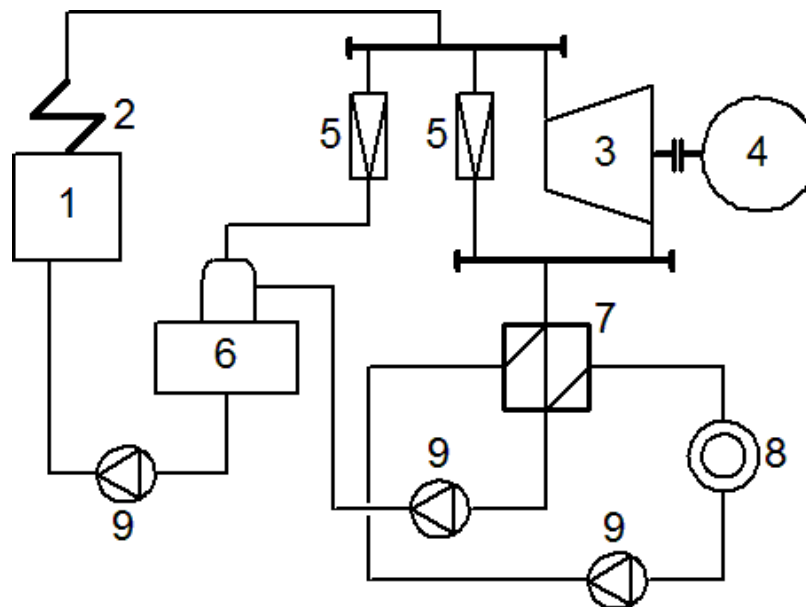
2.3 Protitlaková parní turbína

Jedním z úkolů provozovatele distribuční soustavy je zajistit dodávku elektrické energie s pokud možno neměnnými systémovými parametry. Podle PPDS Přílohy 4 jsou sledovanými parametry: Protitlaková parní turbína představuje typické kogenerační zapojení používané v minulosti. Vysokotlaková pára z kotle je odvedena do turbíny, kde expanduje a produkuje mechanickou energii, která se používá k pohonu elektrického generátoru. Výkon turbíny závisí na množství expandující páry a na požadované kvalitě dodávaného tepla, která je dána tlakem páry vystupující z turbíny. Pára z turbíny je odváděna s vyšším tlakem, který má ještě dostatek tepelné a tlakové energie (entalpie

páry) pro vytápění a technologické účely. Celková účinnost kogenerace s parními turbínami bývá 76 – 88 % [6]. Elektrická účinnost bývá 8 – 20 % [2].

Velkou výhodou zařízení s parními turbínami je možnost spalovat v kotli libovolná paliva. Kotle jsou často přizpůsobovány pro spalování kombinovaných paliv. Skládá se z několika základních částí, mezi které patří kotel, parogenerátor, parní turbína a kondenzační zařízení (obrázek 3). Investičně jsou tato zařízení náročná, v důsledku související s vysokou teplotou a tlakem páry. Parní zařízení má obvykle malý elektrický výkon vztahený na jednotku dodávaného tepla a vysoké investiční náklady na instalovaný jednotkový elektrický výkon.

Z pohledu regulace tepla může protitlaková parní turbína pracovat i jako kondenzační turbína při snížení odběru tepla. Protitlaková parní turbína je podstatně větší a složitější ve srovnání s předchozími dvěma jednotkami.



Obr. 3 Schéma zapojení protitlakové parní turbíny

- kde:
- 1 – parní kotel,
 - 2 – přehřívák páry,
 - 3 – parní turbína,
 - 4 – elektrický generátor,
 - 5 – regulační stanice,
 - 6 – napájecí nádrž,
 - 7 – ohřívák topné vody,
 - 8 – spotřebič tepla,
 - 9 – čerpadlo.

2.4 Posouzení jednotlivých typů kogeneračních jednotek z pohledu elektrické energie

Při hledání typu kogenerační jednotky je nutno si zvolit z jakého hlediska bude kogenerační jednotka hodnocena. Dále je nutno zvolit, jaké vlastnosti jsou důležité. V následující části se budou srovnávat kogenerační jednotky z pohledu dodávky elektrické energie. Jedním ze základních hodnotících kritérií je elektrická účinnost, která představuje s jakou účinností je vyrobena elektrická energie. Dalším hodnotícím kritériem je startovací čas, kterým je myšlen za jakou dobu je schopna kogenerační jednotka najet z klidového do pohotovostního režimu a dodávat elektrický výkon. Zvolené parametry pro jednotlivé typy kogeneračních jednotek jsou v tabulce 1.

Tab. 1 Jednotlivé varianty a kritéria [27]

Kogenerační jednoty	Kritéria			
	Elektrická účinnost [%]	Startovací čas [s]	Rozsah regulace výkonu [%]	Pořizovací náklady [Kč/kW]
Spalovací motor	42	60	30-100	10000
Spalovací turbína	30	35	40-100	15000
Protitlaková parní turbína	22	120	60-100	20000

Zhodnocení kogeneračních jednotek bylo provedeno za pomoci multikritériální analýzy a programu MCA8, který využívá vícekritériální rozhodování. Program obsahuje šest matematických metod multikritériální analýzy:

- Metoda váženého součtu - WSA (Weighted Sum Approach)
- Metoda ideálních bodů - IPA (Ideal Points Analysis)
- Metoda TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)
- Metoda shody a neshody - CDA (Concordance Discordance Analysis)
- Metoda AGREPREF (Aggregation Preferences)
- Metoda PROMETHEE (Preference Ranking Organistion Method for Enrichment Evaluations)

Pro vyhodnocení je nutno zadat vstupní údaje, mezi které patří kritéria, varianty a váhy. Při vyhodnocování jsem si zvolil kritéria, podle kterých budou hodnoceny jednotlivé varianty. Dalším krokem je zvolení vah, nebo-li důležitost k jednotlivému kritériu a to ve formě desetinného čísla, tak aby součet vah všech kritérií byl roven jedna „1“. Posledním krokem ve výpočtu je zvolení hodnot kritérií pro jednotlivé varianty.

Každému hodnotícímu kritériu byla udělena váha podle důležitosti. Ty jsou uvedeny v tabulce 2, které byly vypočteny pomocí Saatyho metody. Největší váhu mají pořizovací náklady a nejmenší váhu má rozsah regulace výkonu.

Tab. 2 *Váhy jednotlivých kritérií [27]*

	Kritéria	v_i
1.	Požizovací náklady	0,334
2.	Elektrická účinnost	0,2714
3.	Startovací čas	0,2161
4.	Rozsah regulace výkonu	0,1785

Pomocí metody CDA byly srovnávány tři typy kogeneračních jednotek. V tabulce 3 jsou zobrazeny pořadí jednotlivých jednotek. Nejlépe těmto kritériím vyhovuje spalovací motor, nejméně naopak protitlaková parní turbína.

Tab. 3 *Vyhodnocení jednotlivých kogeneračních jednotek pomocí CDI metody [27]*

	Varianty	Výpočet
1.	Spalovací motor	0,4064
2.	Spalovací turbína	1,2839
3.	Protitlaková parní turbína	3,647

Na základě vyhodnocených dat tabulka 3 jsou vidět rozdíly mezi jednotlivými jednotkami. Rozdíl mezi spalovacím motorem a spalovací turbínou není tak velký jako mezi spalovacím motorem a protitlakovou parní turbínou.

Při hodnocení nebylo možno zhodnotit všechny vlastnosti, kterými se vyznačuje daný typ kogenerační jednotky. Jednotky byly srovnávány zejména z pohledu dodávky elektrické energie.

Hodnotícími kritérii z pohledu regulace elektrického výkonu je i rychlost změny elektrického výkonu. Ten je u všech jednotek stejný a pohybuje se kolem 10 s, tj. při změně elektrického výkonu o 10%.

V současné době z pohledu využití elektrické energie o výkonu 1MW nejlépe vyhovují spalovací motory. Z tohoto pohledu je už méně významná plynová turbína. Největší nevýhodou je nízká elektrická účinnost. Do budoucna se předpokládá vývoj zejména u plynových turbín. Spalovací motory zaznamenaly velký rozvoj za posledních sto let zejména v automobilovém průmyslu a nepředpokládají se další zásadní změny z hlediska jejich konstrukce. Hodnocení tepelných strojů je zpravidla velmi problematickou záležitostí, u které se setkáváme s velkým počtem hodnotících kritérií, které je nutné brát v úvahu.

2.5 Popis jednotlivých částí kogenerační jednotky na konkrétním případě

Většina výrobců nabízí kogenerační jednotky v různých sestavách. Následující část bude popisovat jeden z možných typů konkrétních kogeneračních jednotek.

Kogenerační jednotka (KGJ), neboli též označována v zahraničních literaturách jako BTE (Brake Thermal Efficiency). V našem případě je to kompletní kogenerační jednotka připravená k připojení na zdroj paliva (zemní plyn, bioplyn, atd.), k elektrické síti a vytápěnému okruhu.

Jednotka nejčastěji obsahuje vzduchem chlazený synchronní generátor k výrobě třífázového proudu 400 V, 50 Hz a teplé vody s úrovní teplot na přítoku a vratném toku 85/65 °C při plném zatížení a

standardním rozdílem teplot 20°C. Na trhu jsou i kogenerační jednotky se spalovacím motorem, které mají výstupní teplotu až 100 °C. V praxi se setkáme, že s postupným časovým provozem kogenerační jednotky dochází k zanášení výměníku, které má vliv na přestup tepla a následné snižování výstupní teploty. Proto se doporučuje provádět kontrolu výstupní teploty. Při zanesení výměníku se musí provést jeho vyčištění. Čištění výměníků bude popsáno v části deskové výměníky.

Každý modul BTE může být provozován tepelně i elektricky nezávisle v rozsahu elektrického zatížení 50 – 100 %, to odpovídá 60 – 100 % tepelného výkonu [14]. Na obrázku 5 a 6 je ukázána konkrétní kogenerační jednotka z různých pohledů. Celá tato jednotka je zakrytovaná z důvodu odhlučnění.



Obr. 4 Kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263 z čelní strany



Obr. 5 Kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263 z boční strany

Popis spalovacího motoru byl popsán v předešlé kapitole. Na obrázku 6 je podrobně popsána kogenerační jednotka se spalovacím motorem za pomoci PID schématu doplněná o obrázky popisující daný stroj.

Vstupní surovinou je palivo, které nejčastěji představuje zemní plyn. Se vzduchem se mění ve směšovači směs, která je nasávána a komprimována turbodmychadlem poháněným spaliny, odcházejícími ze spalovacího motoru. Komprimovaná horká směs je v chladiči směsi (výměníku směs-glykol) dopravována do spalovacího motoru.

Samotný glykol je ochlazován v uzavřeném vzduchovém chladiči. Odpadní teplo z chlazení směsi, které tvoří cca 8% z celkového odpadního tepla se do tepelného výkonu jednotky nezahrnuje z důvodu nižších teplot. V případě potřeby ho lze využít pro temperování přilehlých prostor (např. ohřev podzemních garáží, temperování skladů).

Druhý bilanční okruh tvoří teplo z chlazení bloku motoru, teplo z chlazení motorového oleje a teplo z odcházejících spalin. Teplo z chlazení bloku motoru a teplo z chlazení oleje je odváděno pomocí glykolu (vody) do výměníku glykol – voda (voda, voda), pomocí něhož se ohřívá teplá voda případně horká voda teplovodního (horkovodního) okruhu. Ve výměníku ohřátá voda dále prochází výměníkem spaliny - voda, zapojená s předchozím výměníkem glykol – voda (voda – voda) do série a sloužící ke konečnému ohřevu teplé (horké) vody pro zákaznický okruh.

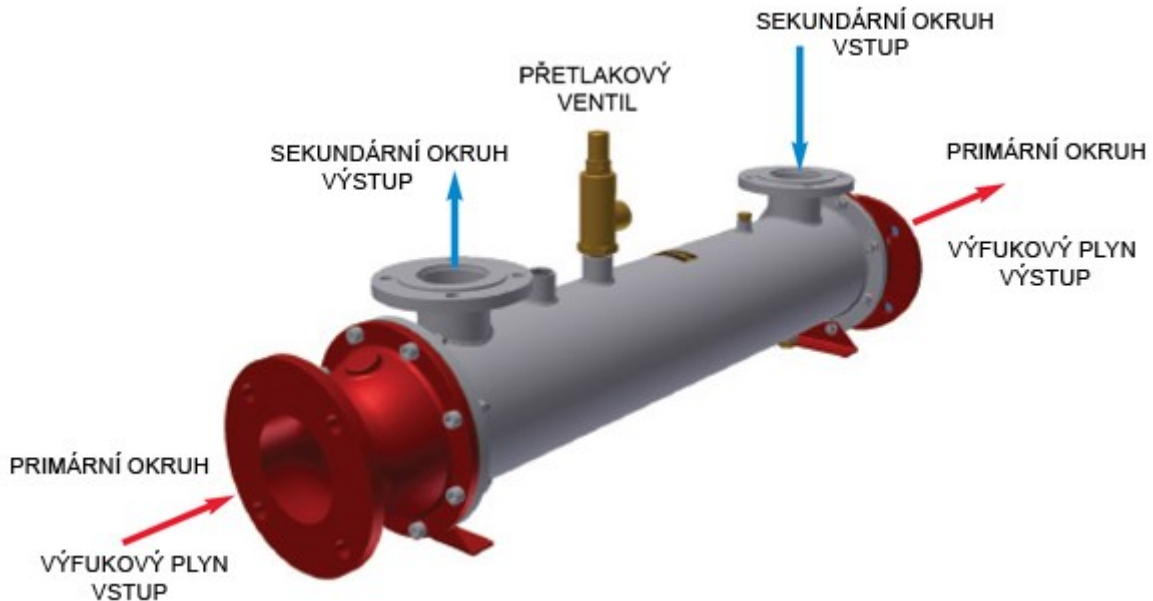
Generátor elektrické energie se u kogeneračních jednotek nižších výkonů používá asynchronní, u vyšších výkonů synchronní.

Elektrická účinnost kogenerační jednotky, která je odvislá od velikosti jednotky, se pohybuje v rozmezí cca 27% - 42% [12]. Účinnost se stanoví z poměru elektrického výkonu jednotky k teplu přiváděnému v palivu (příkon paliva). Tepelná účinnost spalovacího motoru se pohybuje v rozmezí 43% - 53%. Stanovuje se jako poměr tepelného výkonu kogenerační jednotky (součet odpadních teplech z chlazení bloku motoru, chlazení mazacího oleje a chladiče spalin) k příkonu motoru (tepla v palivu). Odpadní teplo spalin přitom tvoří cca 40% z celkového odpadního tepla.

2.6.1 Spalinový výměník tepla

Spalinový výměník tepla přenáší odpadní teplo ze spalin plynového Otto motoru do vodního okruhu. Spalinový výměník je vybaven navařeným dnem z ušlechtilé oceli a rovným svazkem trubek (optimální možnost čištění).

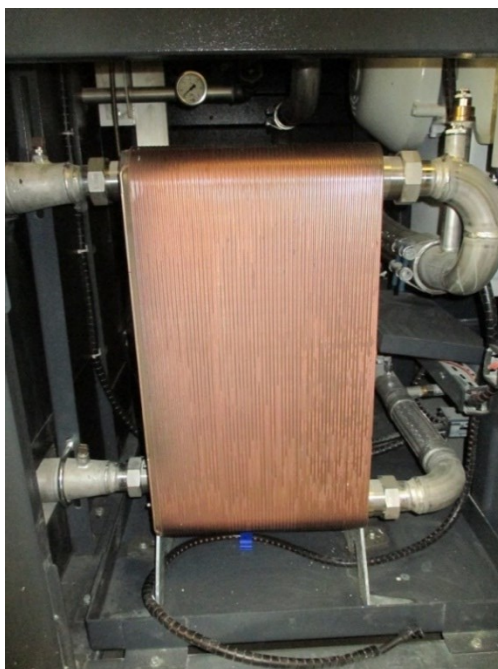
Vstupní a výstupní komora jsou provedeny z ušlechtilé oceli. Vnější plášť je vyroben z normalizované oceli a je vybaven bočními vodovodními přípojkami s přírubovými spoji. Pro názornost vysvětlení je spalinový výměník na obrázku 7 s popisky.



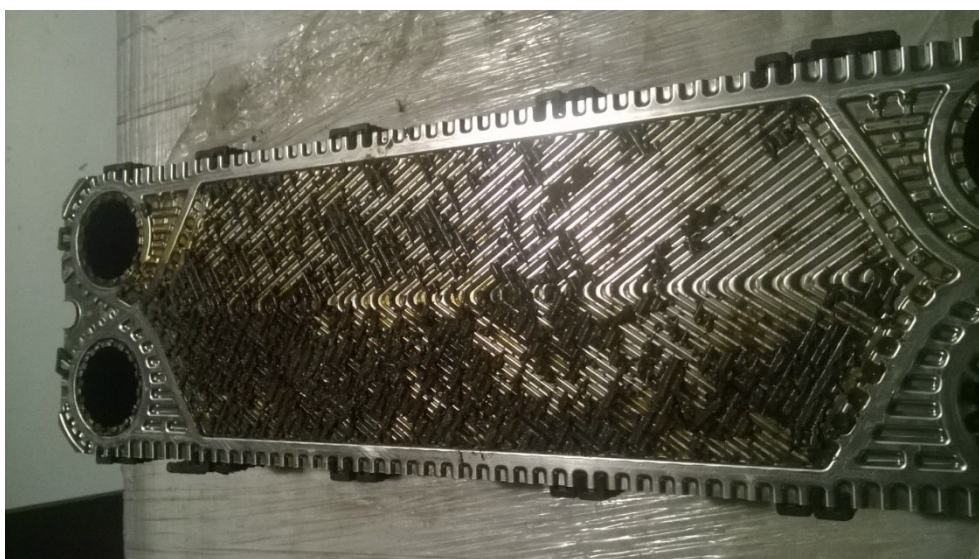
Obr. 7 Spalinový výměník [5]

2.6.2 Výměník chladící vody

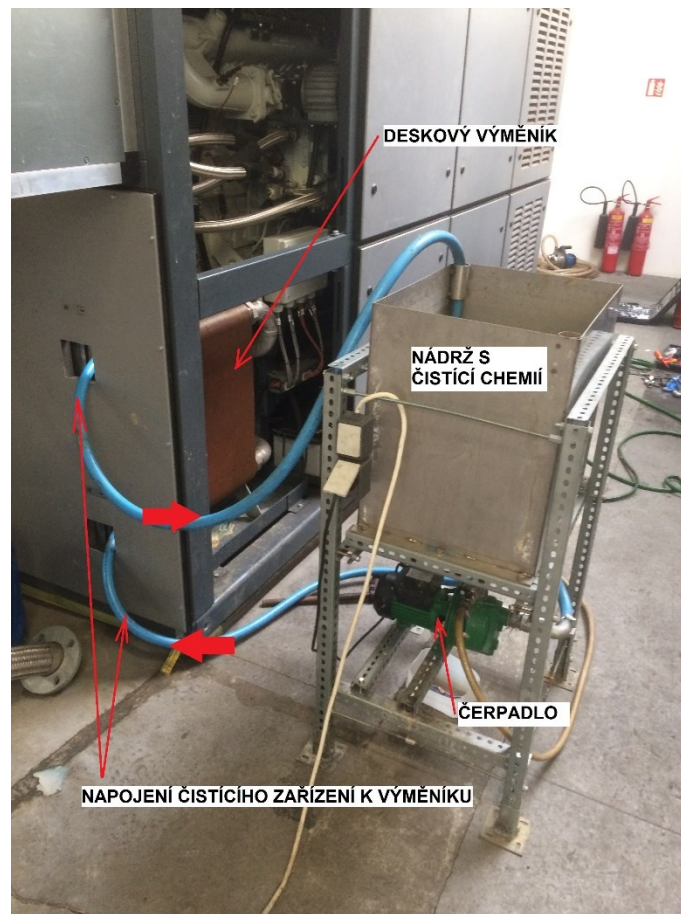
Deskový výměník přenáší odpadní teplo z plynového Otto motoru a odpadního plynu do vodního okruhu. Deskový výměník tepla je vyroben ze svazku desek, který byl pájen mědí. Každá druhá deska je v rovině otočena o 180°, čímž vznikají dva vzájemně oddělené prostory proudění, kterými mohou protékat média (motorová chladicí kapalina, topná voda) a jsou vedena v protiproudu. Provedení desek vytváří velmi vířivý průtok, který umožňuje velmi efektivní přenos tepla již při malém proudění. Výměníky mohou být pájené a nepájené, nebo-li též nazývané nerozebíratelné a rozebíratelné. Na obrázku 8 je ukázán nerozebíratelný deskový výměník (pájený). Na dalším obrázku 9 je ukázána jedna deska z rozebíratelného nepájeného deskového výměníku. Tyto výměníky se vyznačují vysokou účinností při přenosu tepla, ale zároveň se velmi lehce zanáší. Znečištění výměníků může být dvojího druhu. Prvním je mechanické zanesení vlivem hrubých nečistot. Tento způsob čištění je velmi problematický u nerozebíratelných výměníků. Na obrázku 9 je vidět zanešená deska hrubými nečistotami. Mezi další znečištění výměníků může být nanesení nežádoucí vrstvy na přenosné stěně výměníku. Tato vrstva se odstraňuje promýváním za pomoci speciálních rozpouštědel. Ukázka čištění výměníků je na obrázku 10. Informace o znečištění nebo zanešení výměníku můžeme získat z rozdílu tlaků mezi vstupem a výstupem z výměníku. Dalším ukazatelem může být snížení rozdílu vstupní a výstupní teploty z výměníku.



Obr. 8 *Deskový výměník v KGJ*



Obr. 9 *Znečištěná deska výměníku*

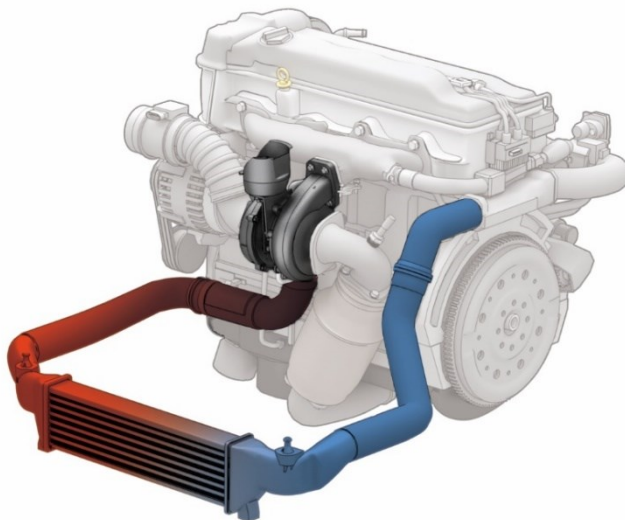


Obr. 10 Čištění deskového výměníku s vysvětlivkami

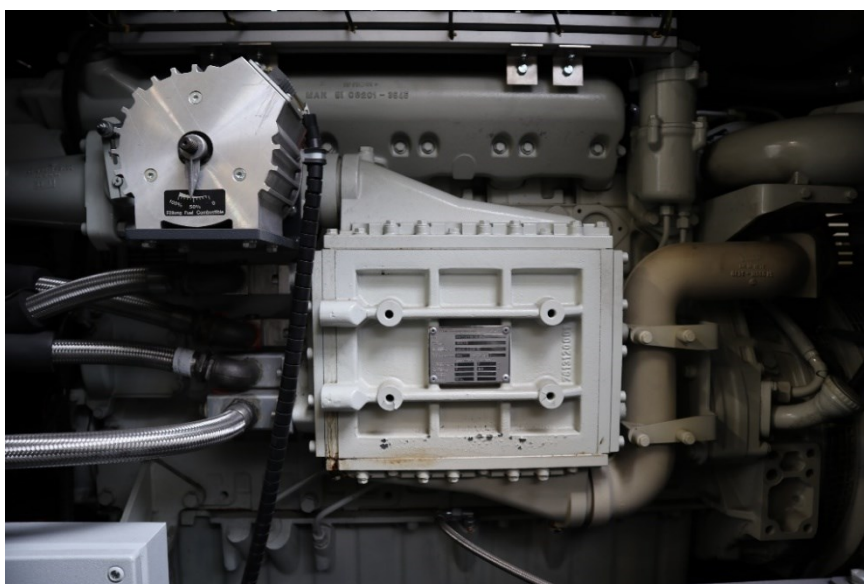
2.6.3 Chlazení paliva

Chlazení směsi (paliva) je spojené s funkcí turbodmychadla. Turbodmychadla se používají u spalovacích motorů pro zvýšení množství směsi (vzduchu a paliva) vstupující do pracovního prostoru motoru. Velkou výhodou turbodmychadla je nárůst výkonu motoru využívající nevyužitou energii z výfukových plynů, čímž se zvyšuje účinnost kogenerační jednotky.

Při stlačování vzduchu dochází k jeho zahřívání. To má za následek nárůst teploty palivové směsi. Vyšší teplota směsi snižuje účinnost motoru, protože zahřátý vzduch má větší tlak při stejném látkovém množství. Do motoru se dostane méně vzduchu s vyšší teplotou a motor by spaloval bohatší směs. Limitující je i teplota, která má vliv na samo vznícení směsi. Snížení teploty stlačeného vzduchu se řeší použitím mezichladiče (výměníkem), obrázek 11, 12. U kogeneračních jednotek se můžeme setkat s výměníkem, který obsahuje dva výstupní topné okruhy. Ve variantě KGJ „EM-199/293“ jsou oba stupně integrovány do interního chladičského okruhu motoru. U varianty KGJ „EM-199/263“, je do chladičského okruhu motoru integrován pouze vysokoteplotní stupeň [14]. Nízkoteplotní stupeň musí být samostatně napájen externím přívodem chladičí vody.



Obr. 11 Chladič palivové směsi [12]



Obr. 12 Chladič palivové směsi

2.6.4 Výroba elektrické energie

U kogeneračních jednotek se nejčastěji setkáváme zejména se dvěma typy alternátorů, kterými je synchronní alternátor a asynchronní alternátor. Každý z těchto typů má své výhody, a naopak i své nevýhody.

2.6.4.1 Asynchronní generátor

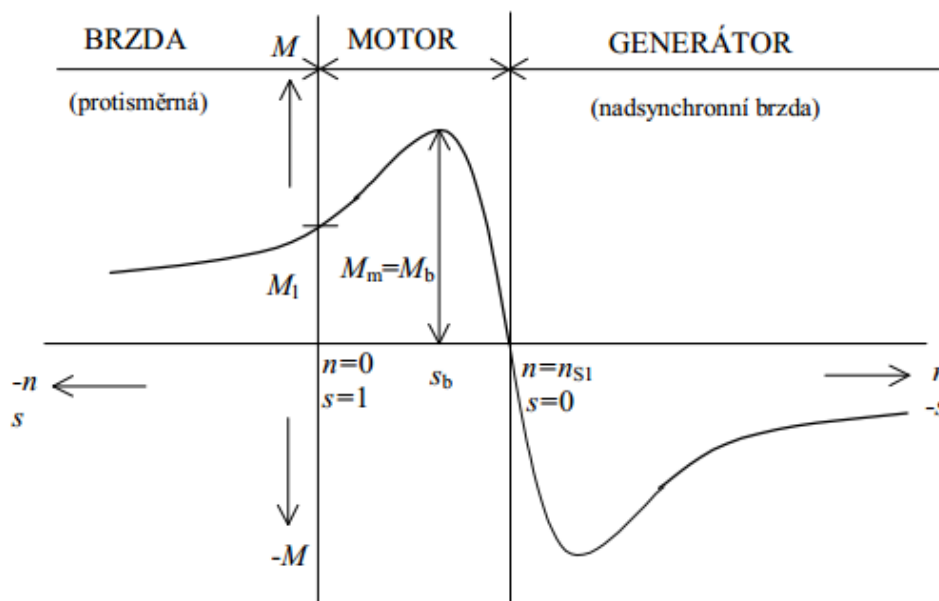
Asynchronní generátor je nejčastějším zdrojem proudu malých jednotek, se kterým se setkáváme především u malých vodních elektráren. Mezi jeho přednosti patří spolehlivost, jednoduchost a minimální nároky na údržbu. Jako asynchronní generátor lze bez úprav použít téměř každý asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko. Asynchronní motor (AM) nebo též nazývaný indukční motor je nejběžnější v průmyslu a je prakticky bezúdržbový.

Asynchronní motor lze rozdělit podle provedení rotorového vinutí:

- s kotvou nakrátko (klecové) – v drážkách rotoru jsou uloženy vodivé tyče, nejčastěji hliníkové, spojené na čelních stranách kruhy nakrátko
- s kotvou kroužkovou – v drážkách rotoru je trojfázové vinutí z mědi spojené do hvězdy, jehož vývody jsou připojeny na tři kroužky nalisované stejně jako magnetický obvod rotoru na hřídeli stroje a ke kterým přiléhají pevně osazené kartáče umožňující vyvedení vinutí na svorkovnici stroje.

Elektromotor, je-li použit jako asynchronní generátor pracuje při otáčkách nad asynchronních. Musí mít tedy vyšší otáčky, než je uvedeno na jeho výrobním štítku a to většinou vám bude stačit 70. otáček a to v případě, že budete generátor připojovat k již stávající síti. Pokud generátor bude pracovat jen v ostrovním režimu, přidání otáček již nehraje tak velkou roli. O kolik je štítková hodnota otáček motoru nižší než příslušné synchronní otáčky odpovídající počtu pólů a frekvenci v síti, o tolik bude potřeba motor přetočit, má-li fungovat jako generátor a dodávat jmenovitý výkon.

Grafickým vyjádřením závislosti momentu na otáčkách (tj. i na skluzu) je momentová charakteristika na obrázku 13.



Obr. 13 Momentová charakteristika asynchronního stroje [13]



Velkou nevýhodou asynchronních motorů, ale i asynchronních generátorů je potřeba jalového výkonu pro vytvoření magnetického pole. Jalový výkon se nazývá z toho důvodu, že energii do této impedance vloženou nelze zužítkovat, ale přesto se přenáší mezi zdrojem a spotřebičem. Při tomto přenosu vznikají na prvcích přenosových a distribučních sítí ztráty, které jsou ve formě tepla vyzařovány do okolí. Proto je velmi účelné vkládat do elektrických sítí další zařízení, kterými se jejich charakter (tedy i impedance) změní a ztráty se tím eliminují (kompenzují). Podle zákona č. 458/2000 Sb. závazná hodnota účinnosti odebíraného výkonu – tzv. neutrální hodnota v rozmezí 0,95 induktivního charakteru až 1,00.

2.6.4.2 Synchronní alternátor

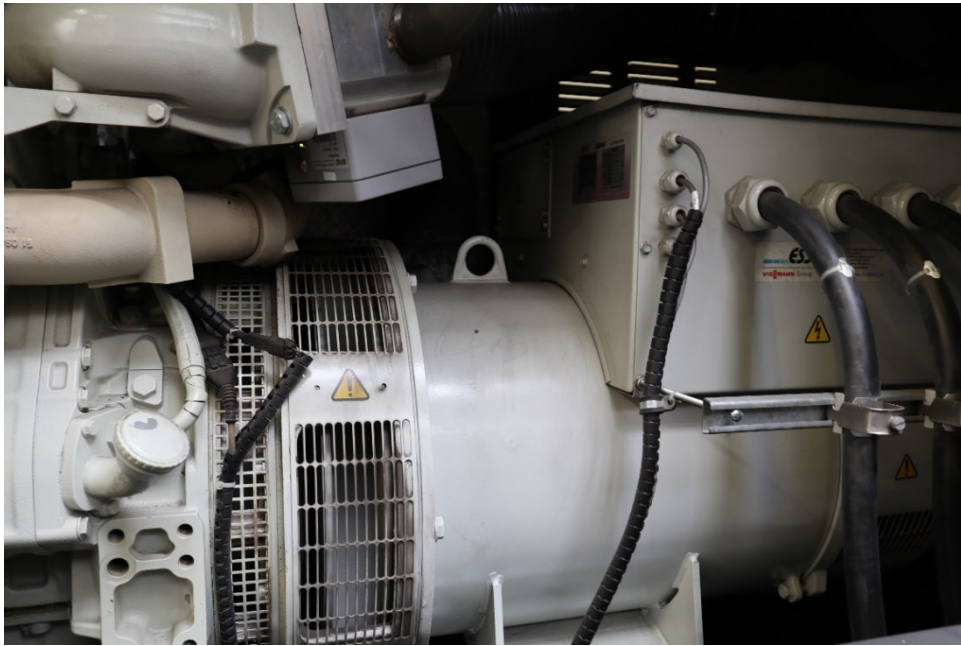
Synchronní alternátor lze použít i jako asynchronní motor. Synchronní stroj se příliš neliší od statoru asynchronního stroje a obsahuje taktéž trojfázové vinutí, které je umístěno v drážkách. Na rotoru je pak umístěno budící vinutí napájené stejnosměrným proudem přes sběrací kroužky a kartáče. Rotor nemusí obsahovat budící vinutí, místo kterého mohou být permanentní magnety.

Provedení rotoru se dá rozdělit na další dva základní typy synchronních strojů a to na synchronní stroje s vyniklými poly (hydrostroje) a stroje s hladkým rotorem (turbosoustroje).

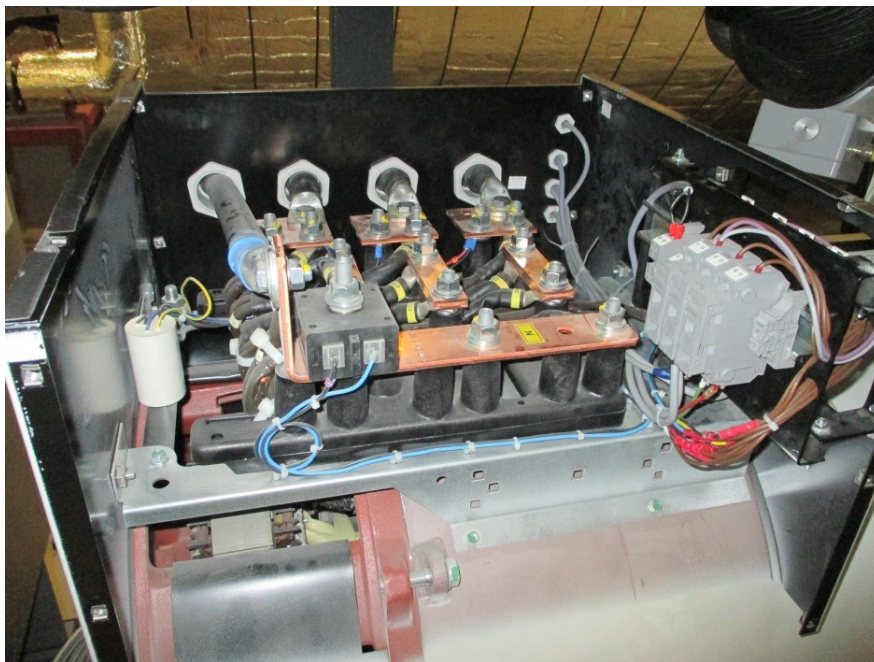
Velkou výhodou synchronních generátorů je regulace jalového výkonu oproti asynchronnímu generátoru. Synchronní generátory nevyžadují kompenzací jako asynchronní stroje, která je provedena za pomoci budícího vinutí. Ale na rozdíl od asynchronních strojů jsou tyto stroje složitější jak na výrobu, tak i na údržbu.

Na obrázku 15 a 16 je třífázový synchronní generátor, který je vybaven automatickou regulací $\cos \varphi$ pro provoz v rozmezí $\cos \varphi = 0,8$ induktivní $-1,0$, nastavitelným statickým zařízením, elektronickou regulací napětí s ochranou proti příliš nízkým otáčkám a dodatečným budičem s permanentním magnetem.

Standardní 2/3 zkrácené vinutí statoru umožňuje síťový paralelní provoz s nízkým podílem harmonických vln. Tlumicí vinutí pro paralelní provoz s jinými generátory je instalováno. Je instalována kontrola teploty vinutí [14].



Obr. 14 Synchronní generátor v kogenerační jednotce Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263



Obr. 15 Svorkovnice generátoru kogenerační jednotky

2.6.4.3 Kompenzace jalového výkonu

Z hlediska umístění kompenzačního zařízení vzhledem ke spotřebiči a napájecí síti definujeme tři způsoby:



- individuální kompenzace – kompenzační zařízení je připojeno na přímo na svorky spotřebiče nebo v jeho blízkosti. Jalová energie je eliminována přímo v místě vzniku. Tím jsou vyloučeny ztráty ve vedení. Individuální kompenzace je typická pro stále provozovanou zátěž s konstantním příkonem např. kompenzace asynchronních motorů, transformátorů, zářivek a výbojek atd. Dosažené úspory jsou nejvyšší, hospodárnost kompenzace však závisí na využití spotřebiče [9].
- skupinová kompenzace – kompenzační zařízení je připojeno na skupinu spotřebičů. V tomto případě je odlehčen úsek vedení od této kompenzace ke zdroji. Vlivem nesoudobosti provozu spotřebičů vychází kompenzační výkon menší než při individuální kompenzaci každého spotřebiče a je již nutná jeho automatická regulace.
- centrální kompenzace – je typická pro rozsáhlé elektrické systémy a používá se pro kompenzaci z jednoho odběrného místa. Obvykle je připojena v hlavní rozvodně závodu na přípojnicích vstupní trafostanice. Vlivem nesoudobosti spotřebičů opět klesá potřebný kompenzační výkon. Rovněž je nutná automatická regulace zaručující přesné dodržování účinníku v předepsaném rozsahu.
- kombinovaná kompenzace – představuje kombinaci předchozích variant [9].

[4]

2.6.4.4 Fázovací podmínky

Nejčastěji se setkáváme s KGJ, které bývají připojeny do distribuční sítě. Při tomto provozu je nutno dodržet čtyři základní podmínky, které se musí dodržet při sepnutí KGJ k distribuční síti. Mezi tyto podmínky patří:

- stejný sled fází alternátoru a sítě,
- stejný kmitočet alternátoru a sítě,
- stejná velikost napětí alternátoru a sítě,
- nulový fázový posuv mezi napětím alternátoru a sítě.

3 Kogenerační jednotky z pohledu provozování v České republice

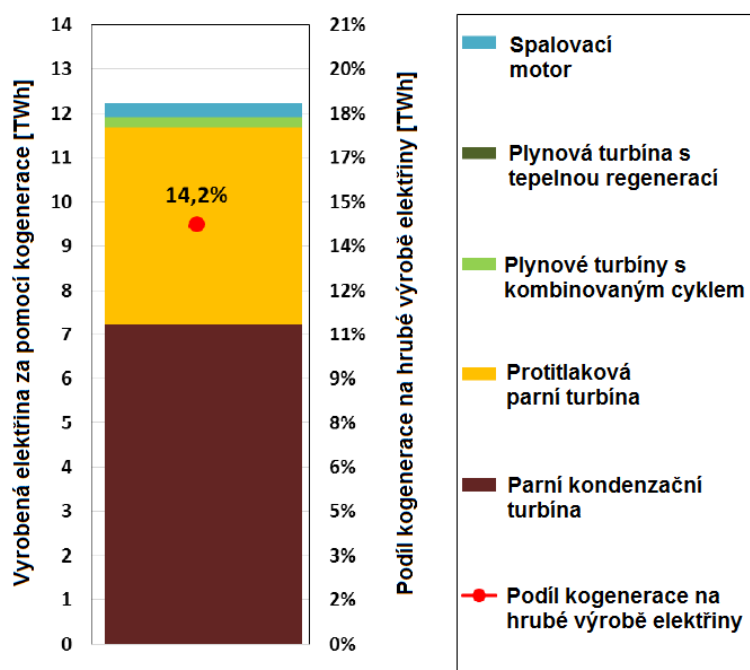
3.1 Kogenerace v České republice

Česká republika je jedním z předních členských států v EU s dlouholetou tradicí v kombinované výrobě tepla a elektřiny. A to s poměrně širokým povědomím o výhodách kombinované výroby tepla a elektřiny. Která má za následek rostoucí výrobou elektřiny z kogeneračních jednotek.

Kogenerační kapacita a výroba energie v posledních letech je relativně stabilní a dosáhla 14% podílu na celkové hrubé výrobě elektřiny. 4,7 GWe instalované kapacity v kogeneraci vyrobilo 11 TWh elektřiny a téměř 34 TWh tepla v roce 2011.

Fosilní paliva (hnědé a černé uhlí) jsou hlavními palivy používanými v České republice při výrobě elektřiny z kombinované výroby tepla a elektřiny (2011) s více než 75% podílem na celkovém množství paliva používaného kogeneračními zařízeními, následované obnovitelnými zdroji energie (především bioplynu a dřeva) % podílu, 7,5% podíl zemního plynu (rostoucí v posledních letech, zejména ve středních a malých jednotkách), 1,5% podíl ropných produktů a 8% podíl na ostatních palivech.

Statistické údaje o instalované kapacitě, hrubé výrobě elektřiny a tepla z vysoce účinné kogenerace v České republice jsou uvedeny na obrázku 17.



Obr. 16 Výroba elektřiny za pomoci kogenerace v České Republice [15]

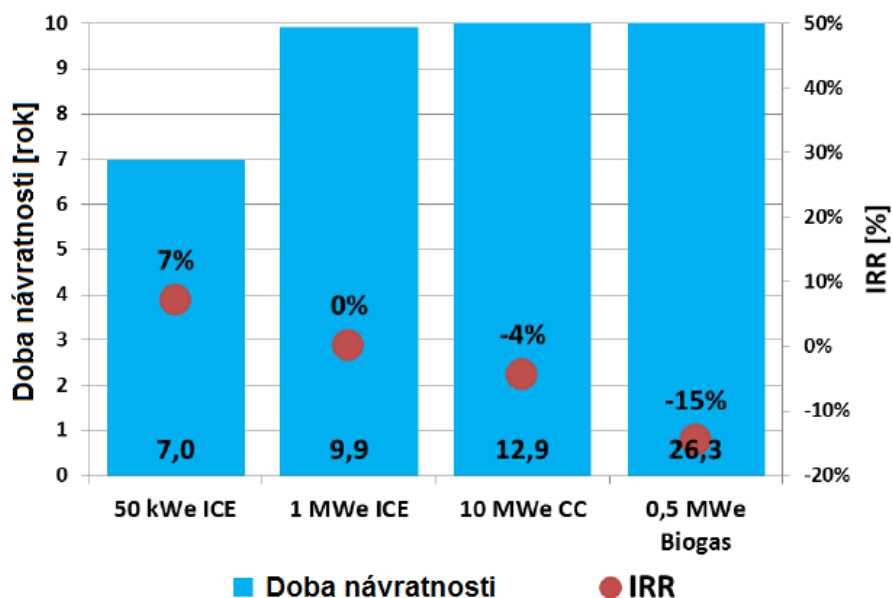
Česká republika je třetím největším výrobcem elektrické energie v EU hned po Francii a Německu s přibližně 17 TWh. Přestože se z domácího uhlí a jaderné energie generuje hrubá tvorba elektrické energie ve výši 86 TWh, došlo za posledních 20 a zejména 10 let s rychlým růstem nebo generováním OZE (větrné elektrárny a fotovoltaické elektrárny) k rychlému rozvoji decentralizované výroby elektřiny.

Zařízení na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny je velkou investicí a její návratnost se většinou měří podle finančních parametrů jako je interní míra návratnosti (IRR), návratnost investic nebo doba návratnosti investice. Důležitým faktorem jsou náklady kogenerační jednotky a její údržba ve srovnání se standardním kotlem.

Pro zjištění hospodářské situace v kogeneraci se provedla ekonomická analýza u následujících nejčastějších čtyř případů:

- spalovací motor o výkonu 50 kWe, instalovaný v hotelu,
- spalovací motor 1 MWe v průmyslovém závodu,
- kombinovaná výroba tepla a elektřiny s kombinovaným cyklem o výkonu 10 MWe ve veřejné službě,
- spalovací motor na bioplyn o výkonu 500 kWe, který je místně v zemědělském družstvu a teplo prodává.

Ekonomické zhodnocení je na obrázku 17 a ukazuje, že pouze mikro kogenerační jednotka umístěná v hotelu dosahuje přiměřené úrovně ziskovosti (IRR 7%), zatímco všechny ostatní kogenerační jednotky mají nulovou nebo zápornou úroveň ziskovosti IRR pod očekávaním ziskovosti typických investorů. Návratnost těchto zdrojů lze vyřešit pouze optimálním a velmi efektivním využitím kogeneračních zdrojů.



Obr. 17 Ekonomické vyhodnocení kogenerace [15]

3.2 Regulace KGJ

Za účelem hospodárného a ekonomického využití kogenerační jednotky je vhodné využívat cenově výhodný proud vyrobený blokovou tepelnou elektrárnou k vlastní spotřebě provozovatele tak, aby byl na jedné straně minimalizován odběr drahého proudu z veřejné sítě, a aby na druhé straně bylo zabráněno napájení vlastního vyrobeného proudu do veřejné sítě za ekonomicky nepříznivých cen. Zařízení k regulaci odběru ze sítě podporuje optimální provoz blokové tepelné elektrárny tím, že přizpůsobuje vyrobený elektrický výkon vlastní spotřebě uživatele.

Na obrázku 18 je schéma zapojení regulace kogenerační jednotky s vlastním odběrem např. v podnikové síti. Kogenerační jednotka je zobrazena na obrázku pod -KGJ1. Skládá se z generátoru G1, fázovacího stykače -KM1 a tepelné ochrany -Q2. Vyráběný výkon z kogenerační jednotky je zachycen červenou šipkou (DODÁVKA), která popisuje směr toku elektrického výkonu. Vlastní spotřeba

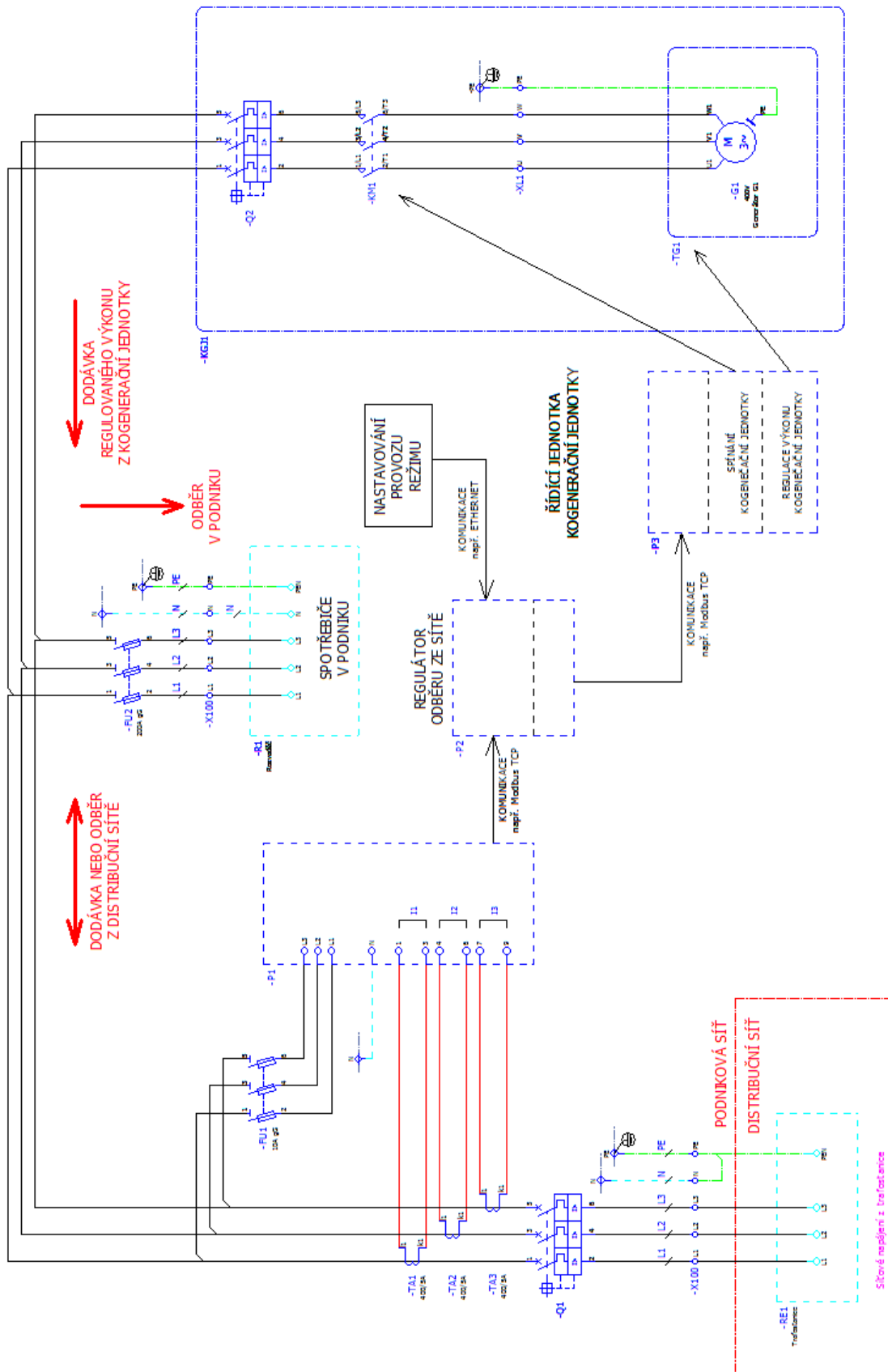


Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

elektrického výkonu např. v podniku je zachycena blokem -R1, pod kterým je myšlen rozvaděč. Směr toku elektrického výkonu je popsán červenou šipkou (ODBĚR V PODNIKU). Směr vyráběného nebo dodávaného výkonu je zachycen červenou oboustrannou šipkou (DODÁVKA NEBO ODBĚR Z DISTRIBUČNÍ SÍTĚ).

Pro informaci o odebíraném výkonu jsou na vstupním vedení (jednotlivých fázích) měřicí transformátory proudu (-TA1, -TA2 a -TA3). Výstupy z jednotlivých měřících transformátorů jsou napojeny do analyzátoru sítě (-P1). Snímání napětí je přivedeno do analyzátoru přes pojistkový odpojovač (-FU1). Měřené hodnoty jsou posílány do regulátoru (-P2), pod kterým si můžeme představit průmyslový automat (PLC). Do regulátoru (-P2) nám přichází informace z analyzátoru (-P1) o vyráběném nebo odebíraném výkonu. Regulátor (-P2) dává povel pro chod kogenerační jednotky a možném řízení vyráběného elektrického výkonu z kogenerační jednotky. Řízení může být pomocí komunikace (Modbus TCP, EtherCAT, PROFI NET, atd.) nebo pomocí proudové smyčky (0-10V, 0-20mA, 4-20mA). Nastavování provozního režimu regulace podnikové sítě se provádí požadavkem do regulátoru (-P2).



Obr. 18 Vícepólové zjednodušené schéma regulace odběru ze sítě v podnikové síti



3.3 Požadavky na výroby s výkonem od 30 kW do 100 kW připojených do DS

Pro operativní odpojení zdroje od DS bude použito relé přijímače HDO ovládané z dispečinku provozovatele DS. V oblasti bez signálu HDO bude k regulaci použita jednotka RTU v majetku PDS. Instalace přijímače HDO bude připravena. Regulace činného výkonu bude probíhat stupňovitě v režimu 0 až 100% instalovaného výkonu.

3.4 Požadavky na výroby s výkonem od 30 kW do 100 kW připojených do DS

3.4.1 Bioplyn a biomasa

Zdroj musí být schopen adekvátně (rychle a přesně) reagovat na povel z dispečinku PDS k omezení činného výkonu stupňovitě v režimu 0, 50, 75 a 100% instalovaného výkonu.

Na dispečink provozovatele DS musí být zajištěn přenos měření a signalizace dle níže uvedené specifikace. U zdroje může být požadována plynulá (ne stupňovitá) regulace napětí nebo jalového výkonu (U/Q) podle pokynů dispečera nebo systémem automatické regulace. V případě dálkového řízení U/Q bude použit standardní komunikační protokol přes komunikační rozhraní řídicí jednotky. Požadavek na regulaci U/Q bude vždy upřesněn na základě výsledků studie připojitelnosti zdroje.

3.4.2 RTU jednotka

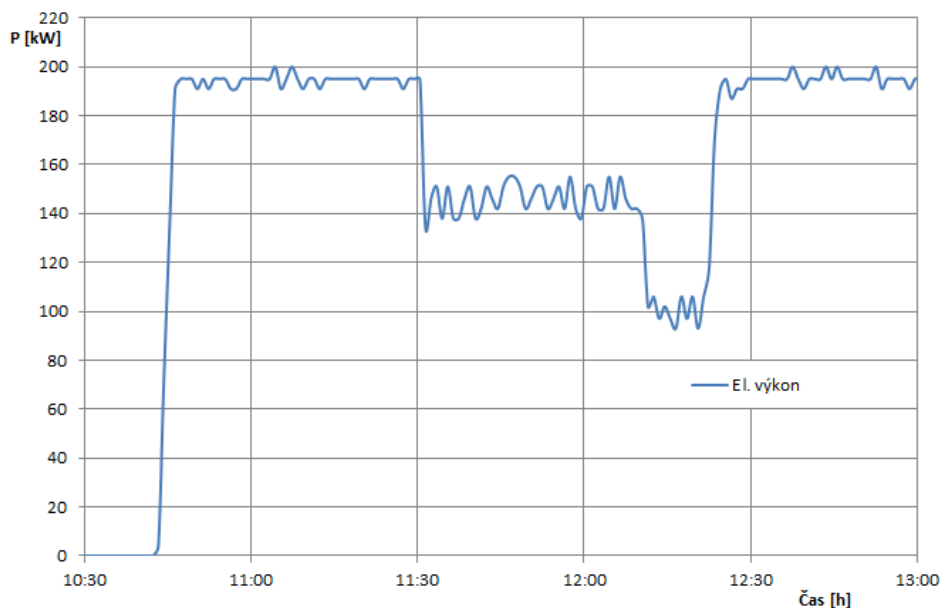
U zdroje je nutné osadit zařízení kompatibilní a odzkoušené s koncovým zařízením v dispečerském centru PDS. Standardně je v ČEZ Distribuce, a.s. osazována jednotka RTU7M od fy Elvac IPS s.r.o. Jednotka RTU musí být instalována tak, aby zůstala pod napětím (funkční) i po odpojení výroby z paralelního provozu s DS. RTU rozvaděče je zobrazena níže na obrázku 20.



Obr. 19 RTU rozvaděč

V obrázku č. 21 je ze dne 1.7.2014 je zaznamenán průběh regulace KGJ o elektrickém výkonu 199kW za pomoci řízení RTU rozvaděče vysílající signály z dispečinku. V 10:43 byla zapnuta KGJ, kdy v čase 10:48 na jmenovitou hodnotu. Tato KGJ pracovala v jmenovitém režimu až do 11:30, kdy přišel povel z dispečinku, aby se výkon jednotky snížil na 75% jmenovitého výkonu. Po dvou minutách jednotka najela na 150 kW v tomto výkonu byla provozovaná až 12:10, kdy došel povel z dispečinku na snížení výkonu na 50% jmenovitého výkonu (100kW). Jednotka jela na tento výkon za jednu minutu a byla provozována až do 12:23, kdy došel povel najetí jednotky na 100% jmenovitého výkonu. Tohoto výkonu se dosáhlo v čase do dvou minut.

U chodu KGJ při 75% a 50% jmenovité výkonu je možno pozorovat značné výkonové změny. Ty jsou způsobeny krátkým chodem kogenerační jednotky, kdy se její výkon ustálí většinou až po dvou hodinách provozu.



Obr. 20 Regulece výkonu KGJ pomocí RTU řízení

3.5 Zpětné vlivy

S rušivými signály se můžeme nejčastěji setkat v průmyslových závodech. Nejčastěji bývá rušen signál HDO. Pro omezení vlivu zdrojů na úroveň signálu HDO se používají hradicí členy. Jsou to paralelní rezonanční obvody naladěné na frekvenci HDO zapojené mezi zdroj a distribuční síť. [8] Na základě síťového výpočtu navrhujeme jejich parametry a dodáváme je, přičemž poskytujeme záruku, že vyhoví příslušnému provozovateli sítě s ohledem na platné normy a legislativu.



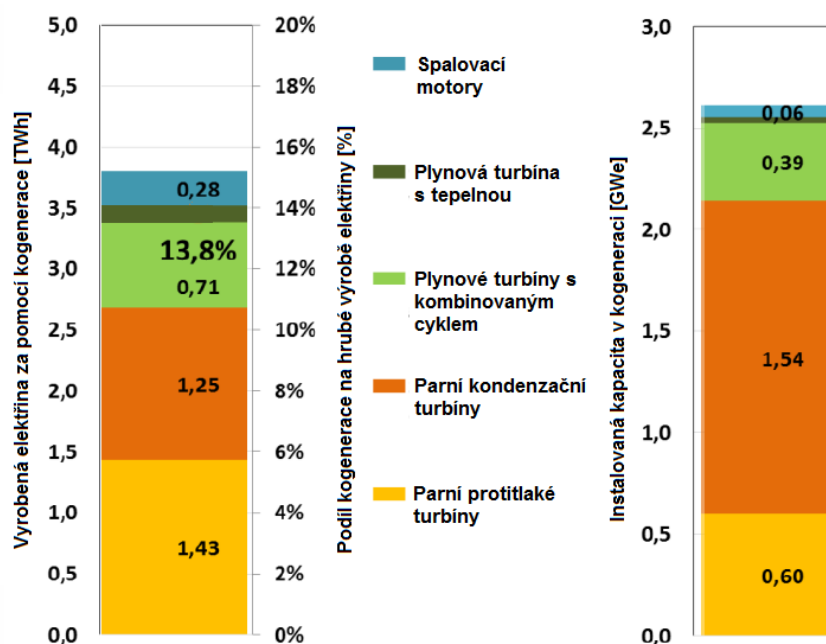
Obr. 21 Hradicí členy [16]

3.6 Rozvoj kogeneračních jednotek v zahraničí

3.6.1 Slovensko

Slovenská republika je společně s Českou republikou jedna z nejvyspělejších států v EU v oblasti kogenerace s 25% podílem kogenerace na hrubé výrobě elektřiny. Dlouhodobý rozvoj kogenerace je v oblasti dálkového vytápění a v průmyslu. Kogenerační výroba na Slovensku má široké povědomí mezi lidmi o jejich výhodách a má velkou podporu v rozvoji těchto zdrojů, zejména i na jejich modernizaci. Slovenská republika se v posledních letech potýká s problémy s dodávkami zemního plynu z Ukrajiny. To je jedna z kritických otázek politiky EU, která řeší bezpečnost dodávek zemního plynu, jež je závislá na provozu a následně i rozvoji kogeneračních jednotek.

V současné době na Slovensku je zaznamenáván mírný pokles kogenerace, i když má stále 14% podíl na celkové výrobě elektřiny. Většina nebo-li více než 80% z celkové instalované kapacity 2,6 GWe s asi 4 TWh elektřiny a 10 TWh výroby tepla je zajištěno parními turbínami (včetně jaderných elektráren) a více než 80% celkové výroby z kogenerací je vyráběno v zařízeních dálkového vytápění. Slovensko má více než 30% podíl v zemním plynu, 27% podílu v uhlí, více než 20% v jaderné energii a stále narůstající 4% podíl v OZE. Pouze plynové motory kogeneračních jednotek zaznamenávají pozitivní trend v posledním období.



Obr. 22 Vyrobená elektřina za rok a instalovaný výkon za pomoci kogenerace na Slovensku [16]

Většina elektřiny pocházející z kogenerace se vyrábí v parních protitlakových turbínách (38%), následují parní kondenzační turbíny (33%), plynové turbíny s kombinovaným cyklem (19%), spalovací motory (7%) a plynové turbíny s rekuperací tepla (4%). Hlavním palivem používaným v kogeneraci je zemní plyn s 31% podílem, následované uhlí 27%, jaderná energie 21%, kapalná paliva 17% a 4% podíl biomasy a bioplynu.

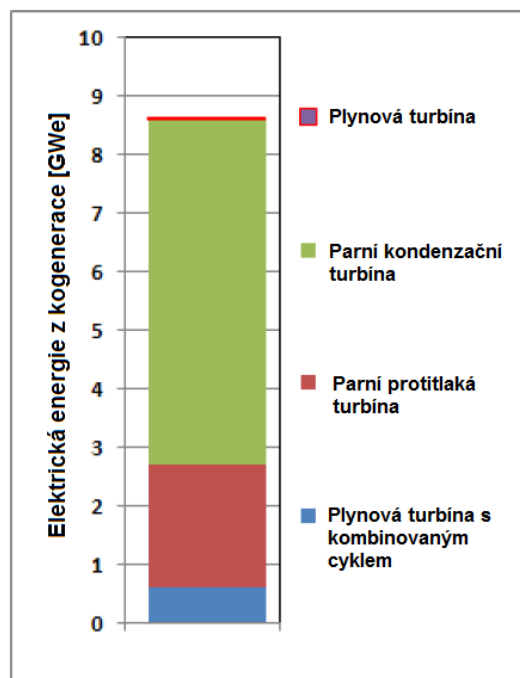
Na Slovensku se nejčastěji setkáváme s kogenerací v průmyslu a dálkovém vytápění.

Rozvoj kogenerace na Slovensku je na vysoké úrovni, která si zakládá na povědomí u poskytovatelů energetických služeb, projektantů, výzkumném a vzdělávacím sféře.

3.6.2 Polsko

Instalovaná kapacita v kogenerace v Polsku je 8,7 GW a výroba elektřiny z vysoce účinné kogenerace se pohybuje v rozmezí 25 TWh až 27 TWh.

Podíl kogenerace na hrubé výrobě elektrické energie je něco kolem 17%. Vyrobená elektřina za pomoci kogenerace se v Polsku vyrábí převážně z uhlí (přibližně 88%). Podíl elektřiny vyrobené z plynové kogenerace (kombinovaná plynová turbína) a v kogeneraci s elektrickým výkonem pod 1 MW (spalovací motor) představují méně než 12% veškeré elektřiny vyrobené v kogeneraci. Elektřina vyrobená z bioplynu nepřekročila v roce 2010 hodnotu 1% [16].



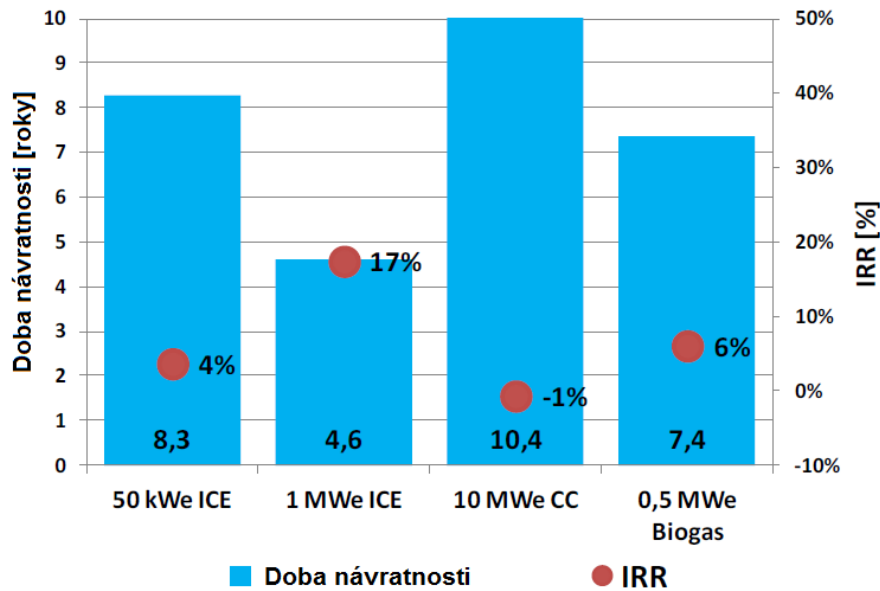
Obr. 23 Podíl jednotlivých kogeneračních technologií v Polsku [16]

Při provedení ekonomické analýzy ve čtyřech obchodních případech byly porovnány různé investice v současném stavu na Polském trhu. Vyhodnocené kogenerace jsou následující:

- mikro kogenerace o výkonu 50 kWel
- malá kogenerace o výkonu 1 MWel, která je instalována v průmyslu
- kogenerace kombinovaného cyklu o výkonu 10 MWel (CC)
- kogenerační zařízení na výrobu bioplynu o výkonu 500 kWel, umístěná v zemědělském družstvu a teplo je prodáváno zákazníkovi

Mikro kogenerace o výkonu 50 kWel mají velmi špatné investiční podmínky, kde IRR se pohybuje kolem 4%. Naopak kogenerace o větších výkonech 1MWel mají velmi dobrou návratnost a to kolem 4,5 let a IRR je 17%. Příznivé podmínky mají v poměrně vysoké prodejní ceně za elektřinu. Nízká

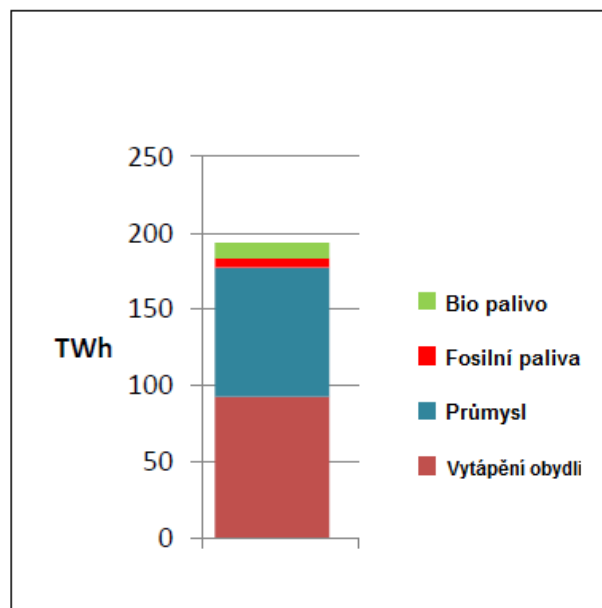
(IRR) ziskovost je zřejmá u elektrárny na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny s výkonem 10 MWe se spotřebou zemního plynu a to zejména v důsledku nízké ceny na trhu s elektřinou. Kogenerační jednotky spalující zemní plyn vykazují přijatelné výnosy (IRR 6%) [7].



Obr. 24 Ekonomické zhodnocení jednotlivých kogenerací v Polsku [16]

3.6.3 Německo

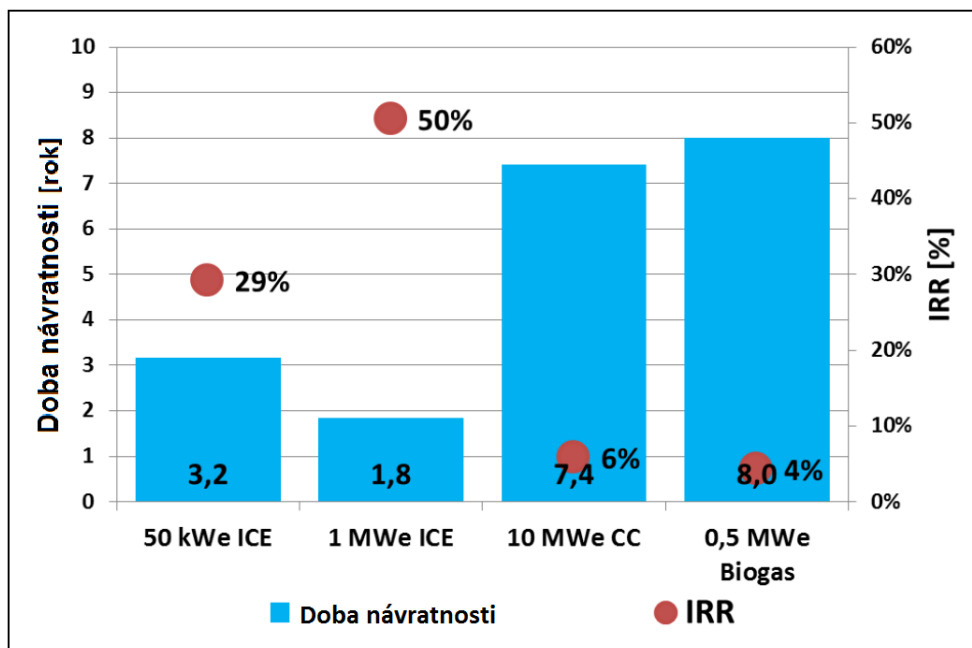
Instalovaná elektrická kapacita kogeneračních jednotek v Německu v roce 2018 byla 22,5 GWe, generovaná výkonová kogenerace činila 79TWh a teplo vyrobilo 178 TWh [7]. Podíl na celkové čisté výrobě elektřiny činí 15,4%.



Obr. 25 Vyrobené teplo za pomoci kogenerace v jednotlivých sektorech [16]

Obrázek 204 ukazuje výsledky výpočtů ziskovosti čtyř zařízení na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny: spalovací motor o výkonu 50 kWel instalovaný v hotelu, spalovací motor o výkonu 1 MWel

instalovaný v průmyslové továrně, kogenerace kombinovaného cyklu o výkonu 10 MWe, a kogenerační zařízení na výrobu bioplynu o výkonu 500 kWe umístěné na farmě, čímž se teplo prodává klientovi [16].



Obr. 26 Ekonomické zhodnocení jednotlivých kogenerací [16]

3.6.4 Francie

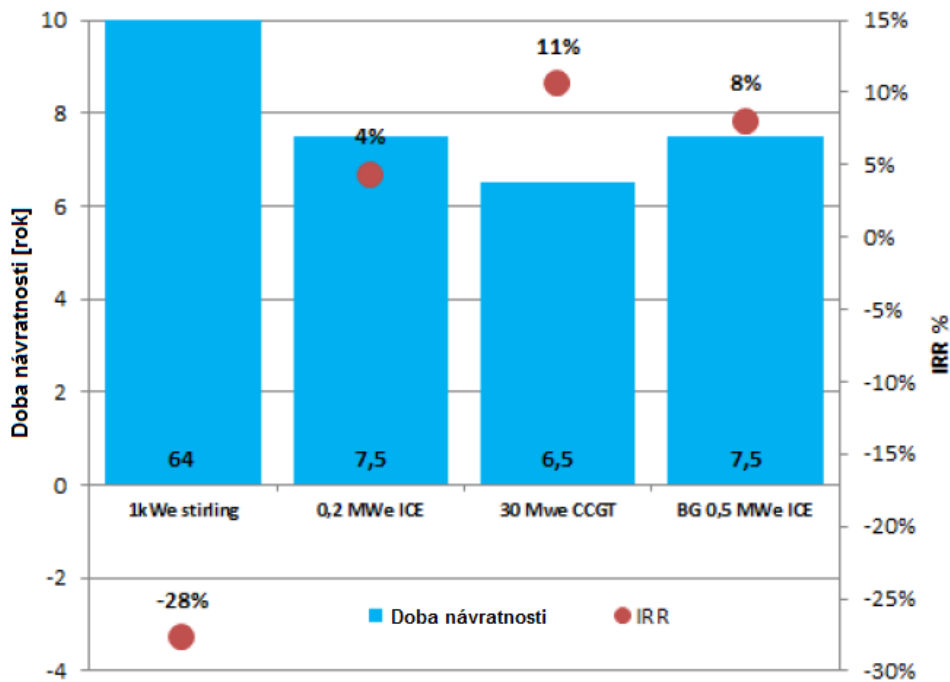
Celkový instalovaný elektrický výkon z kogenerace ve Francii v roce 2018 činil 4,6 GWe, včetně plynu a páry jako primární energie. V letech 2008 až 2014 se snížila výroba energie z kombinované výroby tepla a elektřiny o cca 4 555 MW [7]. Výkon z kogenerace se nachází převážně v průmyslových zařízeních a v dálkovém vytápění.

Pokles výroby a kapacity kogenerace se očekává v příštích letech kvůli nedostatku i podpory ze strany státu, v důsledku zvýšení cen plynu.

Pouze mikro kogenerace získávají podporu a to na daňových úlevách, naopak kogenerační jednotky na biomasu využívají příjmy z dotací na využití zemědělských kalů.

Při provedení ekonomické analýzy ve čtyřech obchodních případech byly porovnány různé investice v současném stavu na francouzského trhu. Vyhodnocující kogenerace jsou následující:

- Stirlingův motor 1 kWe pro domácnost,
- Spalovací motor 200 kWe instalovaný v průmyslovém podniku,
- Plynová turbína o výkonu 30 MWe pro vytápění dálkovým teplem
- Bioplynová stanice 500 kWe na farmě s využitím živočišných kalů

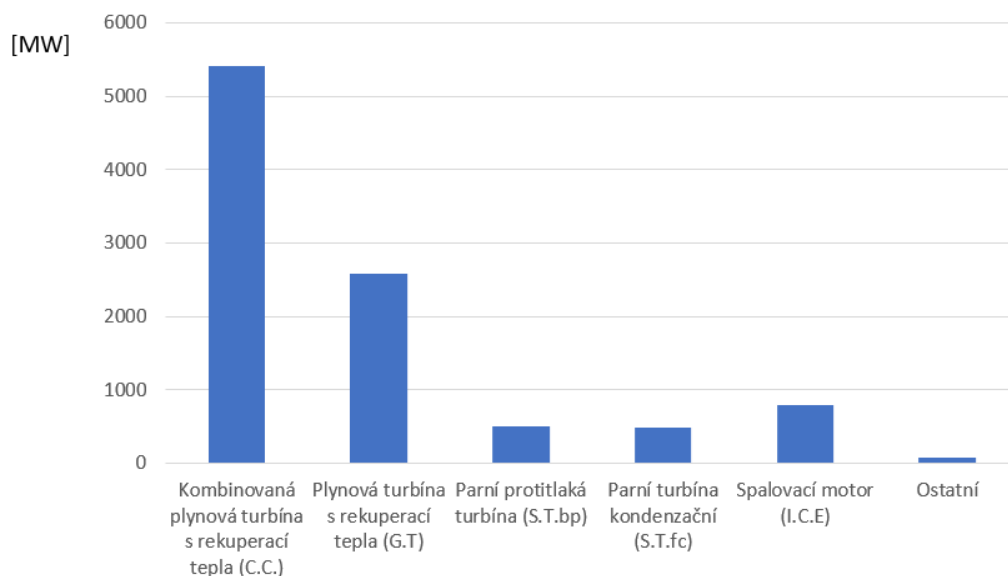


Obr. 27 Ekonomické zhodnocení jednotlivých kogenerací [16]

Využití kogenerace pro domácnosti (Stirlingův motor) mají velmi špatné investiční podmínky. Naopak kogenerace o větších výkonech mají velmi dobrou návratnost a to kolem 8 let a návratnost investice je od 4% do 11% [16]. Je však nutné podotknout, že francouzské podpory v kogeneraci jsou velmi různorodé v závislosti na technologii, velikosti a zeměpisných podmínkách a smlouvách o dodávkách zemního plynu.

3.6.5 Itálie

V roce 2012 zaznamenala kogenerace v Itálii výrobní kapacitu 13 986 MW, z nichž více než 85% se týkalo větších rozvodných plynovodů s kombinovaným cyklem. K dnešnímu datu však při výrobě 63 GWh (ekvivalent 27GWh elektrické energie a 33 GWh využitě tepelné energie) to je pouze 43% vysokoúčinné kogenerace [16]. Zastoupení jednotlivých typů kogenerace v Itálii je na obrázku 29.



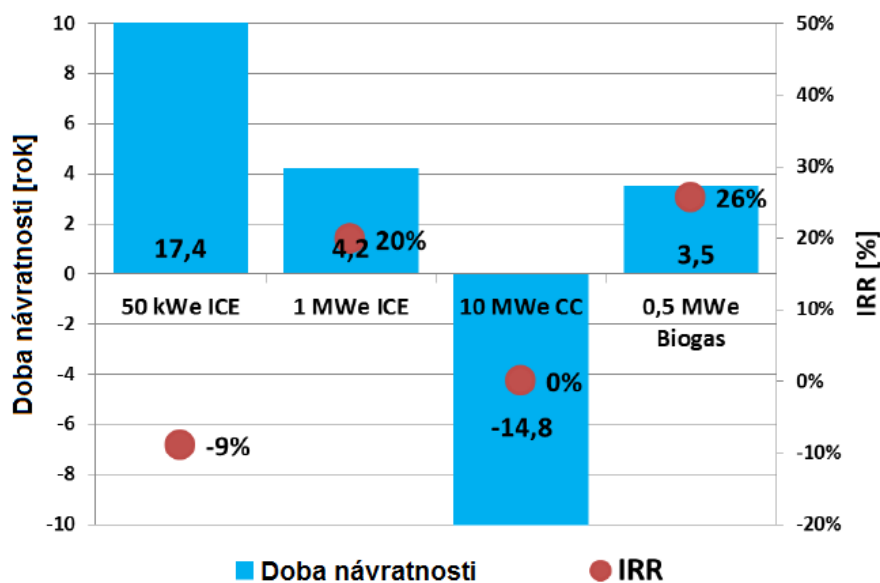
Obr. 28 Zastoupení jednotlivých typů kogenerace v Itálii [16]

3.6.6 Anglie

Kombinované výroby tepla a elektřiny ve Spojeném království je několika posledních letech stabilní. Tržní sektor s kogeneračními jednotkami se spalovacím motorem v rozsahu mezi 100 kWe až 1 MWe zaznamenává v posledních letech silný růst, zejména v sektorech služeb, které mají velké požadavky na teplou vodu, jako jsou rekreační střediska, hotely a zdravotní střediska. V roce 2012 byla v kogeneraci instalovaná kapacita 6 GWe, která se nachází hlavně v průmyslu, ve Velké Británii je 6,5% z celkové produkce energie [16].

Při provedení ekonomické analýzy ve čtyřech obchodních případech byly porovnány různé investice v současném stavu na Anglickém trhu. Porovnávané typy kogenerace jsou následující:

- spalovací motor o výkonu 50 kWe (ICE) instalovaný v hotelu,
- Spalovací motor o výkonu 1 MWe (ICE) instalovaný v průmyslovém podniku,
- paroplynová turbína o výkonu 10 MWe (CC) pro vytápění dálkovým teplem
- Bioplynová stanice 500 kWe (Biogas) na farmě s využitím živočišných kalů



Obr. 29 Ekonomické zhodnocení vybraných typů kogeneračních jednotek [16]

Kogenerace o výkonu 50 kWe instalované v hotelech má dobu návratnosti 17 let. Velmi zajímavý je sektor s kogeneracemi kolem výkonu 1 MWe, které mají dobu návratnosti 4 roky a vnitřní míru návratnosti 20% [16].

Kogenerační technologie s kombinovaným cyklem o výkonu 10 MWe napojený na síť dálkového vytápění je pro Spojené království nerentabilní. Náklady na palivo jsou vyšší než finanční návratnost vyváženého tepla a elektřiny. Důvodem je to, že veškerá vyrobená elektřina je vyvedena do sítě za nízkou cenu.

Kogenerace využívající bioplyn mají podporu státu, hodnota IRR je 26% a dobu návratnosti je 3,5 roku [16]. Vzhledem k velkým nejistotám investorů souvisejících s těmito režimy podpory nesmí tato vysoká interní míra návratnosti vést k velkému zvýšení investic do obnovitelných zdrojů využívající bioplyn.

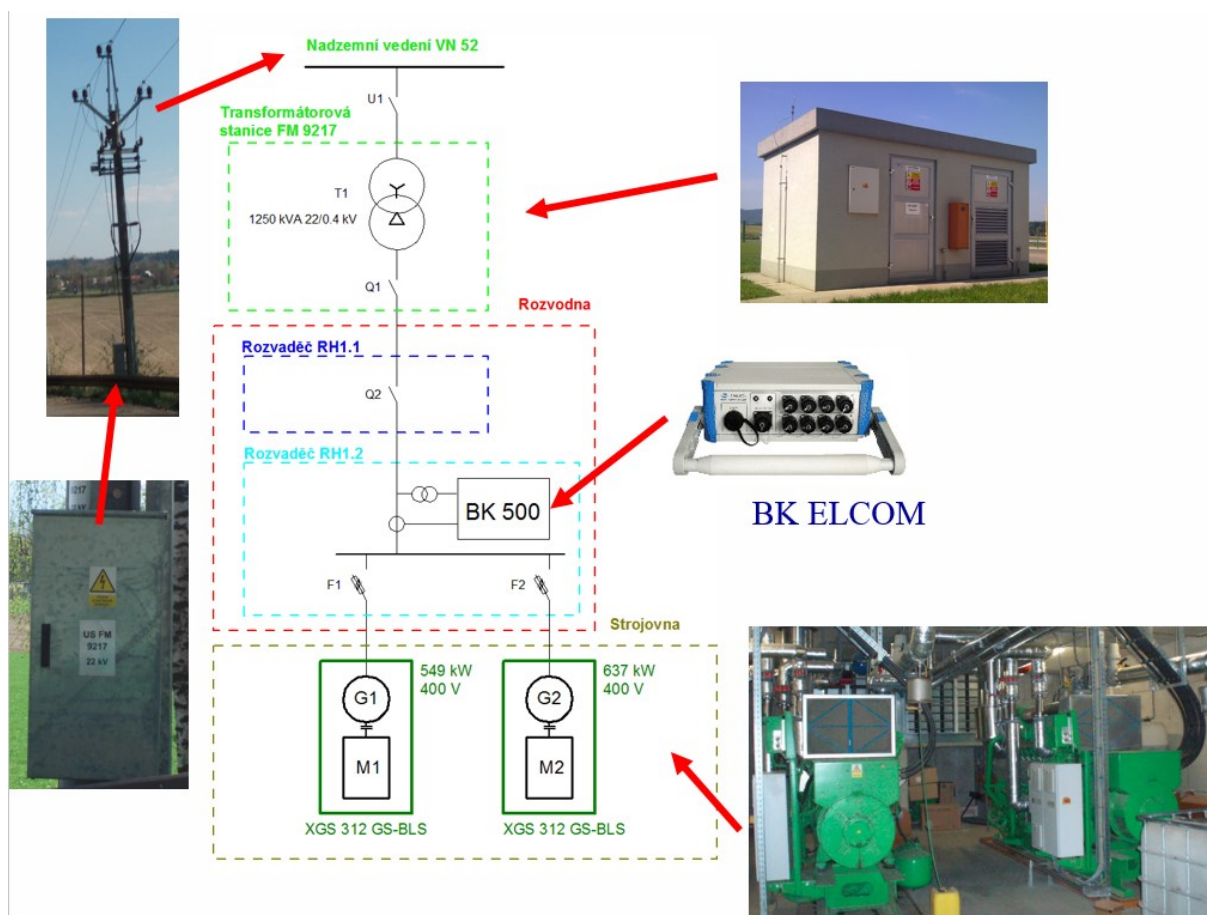
4 Měření elektrických parametrů na konkrétní kogenerační jednotce

Tato kapitola se zabývá hodnocením naměřených provozních elektrických veličin z konkrétní bioplynové stanice.

Bioplynová stanice, ve které bylo provedeno měření se nachází na území Moravskoslezského kraje v blízkosti vepřínu. Bioplynová stanice má instalovaný celkový elektrický výkon 1186 kW. Veškerý vyrobený bioplyn je spalován v kogeneračních jednotkách se spalovacím motorem. Všechny kogenerační jednotky jsou od jednoho výrobce GE Jenbacher. Výrobna je tvořena jednotkou JGS 312 GS-B.LC 1x549 kW a jednotkou JGS 312 GS-B.LC 1x637 kW (obrázek 31). Výrobna je připojena na venkovní vedení VN 22 kV (obrázek 32). Elektrický výkon z kogenerační jednotky o napěťové hladině 400V je transformován na 22 kV za pomoci transformátoru o výkonu 1250 kVA, který je umístěn v kiosku [28], [33]. Zapojení transformátoru je Dyn1.



Obr. 30 Kogenerační jednotka GE Jenbacher JGS 312 GS-B.LC 637 kW



Obr. 31 Schéma zapojení kogeneračních jednotek do distribuční sítě

Měření bylo provedeno v roce 2014, a to od 20 srpna 2014 do 19 září 2014, po dobu 31 dnů. Měření bylo prováděno pomocí automatického provozu digitální měřicího zařízení BK ENA 330 od výrobce ELCOM. Model ENA330 je kompaktní analyzátor kvality elektřiny bez displeje. Přístroj je vybaven čtyřmi napěťovými a proudovými vstupy. Analyzátor ENA330 splňuje požadavky normy

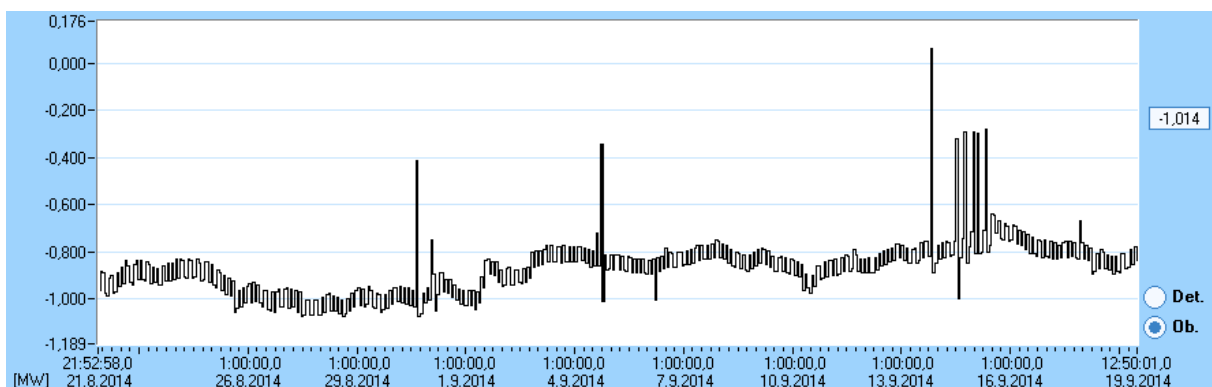
ČSN EN 61000-4-30 pro přístroj třídy A. Napětí se měřilo přímo na sběrnici v rozváděči a proudy pomocí flexibilních Rogowského cívek – AmpFLEX. Měřicí zařízení BK ENA 330 bylo napojeno v rozvaděči RH 1.2 BPS Hodoňovice (obrázek 32). Interval záznamu (vzorkovací frekvence) byla zaznamenávána po 1 minutě [33], [34].

V průběhu měření se získalo celkem 44 640 řádků záznamu, což odpovídá vzorkovací frekvenci 1 minuta po době 31 dnů. Naměřená data byla vyhodnocena za pomoci programu BK ELCOM 2.9 Report, který vyhovuje všem požadavkům dle normy ČSN EN 50160.

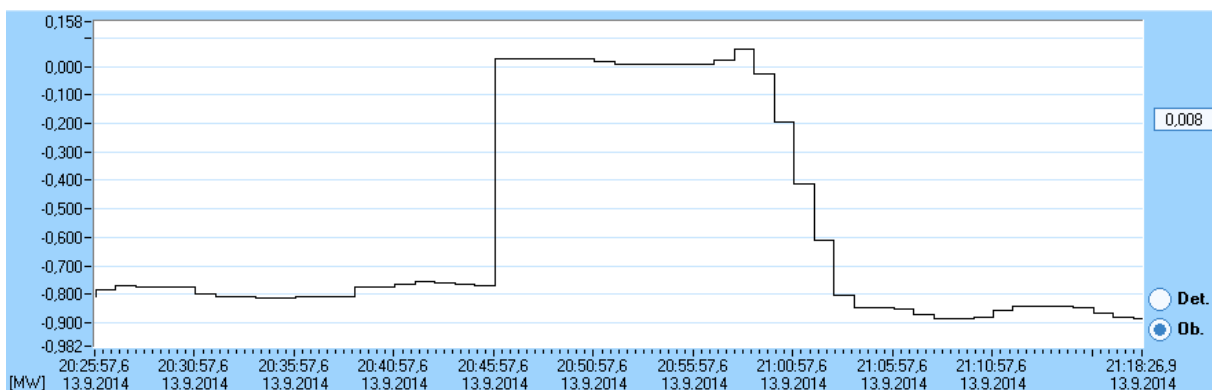
Při vyhodnocování naměřených dat byly zhodnoceny poklesy napětí v síti. Dalším hodnotícím parametrem byla dodávka elektrického výkonu z kogeneračních jednotek. U tohoto parametru se bude vyhodnocovat průběh dodávaného výkonu.

4.1 Elektrický výkon

Obrázek 33 představuje celkový průběh činného výkonu při chodu všech kogeneračních jednotek pro celých 31 dnů měření. Výkon (P) je součtem činného výkonu v každé fázi ($P_1 + P_2 + P_3$). Graf (obrázek 3) ukazuje, že po celou dobu měření byl jeden výpadek elektrické energie a to ve dnech 13. září 2014 v celkové době trvání 13 minut. Obrázek 34. ukazuje detailní průběh výpadku výkonu ze dne 13.9.2014 kdy došlo k výpadku v období od 20:46 do 21:59 (13min).



Obr. 32 Celkový činný výkon dodávaný všemi CHP (za období od 20 srpna 2014 do 19 září 2014)

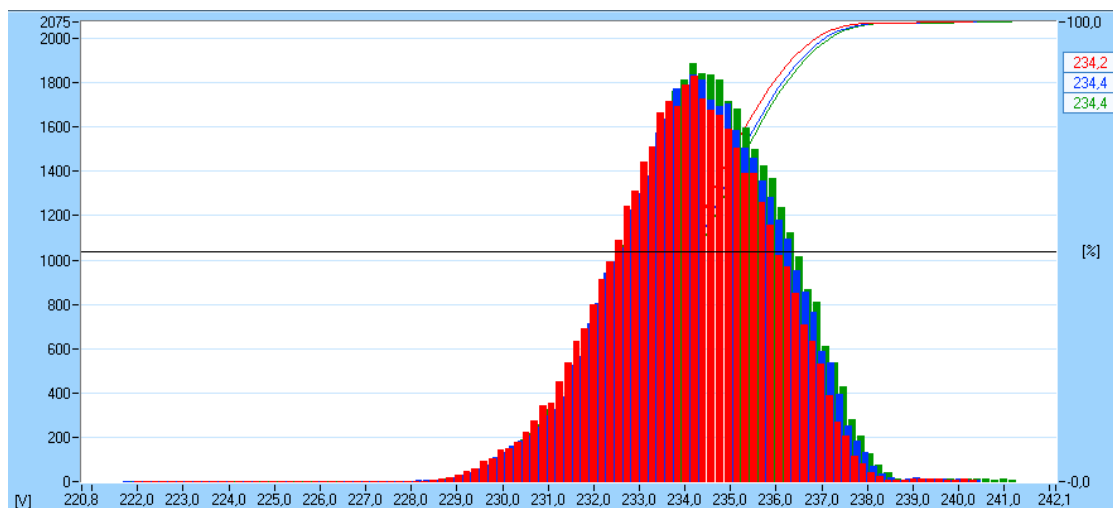


Obr. 33 Detail průběhu výpadku činného výkonu dodávaný všemi CHP 13 září 2014

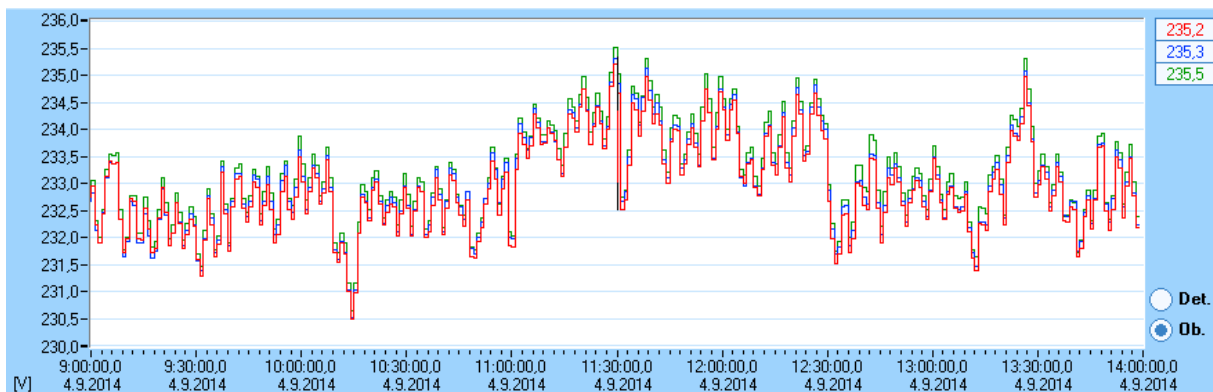
Na obrázku 34 je detailní průběh výpadku výkonu. Z obrázku je vidět, že výpadek kogeneračních jednotek nebyl způsoben poklesem bioplynu ale poruchou na elektrickém zařízení. Při poklesu plynu by byla využita setrvačná energie stoje a elektrický výkon by se snižoval pomalu. Při odstranění poruchy byl následně vyslán nový povel ke spuštění kogeneračních jednotek. Nabíhání kogeneračních jednotek je možno pozorovat narůstajícím (schodovým) výkonem (obrázek 34). Tento průběh je způsobem záznamem v 1 minutových intervalech. Z vypnutého stavu kogenerační jednotky najely téměř na jmenovitý výkon do 5 minut. Ze studeného stavu by jinak kogenerační jednotka najížděla na jmenovité hodnoty delší dobu. To bývá způsobeno zahřátím olejového a vodního hospodářství.

4.2 Měření napětí

Pokud odchylky napájecího napětí (ve všech třech fázích) nejsou překročeny limity $\pm 10\%$ U_n což odpovídá hodnotám v rozmezí 207 až 253 V vyhovují normě. Na obrázku 5 je zobrazen histogram napětí jednotlivých fází, tedy počet (frekvence) na napětí v každé třídě (rozsah hodnot). Obrázek 35 ukazuje histogramy napětí pro jednotlivé fáze. Všechny fáze jsou téměř identické se střední hodnotou 234,2V s rozpětím $\pm 4,5V$. Průběh napětí ve fázi L1 je zobrazen červenou barvou, fáze L2 je modrou barvou a fáze L3 je zelenou barvou. Detailní průběh napětí je zobrazen na obrázku 36 ze dne 4 září 2014. Byl zvolen pracovní den a to od 9:00 do 14:00, aby bylo možno pozorovat poklesy napětí. Z obrázku je patrné, že přibližně od 11:00 do 12:30, došlo k nárůstu napětí. Ten byl způsoben sníženým odběrem elektrického výkonu což má silnou vazbu na polední pauzu, kdy ve firmách jsou vypínány velké spotřebiče.



Obr. 34 Histogram napětí z celkového měření

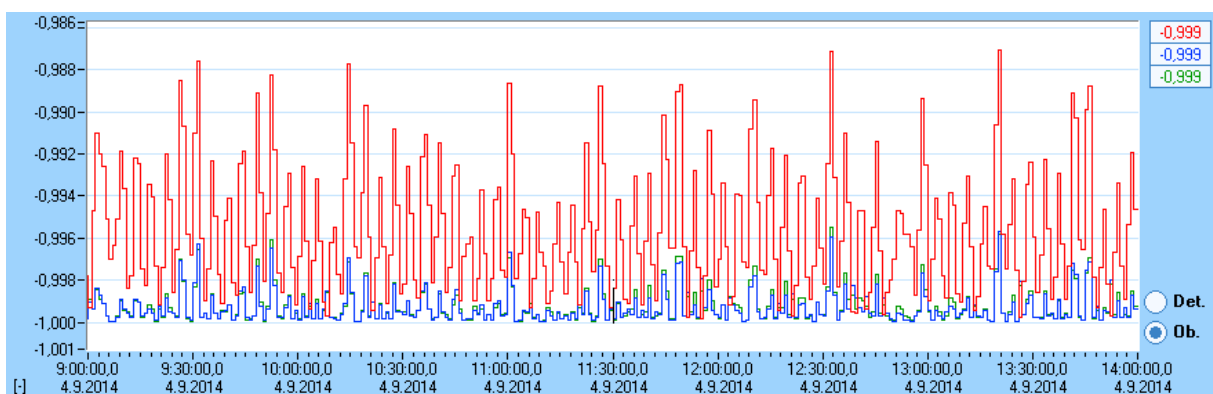


Obr. 35 Detailní průběh napětí ze dne 4 září 2014 od 9:00 do 14:00

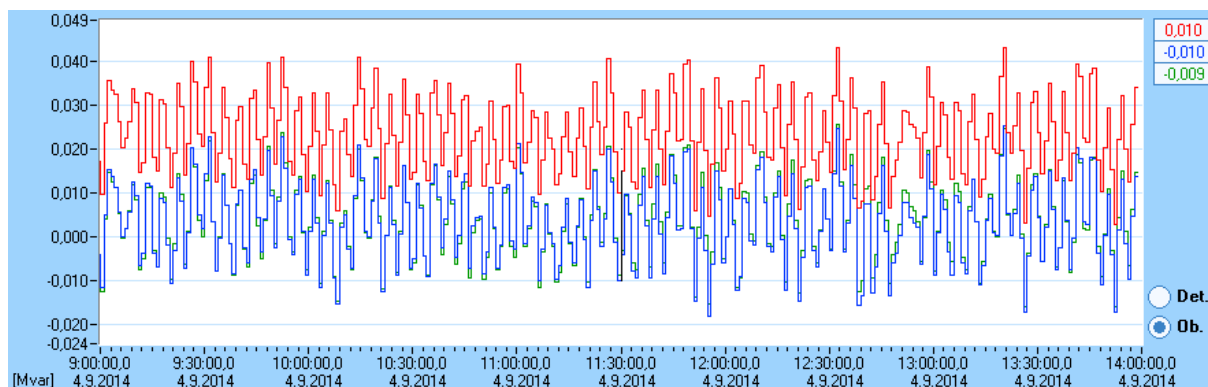
4.3 Měření účinníku

Účinník se v průběhu měření pohyboval ve všech fázích v rozmezí od 0,989 do 1 ve více než 95%, s výjimkou výpadku dodávky činného výkonu. Na obrázku 37 je zobrazen detail průběhu účinníku ze dne 4 září 2014. Byl zvolen od 9:00 do 14:00, aby bylo možno pozorovat výkonové změny. Největší změny průběhu účinníku jsou u fáze L1 (vykreslené červenou čarou). Naopak nejmenší jsou u fází L2 a L3 (modrá a zelená barva). Průběh fáze L3 (zelená křivka) není zřetelně vidět, který zakrývá průběh fáze L2 (modrá křivka). Tyto průběhy jsou téměř identické.

Dodávaný jalový výkon za celkové měření osciloval kolem střední hodnoty 25 kVAr s výchylkou 200 kVAr (rozmezí 44 “induktivní” až -18 kVAr “kapacitní”). Z obrázku 38 je patrný detail průběhu jalového výkonu.



Obr. 36 Detail účinník v jednotlivých fázích ze dne 4 září 2014 od 9:00 do 14:00



Obr. 37 Detail průběhu jalového výkonu v jednotlivých fázích ze dne 4 září 2014 od 9:00 do 14:00

Za celou dobu měření výsledky odpovídaly rozsahu napětí, jak je uvedeno v normě ČSN EN 50 160. Z naměřených výsledků vypovídá vysoká spolehlivost napájení do sítě (doba výpadků je 0,029% provozních hodin). O dodávce elektrického výkonu z kogeneračních jednotek spalující bioplyn lze obecně říci, že je velmi stabilní. Nejvíce bývá ovlivněn tento výkon kvalitou dodávaného bioplynu (procentní zastoupení metanu CH_4 v bioplynu), na který má silnou vazbu na kvalitu primárního (organického) produktu.

5 Řízení jalového výkonu u kogeneračních jednotek

Tato část řeší problémy s připojováním malých výroben do distribuční sítě a jejich řízení jalového výkonu.

Z pohledu malých výroben budou vyhodnocovány kogenerační jednotky se spalovacím motorem. Získaná data pro vyhodnocení jsou z bioplynové stanice, kde jmenovitý instalovaný výkon kogenerační jednotky je 549 kW a 637 kW. Výrobna je připojena na venkovní vedení VN 22 kV. Zde je vyhodnoceno měření a zachyceny problémy, s regulací jalového výkonu.

Problémy s jalovou energií nastávají, pokud máme více zdrojů jalové energie v těsné blízkosti (oddělené malou impedancí). Nejčastěji se s tímto problémem setkáváme, pokud připojujeme ku příkladu kogenerační jednotku do rozvodné sítě, kde už je nainstalovaná původní kompenzace. Kogenerační jednotky mají vlastní regulaci jalového výkonu u větších strojů je synchronní generátor: Ten je zdrojem jalového výkonu, kdy se jeho výkon zvýší buzením. Při napojení tohoto zdroje do rozvodu, kde je nainstalovaná původní kompenzace dochází k velkým problémům. Každý z těchto zdrojů má svoje řízení jalového výkonu, které má nastaveno různou citlivost. Při jejich provozu dochází k hádání se mezi jednotlivými kompenzačními zdroji. S tímto problémem se setkáváme u velké části takto nainstalovaných malých výroben.

Analyzovaná data pro vyhodnocení byla získána z bioplynové stanice Hodoňovice. Ta se nachází na území Moravskoslezského kraje, konkrétně v zemědělském areálu společnosti Beskyd Agro a. s. Palkovice. Bioplynová stanice využívá pro výrobu bioplynu mokrou fermentaci a jako vstupní suroviny se využívá odpad z farem v Hodoňovicích a Palkovicích, a to konkrétně travní siláž, žitná siláž, kukuřičná siláž, prasečí a hovězí kejda. Výroba bioplynu probíhá při termofilních podmínkách při teplotě 55 °C. Bioplynová stanice Hodoňovice slouží k produkci elektřiny a tepla.

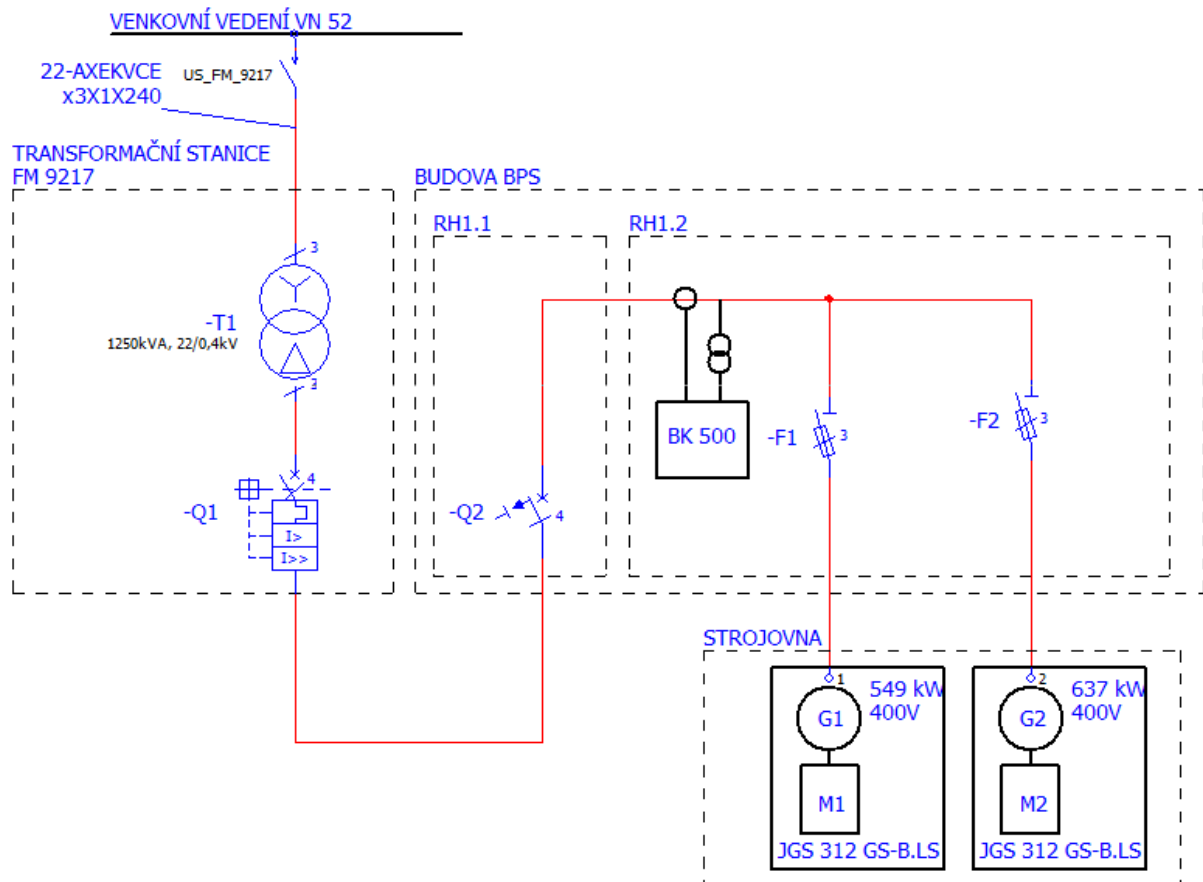
Elektrická a tepelná energie je vyráběná ve dvou kogeneračních jednotkách se spalovacími motory. A to od výrobce GE Jenbacher JGS 312 GS-B.LC o elektrickém výkonu 549 kW a 637 kW.

Elektrický výkon, který dostáváme z kogenerační jednotky má napětí 0,4 kV. Pomocí transformátoru o výkonu 1 250 kW, který je umístěn v samostatné kobce, je napětí transformováno na hladinu 22 kV pro připojení na venkovní vedení VN 22 kV.



Obr. 38 Kogenerační jednotka Jenbacher JGS 312 GS-B.LC

Měření na bioplynové stanici v Hodoňovicích probíhalo od 20. 8. 2014, 11:12 h. do 19. 9. 2014, 14:11 h. V průběhu měření došlo k zaznamenání celkem 44 640 řádků záznamu, což odpovídá vzorkovací frekvenci 1 minutě po dobu 30 dnů. Měření bylo prováděno pomocí automatického provozu digitálního měřicího zařízení BK ENA 330 od výrobce ELCOM, Model ENA330 je kompaktní analyzátor kvality elektřiny bez displeje. Přístroj je vybaven čtyřmi napěťovými a proudovými vstupy. Analyzátor ENA330 splňuje požadavky normy ČSN EN 61000-4-30 pro přístroj třídy A.



Obr. 39 Schéma zapojení kogeneračních jednotek do distribuční sítě a napojení měřicího přístroje BK 500

5.1 Analýza naměřených hodnot

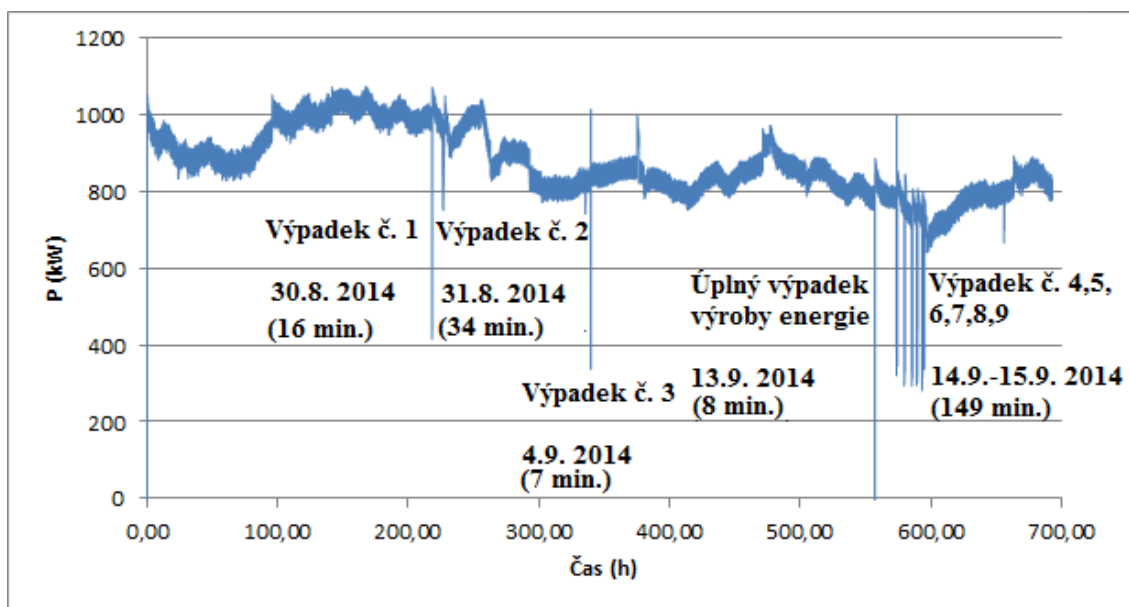
V následující části budu uveden rozbor naměřených hodnot z 30 denního měření na hodoňovické bioplynové stanici (20. 8. 2014 - 19. 9. 2014). Naměřená data byla získána z programu BK ELCOM 2.9 Report, který slouží jako nástavba programu LabVIEW do programu MS Excel pro lepší přehlednost.

Analýza průběhu činného a jalového výkonu

Na obrázku 41 je uveden průběh celkového činného ($P1 + P2 + P3$), který získáváme z kogeneračních jednotek v období od 20. 8. 2014, 11:11 h. do 19. 9. 2014, 19:50 h., kdy měření probíhalo. Neuvádíme zde výkony jednotlivých fází jednotlivě, důvodem je získat přehlednost grafů. A dále jelikož odchylky mezi jednotlivými fázemi nejsou nijak významné. V průměru se odchylka mezi jednotlivými fázemi pohybuje do 1 %. Když se zaměříme na celkový průběh výkonu, je patrné že kogenerační jednotka nebyla provozována po většinu času na svůj plný jmenovitý výkon 1 186 kW.

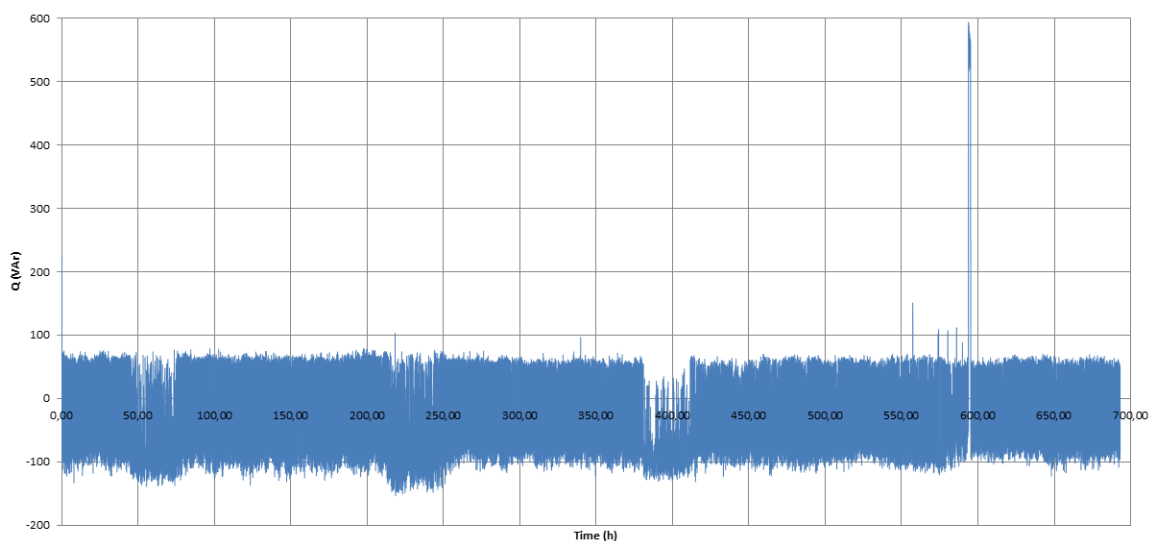
Z obrázku 41 je dále patrné, že došlo k jednomu úplnému výpadku výroby elektrické energie, ke kterému došlo 13. 9. v 19:48 h. a trval do 19:57 h., tedy asi 8 minut. To znamená, že bioplynová stanice nevyráběla žádnou energii 0,019 % času z celkového měření (693,2 h). Tento výpadek byl způsoben, na základě přerušení dodávky elektrické energie dne 13.9. [29] Tento výpadek znamenal, že bioplynová stanice nevyráběla žádnou energii.

Kromě tohoto úplného výpadku došlo ještě k devíti méně významným částečným výpadkům výroby elektrické energie. Kdy došlo ke strmému poklesu dodávaného výkonu do sítě o více jak 25% proti předchozí hodnotě ustáleného výkonu. Celková doba trvání těchto částečných výpadků byla 4 hodiny, což znamená, že těchto 9 částečných výpadků v dodávce činného výkonu na bioplynové stanici trvalo 0,58 % času z celkového měření (693,2 h). Velikost vyráběného činného výkonu se při již zmíněných výpadcích pohybovala v rozmezí 290 – 758 kW.



Obr. 40 Graf průběhu celkového činného výkonu dodávaného do sítě [29]

Průběh jalového výkonu je zobrazen na obrázku č. 42, získaný ze všech tří fází. Ze záznamu vyplývá, že výkon je v čase silně proměnlivý. V průměru dosahuje jalový výkon hodnotu - 37,1 kVAr, což znamená, že v průměru dochází k odběru jalového výkonu ze sítě.



Obr. 41 Průběh jalového výkonu

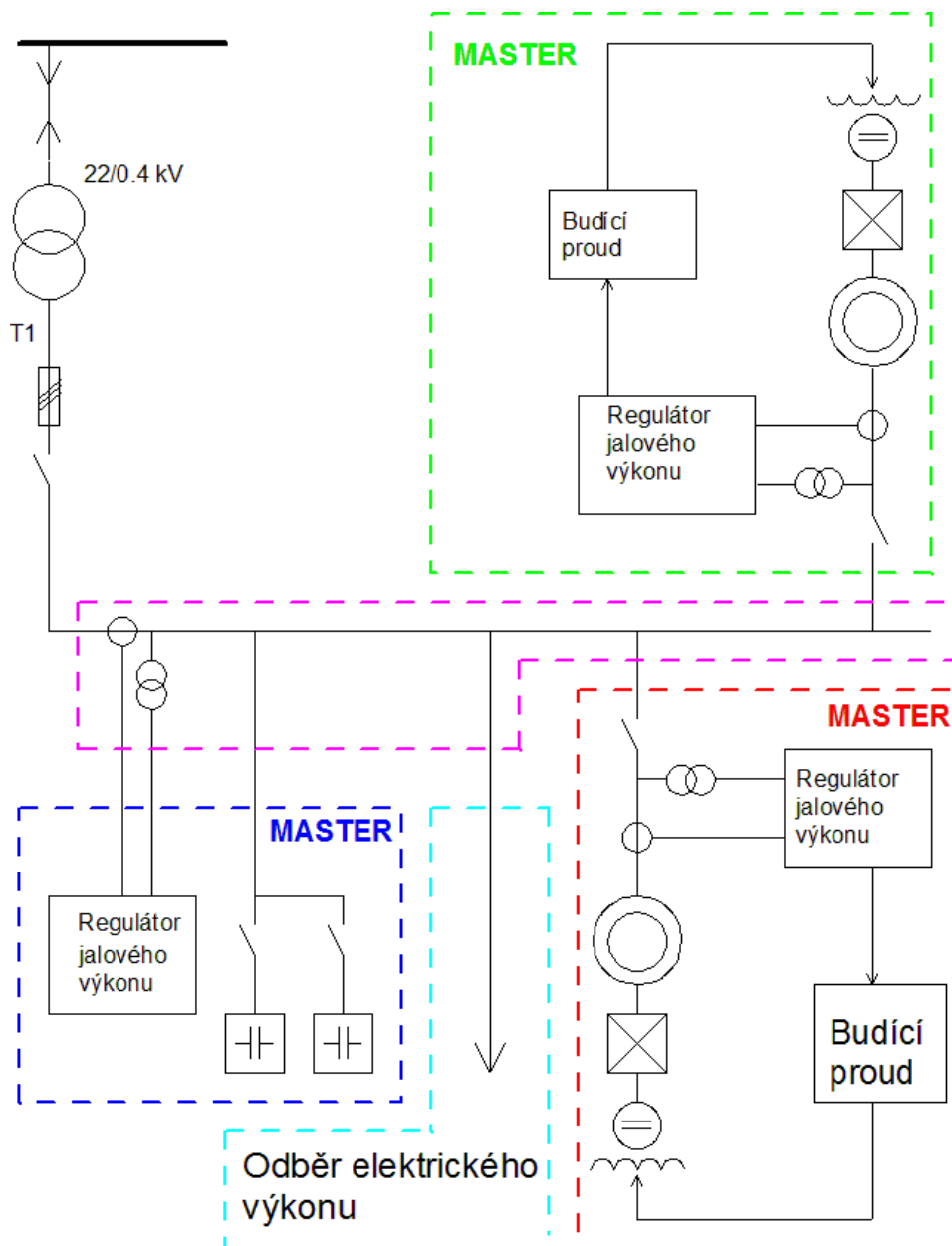
Kogenerační jednotka jednak dodává, ale i odebírá jalový výkon ze sítě, to je způsobeno, tím že máme instalované dva různé typy zdroje kompenzace. Tyto se chovají v čase nesynchronně.

Jedním z nich jsou dva synchronní generátory, které generují jalový výkon. Jalový výkon je regulován buzením na kogenerační jednotce. U tohoto druhu je regulace jalového výkonu plynulá.

Další kompenzace je prováděna elektrostatickými kondenzátory. Tyto umožňují regulaci jalového výkonu za pomoci spínání kondenzátorových baterií, které se spínají speciálními stykači. Tento druh regulace probíhá po jednotlivých stupních.

Jednopolové schéma zapojení je na obrázku č. 43. Největší problém nastává, pokud jednotlivá zařízení jsou zapojena blízko sebe. V tomto případě jsou jednotlivá zařízení napojena do polí (elektrický rozvaděč), která jsou umístěna blízko vedle sebe. Jejich impedance je velmi malá, a proto se zařízení silně ovlivňují. Při projektování bylo předpokládáno, že vedlejší kompenzace (SLAVE) je kogenerační jednotka regulována buzením. Hlavní kompenzace (MASTER) zde představuje statický kompenzátor.

Z naměřených hodnot na obrázku 42 vyplývá, že oba druhy kompenzace se chovají buď jako MASTER anebo jako SLAVE. Kompenzovaný výkon má v jednom okamžiku kladnou hodnotu jalového výkonu, a naopak v dalším sledovaném čase zápornou hodnotu jalového výkonu.



Obr. 42 Zapojení kogeneračních jednotek s kompenzací

Pro správné fungování regulace jalového výkonu je nutno zvolit, která kompenzace bude MASTER a naopak která bude SLAVE.

Jeden z důvodů při rozhodování, který druh kompenzace bude MASTER nebo SLAVE je velikost výkonu. Pokud kogenerační jednotka bude mít větší výkon, než odebraný do místní sítě bude se chovat jako MASTER. V opačném případě jako SLAVE.

S kogeneračními jednotkami se setkáváme v různém uspořádání. Jedním z nich je bioplynová stanice, kde většina elektrické energie je dodávána do distribuční sítě. Zde pohonným zdrojem pro kogenerační jednotku je bioplyn. V tomto případě by měl být MASTER kogenerační jednotka. Ale při výpadku anebo odstavení kogenerační jednotky musí přejít do systému regulace SLAVE.

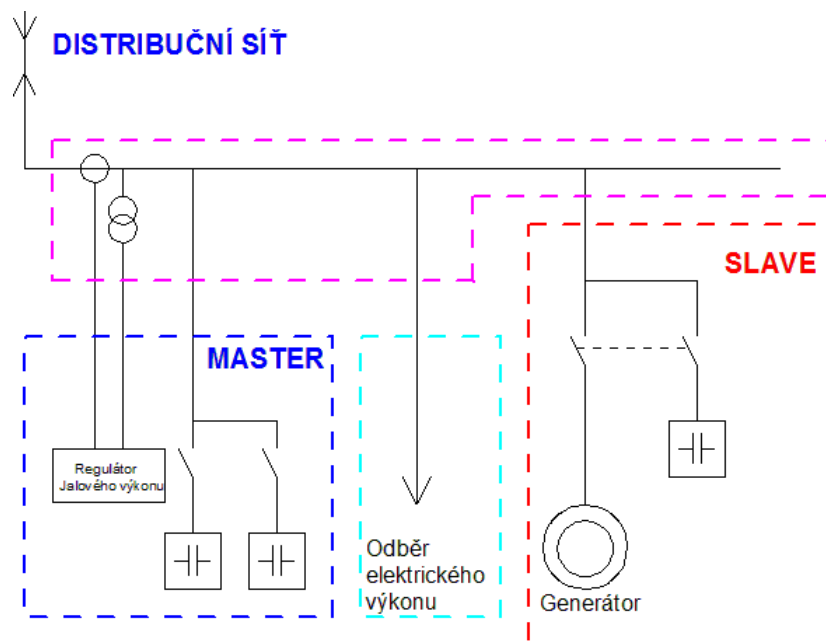
Jiným případem je, pokud kogenerační jednotku nainstalujeme do výrobního podniku. Zde je provozována především jako tepelný zdroj a elektrická energie nepatří mezi hlavní produkci. V tomto případě budeme kogenerační jednotku považovat za SLAVE regulaci.

Optimální řízení jalového výkonu může být prováděno různými metodami. Jednou z nich je s nadřazeným řídicím systémem, kdy rozdělujeme kompenzační jednotky na MASTER a SLAVE. V tomto případě je měření regulovaného výkonu nepodstatné, který z kompenzačních systémů dá následně povel pro regulaci jalového výkonu.

Další z možností regulace, je se sníženým kompenzačním výkonem, kdy účinník na výstupu z kogenerační jednotky udržujeme na hodnotě například nižší než 0,95 a do kompenzování bývá prováděno kompenzací statickými kondenzátory.

Tato metoda je svým způsobem nejjednodušší a taktéž nejlevnější. Má to i jednu nevýhodu. V tomto případě si generátor odebere jalový výkon z kondenzátorových baterií.

Tento způsob regulace se hodně využívá u malých vodních elektráren s asynchronním generátorem. Ukázka zapojení je na obrázku č. 44. Kdy kompenzační baterie bývají spínány zároveň s fázovacím vypínačem generátoru. Tak dochází k automatické kompenzaci. Kompenzační baterie musí být připojena přes speciální stykač, který má paralelně ke kontaktům připojeny rezistory. Ty zajišťují správnou funkci spínání jalového výkonu k síti. Dále je jalový výkon do kompenzován v centrální kompenzaci umístěné před obchodním měřením elektrické energie. Toto zapojení se dá využít taktéž u kogeneračních jednotek využívající asynchronní generátor.



Obr. 43 Zapojení kogeneračních jednotek s kompenzací

Jedním z problémů při rychlém spínání velkých jalových výkonů může být výpadek kogenerační jednotky. Způsobený náhlými změnami jalového výkonu.



5.2 Spouštění kogenerační jednotky v praxi

Při projektování je často velmi těžké předpokládat problémy, které mohou nastat při skutečné realizaci. A to i za použití nejmodernější výpočetní techniky. Tudiž je zapotřebí vědět co nejvíce informací k této problematice. Naměřená data jsou jedna z ukázek problematiky, které ukazují problémy spojené s řízením jalového výkonu. Při rozhodování regulace jalového výkonu je nutno rozhodnout typ kompenzačního výkonu, následně zvolit, která kompenzace se bude chovat jako MASTER a SLAVE.

Asynchronní generátory si nedokáží vyrobit jalový výkon, a proto provádíme kompenzaci těchto generátorů za pomoci kompenzačních baterií (kondenzátorů). V příloze E je schéma zapojení dvou kogeneračních jednotek s asynchronním generátorem o elektrickém výkonu 210kW, který je kompenzován kompenzačními bateriemi.

Na první straně („Přívod napájení – silová část“) je nakreslen vývod do trafostanice, na kterém je připojen elektroměr, regulátor kompenzace a měřič kvality sítě. Elektroměr (P2) je pro měření vyrobené elektrické energie (zelený bonus), který posílá impulzy do řídicího systému. Na fázi L1 je napojen měřicí transformátor (-TA4), který je napojen do regulátoru kompenzace. Pro měření kvality sítě je použit analyzátor P1 (CIRCUTOR CVM NRG96-ITF-RS485-C), který přeposílá požadované hodnoty po sběrnici RS485 (Profi Bus) do řídicího systému. Velkou výhodou komunikace je sběr velkého množství dat s velkou rychlostí.

Strana druhá obsahuje jednotlivé stupně kompenzace od nejmenšího stupně až po nejvyšší. Kompenzační stupně jsou následující: 1,5 kVAr, 3,14 kVAr, 6,25 kVAr, 12,5 kVAr a 25 kVAr. Regulační stupně jsou spínány stykači (-KM), které jsou ovládány za pomoci regulátoru kompenzace P3.

Na třetím výkresu je generátor – G1 o výkonu 210kW. Ten je napojen přes stykač – KM1 a jištění – FUG1 na vývod. Mezi jištěním a stykačem generátoru je napojen analyzátor sítě (P4) přes měřicí transformátory (-TA1.1, -TA1.2, -TA1.3). Na vývod generátoru je připojena i statická kompenzace, kterou představují kondenzátory (-C1.1, - C1.2, -C1.3, -C1.4 a -C1.5). Tato celková kompenzace se počítá na 80% potřebného jalového výkonu pro asynchronní generátor.

Čtvrtý výkres („Vývod generátoru G1 – ovládací část) představuje ovládací část generátoru a statické kompenzace. Při roztočení generátoru a následném na fázování je vyslán z automatu povel (Zapni G1), který sepne relé – KA1 a následně je sepnut stykač – KM1. Pomocí stykače je generátor připojen do sítě. Po 15 sekundách, kdy byl sepnut stykač generátoru, se spíná výstupní signál z automatu (Statická kompenzace). Sepnutím výstupu se ovládá relé (-KA1.1) a to spíná stykače (-KM1 až 3), na které jsou připojeny kompenzační baterie, které kompenzují jalový výkon na 80% viz. výše. Doregulování účinníku na požadovanou mez (0,95 až 1,00) se zajišťuje kompenzačními stupni ovládanými regulátorem P3.

Na následujících dvou výkresech je nakreslen další asynchronní generátor G2 a ovládací část. Spínání generátoru G2 je stejné jako u předchozího generátoru G1.

5.3 Spouštění asynchronních generátorů s menšími proudovými rázy

Podrobný popis spínání asynchronních generátorů do elektrické sítě je popsán v předešlé kapitole. V praxi se často setkáváme s problematickým spínáním těchto zdrojů s asynchronním generátorem. Jedno z možných řešení spínání těchto strojů se může provést za pomoci softstartéru, který nám zajistí



plynulý rozběh asynchronního generátoru. Schéma zapojení asynchronního generátoru se softstartérem je v příloze F. Na první straně výkresu je nakresleno vyvedení elektrického výkonu do sítě. Vývod je doplněn o bezpečnostní vypínač a napojení vlastní spotřeby. Na druhé straně je nakreslena řízená kompenzace. Regulátor kompenzace P1 reguluje jalový výkon za pomoci šestistupňové regulace. Jednotlivé kompenzační baterie jsou spínány v různých kombinacích s požadavkem vyregulovat co nejlépe jalový výkon. Na následující třetí straně je nakreslena síťová ochrana FK1, ve které většinou nastavujeme napěťovou ochranu v rozsahu U_{max} ($1,1 U_n$) v čase 0,1s a U_{min} ($0,85 U_n$) v čase 0,1s. Frekvenční ochrana se nastavuje v rozsahu f_{max} (51Hz) v čase 0,1s a f_{min} (49,5Hz) v čase 0,1s. Při nedosažení požadovaných parametrů bývá kogenerační jednotka (asynchronní generátor) odstavena. Na poslední straně v příloze F je nakreslen asynchronní generátor G1, který je napojen přes soft startér. Při roztočení generátoru je sepnut stykač (-KM1). Po sepnutí stykače přichází povel z automatu pro najetí soft startéru, jenž zajišťuje plynulý nájezd generátoru do sítě. Po najetí soft startéru dochází k sepnutí bypassu. Při provedení těchto úkonů je poslán signál z automatu, který spíná stykače (-KM1.2 a -KM1.1). Na tyto stykače jsou připojeny kompenzační baterie.

Tuto aplikaci můžeme využít nejen u kogeneračních jednotek, ale i u malých vodních elektráren s asynchronním generátorem.

Využitím soft startéru docílíme menších proudových rázů v síti. S tímto problémem se můžeme často setkat v praxi, pokud připojujeme například kogenerační jednotku o výkonu generátoru 11kW do sítě, což odpovídá cca 19A. Provozovatel distribuční sítě nám většinou v tomto případě povolí jistič 20A s charakteristikou B. V tomto případě je jediným možným řešením využití soft startéru.

Další výhodou soft startéru je i omezení mechanických rázů generátoru do spalovacího motoru v kogeneračních jednotkách. Naopak u vodních elektráren nebývá tak namáhána převodovka. Ze zkušeností lze také říci, že soft startér má velký vliv na životnost asynchronního generátoru.

6 Aplikace využití tepelné a elektrické energie z kogenerační jednotky

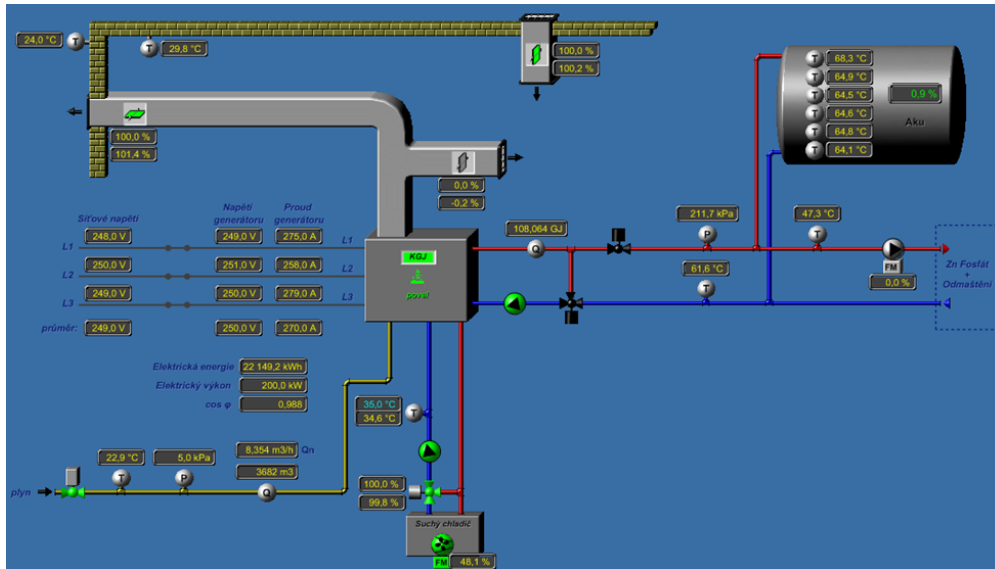
Jedno z těchto využití tepelné a elektrické energie je aplikováno ve strojírenské firmě v České republice. Zde byl nahrazen plynový kotel a plynové hořáky kogenerační jednotkou s akumulační nádrží. Tepelná a elektrická energie je vyráběna za pomoci kogenerační jednotky spalující zemní plyn. Ke KGJ je napojeno potrubí pro vyvedení teplé vody, do dané technologie a akumulační nádrže (AKU). Část tepla (1/3) je tak dodáváno přímo do technologie a část tepla (2/3) je dodávána do akumulační nádrže. Schéma technologie KGJ a akumulační nádrže je zobrazeno na obrázku 4. Technologie využívající vyrobené teplo je na obrázku 5, kde jsou zobrazeny výměňkové stanice a vyhřívané nádrže s chemickými přípravky. Podrobné popsání této technologie je v příloze B „Automation and Control of Energetic Systems Using Cogeneration Unit in Industry“.

Teplá voda hlavního topného okruhu kogenerační jednotky pracuje s tepelným spádem 85/65°C. Pro měření množství tepelné energie je namontován kolorimetr. Pro akumulaci tepelné energie byla použita akumulační nádrž o objemu 60 m³, která je tepelně zaizolovaná.

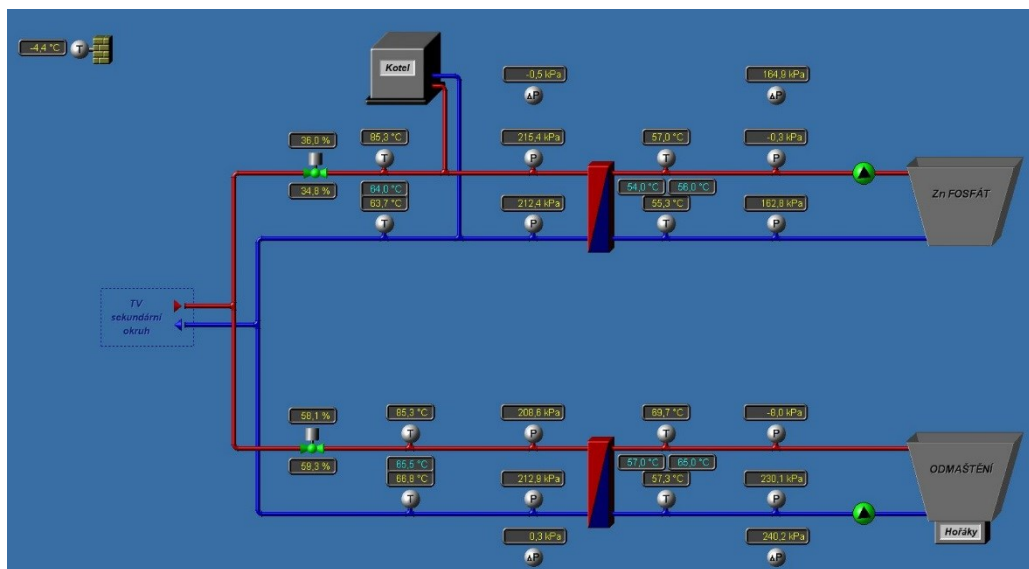
Pro dosažení většího výkonu motoru kogenerační jednotky je zde nainstalovaný turbo kompresor. Stlačený zemní plyn se chladí za pomoci uzavřeného teplovodního okruhu se suchým chladičem. V chladičím okruhu je nutno udržovat teplotní spád 38/35°C.

Při projektování bylo počítáno, že veškerá elektrická energie bude spotřebována v podniku, a nebudou žádné dodávky do sítě. Za posledního půl roku začalo docházet k proměnlivému odběru elektrické energie v podniku, kdy nastaly přetoky elektrické energie z kogenerační jednotky do sítě. Podnik má

požadovaný rezervovaný výkon 0 kW. Aby nedocházelo k přetokům elektrické energie, chce podnik zrealizovat regulaci kogenerační jednotky.



Obr. 44 Vizualizace technologie kogenerační jednotky s akumulační nádrží a jinými pomocnými zařízeními [30]



Obr. 45 Vizualizace přilehlé technologie využívající tepelnou energii [30]

6.1 Kogenerační jednotka

V tomto nasazení je provozována v tepelném režimu při 100 %. Jednotka je o výkonu 199 kW, a proto spadá do kategorie výroben s výkony nad 100 kW připojených do distribuční sítě (DS). Pro spolehlivý provoz elektrizační soustavy je nezbytné při dispečerském řízení dočasně omezit nebo odstavit dodávku činného výkonu z výroben elektrické energie. Zdroj je schopen adekvátně (rychle a přesně) reagovat na povel z dispečinku PDS k omezení činného výkonu stupňovitě v režimu 0, 50, 75 a 100 % instalovaného výkonu.

Byla použita kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263 s těmito parametry:

Tab. 4 Základní parametry jednotky Vitobloc 200 EM-199/263

max. elektrický výkon:	199 kW _e
max. tepelný výkon:	263 kW _t
výkon motoru:	210 kW
spotřeba paliva:	53 Nm ³ /hod
min. celková účinnost:	89,6 %
teplotní spád topného okruhu KGJ:	65/85°C (pro výměníky 2x100 kW)
teplotní spád okruhu kompresoru:	10/50°C (pro výměník 60 kW)
teplotní spád chlazení palivové směsi:	35/38°C
rozměry D x Š x V:	3,58x1,60x2,00 m



Obr. 46 Kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263



Obr. 47 Odkrytovaná kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263

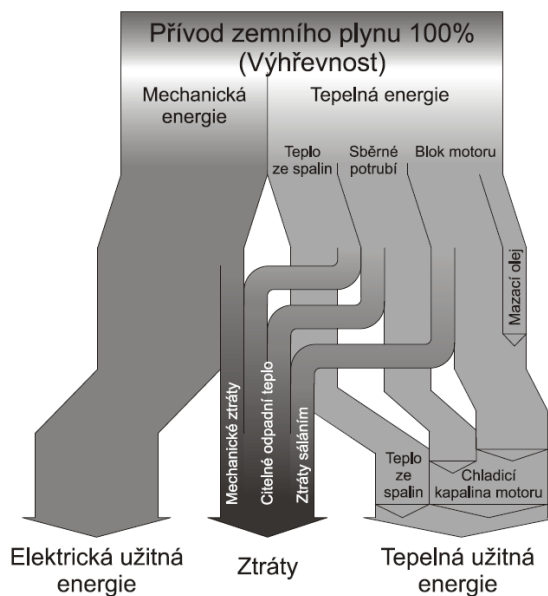
6.2 Energetická bilance kogenerační jednotky

Energetická bilance je představena grafickým znázorněním toku energií modulu KGJ na obrázku 49. Energetická bilance zobrazuje přeměnu primární energie (zemní plyn, 100 %) na elektrickou a tepelnou užitkovou energii. Ztráty, ke kterým dochází na základě přeměny této energie, jsou rovněž zobrazeny.

Užitná energie vzniká procesem spalování ve spalovacím plynovém Ottově motoru a je jeho otáčivým pohybem přeměňována v synchronním generátoru na proud.

Tepelná užitná energie, vzniká rovněž procesem spalování v plynovém Ottově motoru. Rozděluje se do tepla ve spalinách, sběrném potrubí, bloku motoru, mazacím oleji motoru a slouží k zahřívání např. topné vody.

Kompletní stupeň účinnosti modulu KGJ je výsledkem součtu elektrické a tepelné užitné energie.



Obr. 48 Energetická bilance [14]

Tab. 5 Základní parametry jednotky Vitobloc 200 EM-199/263

Chlazení směsi	externí 50 °C
Využití energie – výhřevnost	100 %
Mechanická energie	39,0 %
Tepelná energie	61,0 %
Elektrická užitná energie	37,0 %
Tepelná užitná energie	48,9 %
Ztráty	10,4 %

6.3 Akumulace tepelné energie

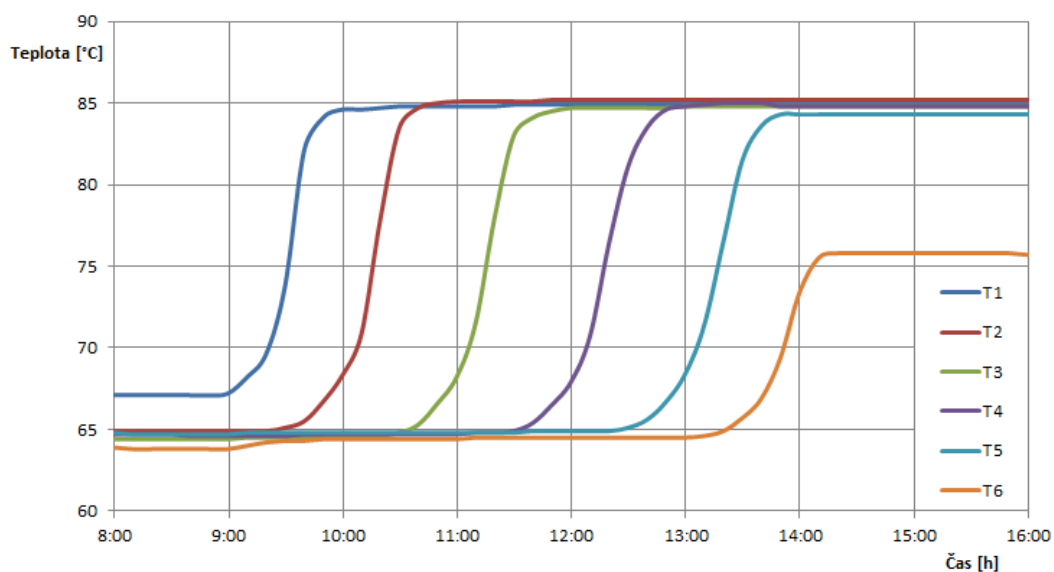
Akumulační nádrž je kruhového průřezu 3,40 m, celkové délce 7,812 m a objemu 60 m³ obrázek 50. Plášť nádrže je z oceli, s tepelnou izolací tloušťky 100 mm. Nádrž je v horní a spodní části osazena vstupy a výstupy pro vodu. Nádrž je dále osazena šesti teplotními čidly (PT1000). Teplotní spád vody je 85/65°C. Ve vnitřku nádrže jsou nátokové a výtokové žlaby, které zajišťují rovnoměrný nátok vody do nádrže. Aby nedocházelo k víření a následnému promíchávání vody v akumulační nádrži.

Teploty jsou měřeny za pomoci řídicího systému PLC (SIEMENS DESIGO), které se zaznamenávají v deseti minutových intervalech do paměti PC.

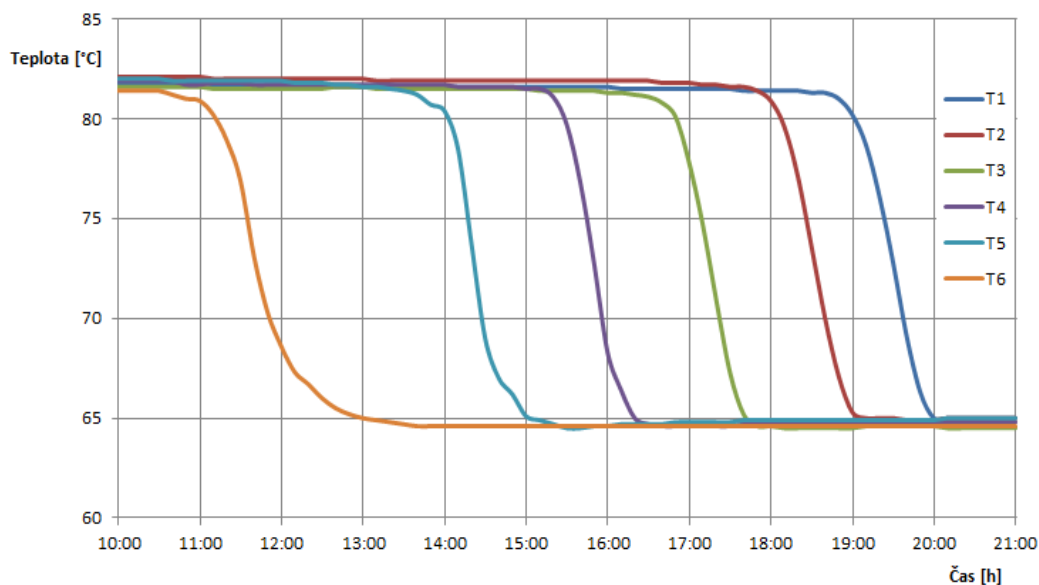
Průběh nabíjení akumulační nádrže je na grafu č.1 a vybíjení v grafu č. 2. Teplotní čidla, pomocí kterých byly zaznamenány průběhy jsou rozloženy po celé výšce akumulační nádrže. Teplotní čidlo označené T1 je umístěno nejvýše naopak nejnižší je umístěno čidlo T6. Teplotní čidla T2, T3, T4 a T5 jsou umístěna sestupně mezi čidly T1 až T6. Jednotlivá čidla teplot jsou napojena do řídicího systému.

Z obrázku číslo 51 je vidět že v 9:00 došlo k zapnutí KGJ, kdy začala narůstat teplota v nejvyšším bodě akumulační nádrže. V závislosti na čase začaly narůstat teploty jednotlivých čidel směrem ke spodu nádrže. Nejnižší položené teplotní čidlo T6 se ohřálo pouze na teplotu 76 °C, aby nedošlo k přehřátí KGJ.

Na dalším obrázku číslo 52 je naopak zaznamenaný průběh vybíjení akumulační nádrže. Nejdříve se začíná snižovat teplota na dně nádrže, kterou zaznamenává teplotní čidlo T6. Postupným odběrem tepla z nádrže začíná klesat teplota směrem ze spodu nahoru k teplotnímu čidlu T1.

Obr. 49 Akumulační nádrž 60 m³

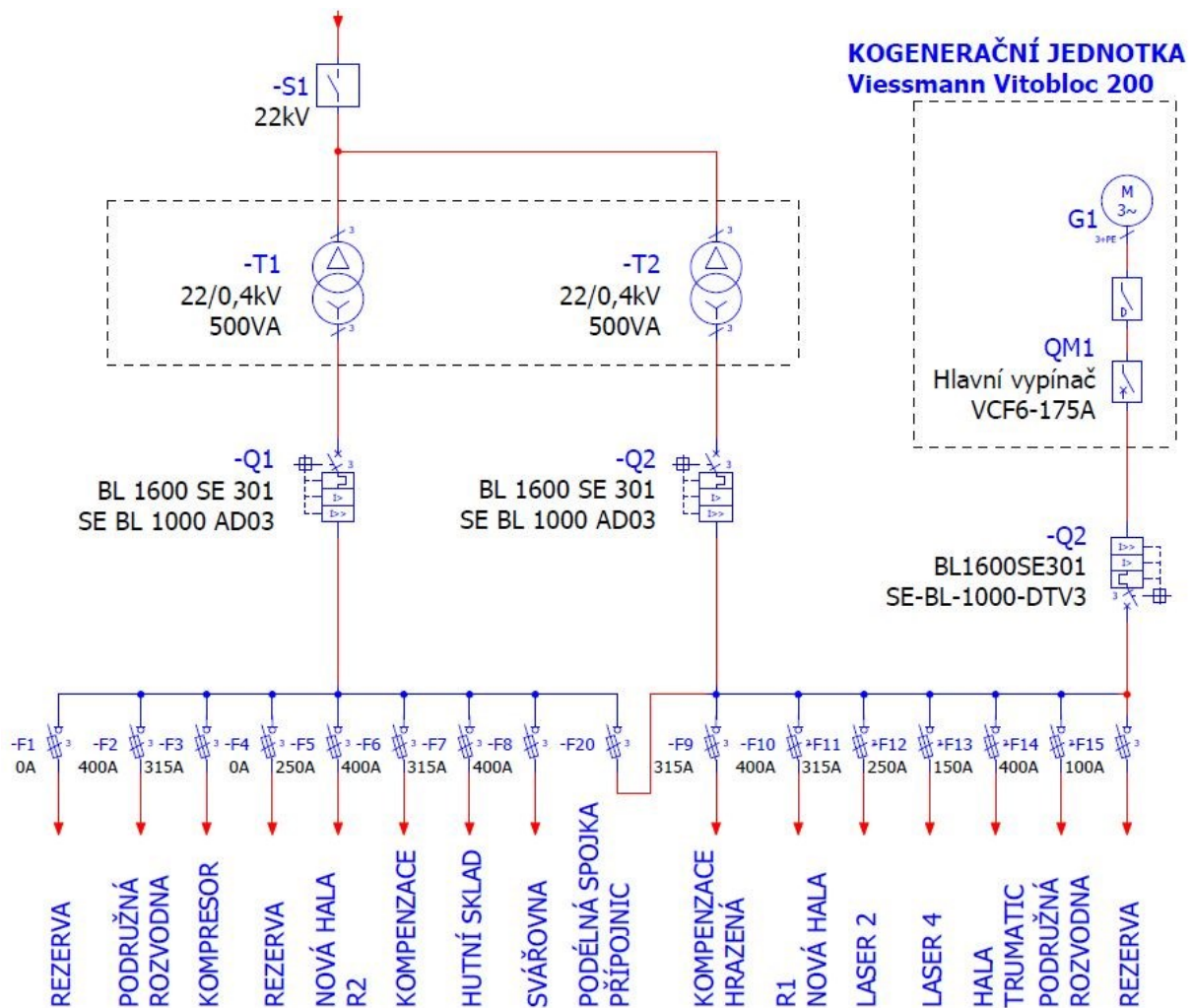
Obr. 50 Nabíjení akumulační nádrže [32]



Obr. 51 Vybíjení akumulační nádrže [32]

6.4 Připojení kogenerační jednotky do sítě

Schéma zapojení kogenerační jednotky do elektrické sítě je na obrázku 53. Podnik je napájen z distribuční sítě 22 kV, přes dva transformátory T1 a T2. Každý z nich má výkon 500 kVA. Tyto transformátory mohou pracovat paralelně nebo odděleně. V současné době pracují odděleně, pro jejich paralelní spolupráci se využívá podélný pojistkový odpínač „F20“. Transformátory pracují odděleně zejména z důvodu napájení laserů, které mají velmi proměnlivý odběr a způsobují kolísání napětí v síti. Z tohoto důvodu mají v podniku dva druhy sítě „špinavá“ a „čistá“. Čistá síť je napájena z transformátoru T1, na který je připojeno osvětlení, kanceláře a jiné spotřebiče závislé na kvalitě napětí. Na špinavou síť (transformátor T2) jsou napojeny lasery, svařovací centra a kogenerační jednotka.



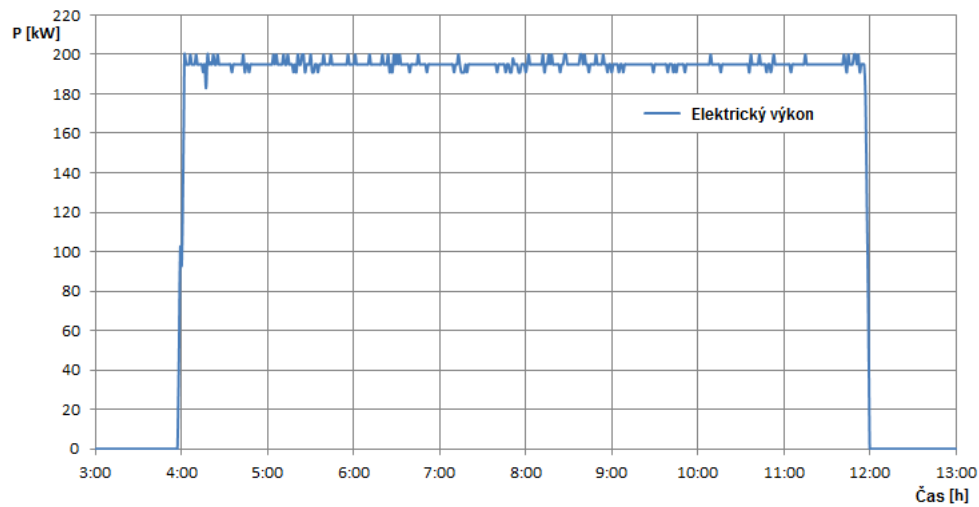
Obr. 52 Jednopolové zapojení kogenerační jednotky do místní elektrické sítě

6.5 Měření na kogenerační jednotce

V blokové tepelné elektrárně je nainstalováno zařízení Vitobloc Gateway, které poskytuje po sběrnici RS 485 komunikaci s řídicím PLC, kde jsou zaznamenávány hodnoty. Tyto základní parametry elektrických veličin jsou zaznamenávány v minutových intervalech.

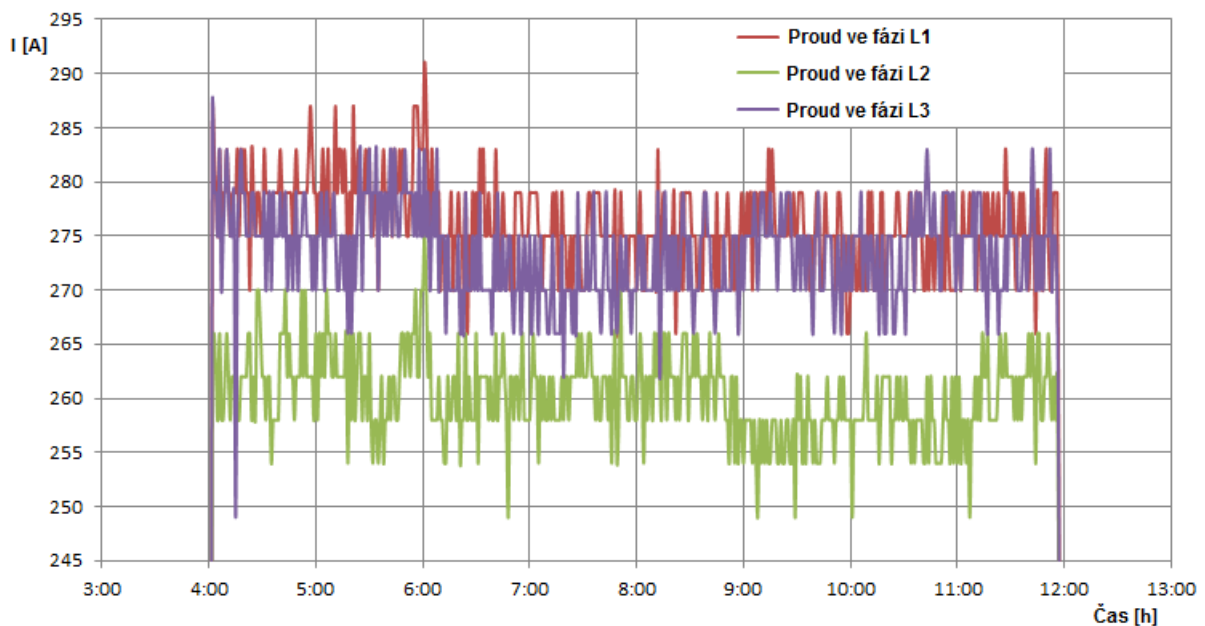
Získaná data jsou ze dne 2.7.2014, kdy povel k sepnutí KGJ byl ve 4:00 a vypnutí ve 12:00.

U průběhu elektrického výkonu na obrázku 54 je možno pozorovat v první polovině doby provozu časté „prokmity“. V druhé polovině doby provozu už nejsou zaznamenávány takové prokmity, které vznikají při každém startu KGJ a trvají tak dlouho, než se ustálí stroj. Před koncem vypnutí KGJ od 11:40 je možné pozorovat významnou nestálost výkonu. To je způsobeno zvýšením teploty vody v hlavním topném okruhu. Vratná voda narostla z důvodu nabití akumulační nádrže. Při náhlé změně vstupní teploty se musely přenastavit vnitřní parametry KGJ, což se projevilo v nestálosti vyráběného elektrického výkonu.



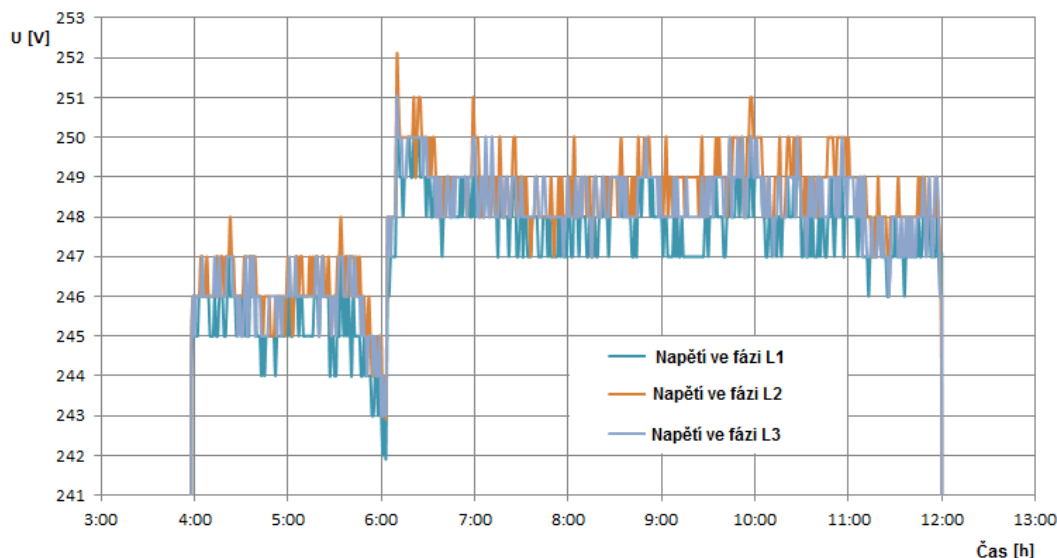
Obr. 53 Průběh elektrického výkonu z KGJ při provozu

Na obrázku č. 55 jsou zobrazeny průběhy proudu z generátoru v jednotlivých fázích, u kterých je možno pozorovat proudovou nesymetrii, a to především ve fázi L2.



Obr. 54 Průběh elektrického proudu z KGJ při provozu

Z měření napětí na KGJ je možné pozorovat napěťové výkyvy, které jsou způsobeny charakterem zatížení sítě. Do sítě jsou zapojeny lasery na kov, které se vyznačují nestálostí odběru (obrázek 56).



Obr. 55 Průběh elektrického napětí z KGJ při provozu

6.6 Regulace kogenerační jednotky

Způsobů regulace kogenerační jednotky může být velké množství. Jedním z nich je plynulá regulace, která se používá nejčastěji. Mezi další způsoby regulace patří skoková, u které provádíme regulaci po jednotlivých krocích (například 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% jmenovitého výkonu). U kogeneračních jednotek je nutno dodržet regulaci výkonu mezi 50 až 100% jmenovitého výkonu. Pod 50% jmenovitého výkonu má jednotka velmi špatnou účinnost. Nejlepší způsob provozu jednotky je při maximálním (100%) výkonu, ve kterém má největší podíl vyrobená elektřina k tepelné energii. Při projektování jednotek z pohledu regulace elektrického výkonu je lepší navrhnout více jednotek. Ty by se spouštěly postupně podle požadovaného výkonu a regulovaly by se v oblasti jmenovitého výkonu. V našem případě bude jednotka provozována při jmenovitém výkonu.

7 Model kogenerační jednotky

7.1 Analýza tepelného výkonu pro návrh kogenerační jednotky s pístovým motorem

Při nasazování kogeneračních jednotek do jakékoliv technologie je zapotřebí mít informace o požadované spotřebě tepla nebo elektrické energie.

Nejčastější způsob nasazování kogeneračních jednotek do technologie je na základě spotřeby tepelné energie. Pro modelaci kogeneračních jednotek do tepelného režimu jsem vytvořil program v Microsoft Excel pod názvem „Modelace kogeneračních jednotek do tepelného režimu“.

Cílem programu je vytvoření diagramu hodinových spotřeb pro danou technologii, do kterého implementujeme různé velikosti a množství kogeneračních jednotek. Program dokáže namodelovat každou jednotku s požadovaným rozsahem regulace. U kogeneračních jednotek se většinou volí

tepelný rozsah regulace v rozmezí 100% až 60% jmenovitého tepelného výkonu, to odpovídá 100% až 50% jmenovitému elektrickému výkonu.

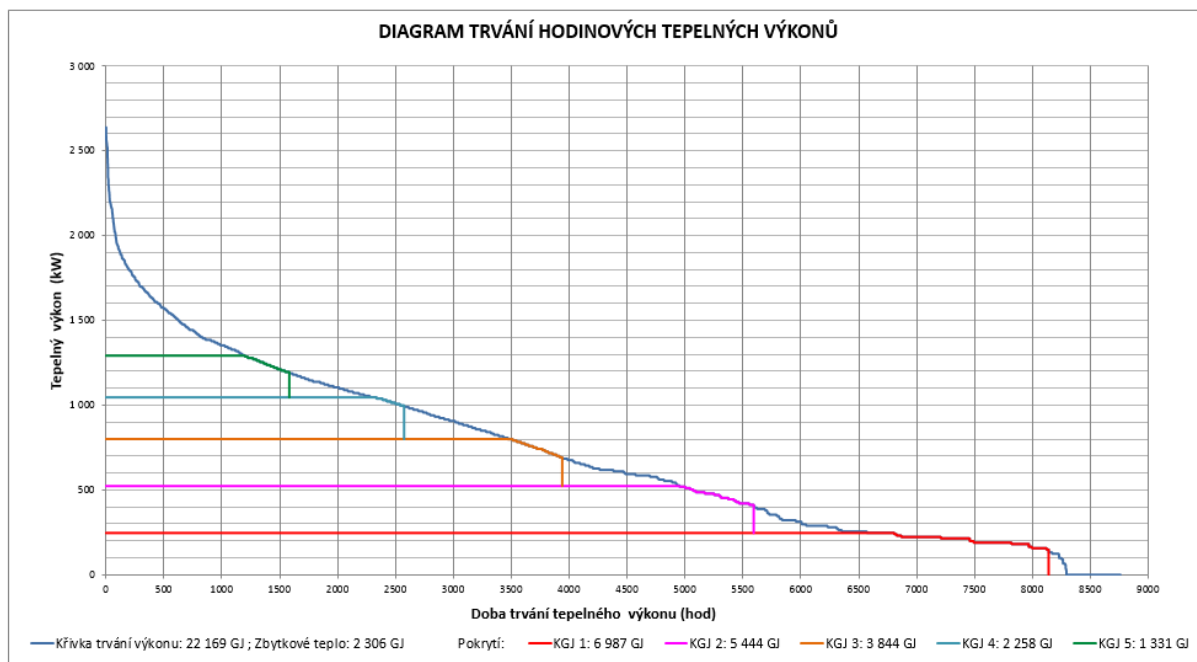
Prvním požadavkem pro modelování tepelného diagramu je zapotřebí mít hodinové spotřeby tepla za rok. Získané hodnoty spotřeby tepla v GJ se vkládají do políčka K14. Většinou se kogenerační jednotky nasazují do technologií, jako náhrada za plynové kotle. V praxi získáme nejčastěji hodinové spotřeby plynu, než množství vyrobeného tepla. V tomto řešení vkládáme hodinové spotřeby za rok do buňky H141 v (m³). Pro přepočítání spotřebovaného plynu na vyrobené teplo je nutné zadat do programu s jakou účinností vyrábíme teplo. U plynových kotlů se účinnost pohybuje kolem hodnoty 90%. Po zadání těchto údajů se nám vykreslí průběh tepelného výkonu za celý rok. Do tohoto digramu můžeme namodelovat až pět různých typů kogeneračních jednotek.

Jednotlivé parametry kogeneračních jednotek volíme do tabulky, která je na obrázku 56. Seznamy možných typů kogeneračních jednotek pro implementování jsou v záložce v programu „Vstupní_Data“. Do tabulky zadáváme tepelný výkon v kWt a elektrický výkon v kWe. Regulační rozsah se nastavuje od 100% do 60% jmenovitého výkonu. Do tepelného režimu můžeme namodelovat až pět kogeneračních jednotek.

Volba kogenerační jednotky			
Typ KGJ			
	Tepelný výkon	Elektrický výkon	Regulace (100% - 60%)
KGJ1	246	200	60.0%
KGJ2	277	235	60.0%
KGJ3	277	235	60.0%
KGJ4	246	200	60.0%
KGJ5	246	200	60.0%

Obr. 56 Volba velikosti kogenerační jednotky a regulační rozsah

Jedním z výsledků a vizuální kontroly je graf tepelných výkonů (obrázek 57), kde jsou vidět modely jednotlivých kogeneračních jednotek. V grafu je vykreslena křivka trvání tepelného výkonu množství tepla v KGJ (zobrazeno v legendě grafu). Množství vyrobeného tepla z kogeneračních jednotek je ukázáno v legendě. Nepokryté množství tepla z kogeneračních jednotek je zobrazeno jako zbytkové teplo. Tato část bývá nejčastěji pokryta za pomoci plynových kotlů, které se mohou regulovat od 0% do 100% jmenovitého výkonu. Nejlepší aplikací na vykrytí potřebného tepla je použitím akumulační nádrže. Využití tohoto řešení je popsáno v kapitole „Aplikace využití tepelné a elektrické energie“. Při návrhu kogeneračních jednotek je důležité si přezkoumat i denní spotřeby tepla, které mohou vykazovat výrazné špičky v odběru tepla. Pro tento případ je lepší navrhnout větší akumulační nádobu, než zapínat jednotky v krátkém časovém úseku s cílem vykrytí špičkových odběrů.



Obr. 57 Diagram trvání hodinových tepelných výkonů

Výsledná tabulka z modelování je zobrazena v obrázku 58. Ve sloupcích tabulky jsou zobrazeny výsledky jednotlivých kogeneračních jednotek. Jedním z důležitých parametrů jsou provozní hodiny z jednotek, které potřebujeme vědět z pohledu zelených bonusů. Jednotlivé sazby zelených bonusů pro rok 2018 jsou zobrazeny v záložce „Vstupní_Data“.

Z pohledu investora jsou nejdůležitější informace o množství vyrobeného tepla a elektřiny, která spadá pod zelený bonus. Tabulka obsahuje i další důležité informace pro projektanty, provozovatele, investory atd.

Výroba tepla celkem	22 169.4 GJ				
	KGJ 1	KGJ 2	KGJ 3	KGJ 4	KGJ 5
Elektrický výkon Pej	200.0 kW _e	235.0 kW _e	235.0 kW _e	200.0 kW _e	200.0 kW _e
Tepelný výkon Ptj	246.0 kW _t	277.0 kW _t	277.0 kW _t	246.0 kW _t	246.0 kW _t
Provozních hodin při Ptj	6 807 h	4 951 h	3 470 h	2 336 h	1 200 h
Provozních dnů při Ptj	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d
Provozních hodin při Pt _{bio,ek}	1 333 h	642 h	470 h	239 h	384 h
Provozních dnů při Pt _{bio,ek}	0 d	0 d	0 d	0 d	0 d
Provozních hodin celkem	8 140 h	5 593 h	3 940 h	2 575 h	1 584 h
Provozních dnů celkem	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d
Výroba tepla při Ptj	6 028.3 GJ	4 937.1 GJ	3 460.3 GJ	2 068.8 GJ	1 062.7 GJ
Výroba tepla při Pt _{bio,ek}	959.0 GJ	506.8 GJ	383.4 GJ	188.8 GJ	288.3 GJ
Pt _{bio,ek} přímě	199.8 kW _t	219.3 kW _t	228.6 kW _t	219.4 kW _t	194.1 kW _t
Výroba tepla z pokrývajících zdrojů celkem	6 987.2 GJ	5 443.9 GJ	3 843.7 GJ	2 257.5 GJ	1 331.0 GJ
Výroba tepla k pokrytí zbytků diagramu					
Výroba EE na KGJ při Pej	1 391.4 MWh	1 163.5 MWh	815.5 MWh	467.2 MWh	0.0 MWh
Výroba EE na KGJ při Pezbytek	363.9 MWh	286.7 MWh	197.4 MWh	58.2 MWh	0.0 MWh
P _{bio,ek} přímě	273.0 kW _e	446.5 kW _e	420.1 kW _e	243.5 kW _e	0.0 kW _e
Výroba EE na KGJ celkem	1 725.3 MWh	1 450.2 MWh	1 012.9 MWh	525.4 MWh	0.0 MWh
BETA _e	0.471	0.490	0.487	0.456	0.000
BETA _q	0.529	0.510	0.513	0.544	0.000
V _{SE} EE na KGJ	51.8 MWh	43.5 MWh	30.4 MWh	15.8 MWh	0.0 MWh
V _{SEE} el	24.4 MWh	21.3 MWh	14.8 MWh	7.2 MWh	0.0 MWh
V _{SEE} t	27.4 MWh	22.2 MWh	15.6 MWh	8.6 MWh	0.0 MWh
EE spadající pod zelený bonus	1 700.9 MWh	1 428.9 MWh	998.1 MWh	518.2 MWh	0.0 MWh
Dodávka EE z KGJ fakturovaná	1 673.5 MWh	1 406.7 MWh	982.5 MWh	509.6 MWh	0.0 MWh
CELKEM					
					1 070.0 kW _e
					1 292.0 kW _t
					18 764 h
					3 068 h
					21 832 h
					17 657.2 GJ
					2 306.3 GJ
					1 059.2 kW _t
					19 853.4 GJ
					2 306.0 GJ
					3 807.5 MWh
					906.2 MWh
					1 383.1 kW _e
					4 713.7 MWh
					0.000
					0.000
					141.4 MWh
					67.6 MWh
					73.8 MWh
					4 646.1 MWh
					4 572.3 MWh

Obr. 58 Výsledná tabulka s implementovanými kogeneračními jednotkami



7.2 Modelování kogenerační jednotky

Při každém návrhu kogenerační jednotky pro možnost aplikování do technologie je zapotřebí provést energetickou bilanci a rozhodnout, zda kogenerační jednotka bude vyhovovat provozním požadavkům dané technologii. V předešlé kapitole byl popsán program na implementování kogeneračních jednotek do technologie s ročními spotřebami tepla.

Pro namodelování energetické bilance byl vytvořen program v programu Microsoft Excel. Tento program je rozdělen na dvě části. První část počítá energetickou bilanci kogenerační jednotky. Druhá část vyhodnocuje kogenerační jednotku z ekonomického hlediska.

7.2.1 Energetická bilance kogenerační jednotky

Výpočetní program je součástí přílohy dizertační práce pod názvem „Model kogenerační jednotky“. V první záložce programu „Nastavení“ se vkládají vstupní data pro kogenerační jednotku. Nejčastěji je volíme z typových listů výrobce kogenerační jednotky. Základními informacemi pro modelaci kogenerační jednotky jsou následující parametry:

- výkon motoru,
- účinnost generátoru,
- elektrický výkon,
- tepelný výkon,
- spotřeba paliva,
- účinnost tepelná, elektrická a celková.

Tyto parametry kogenerační jednotky se zadávají do programu pro 100%, 75% a 50% jmenovitého elektrického výkonu. Každý výrobce kogeneračních jednotek udává parametry kogeneračních jednotek při provozu ve 100%, 75% a 50% jmenovitého elektrického výkonu. Zadávací tabulka je zobrazena na obrázku 59. Pro názornou ukázkou modelování byla zvolena kogenerační jednotka o elektrickém výkonu 140kWe a tepelném výkonu 207kWt (140kWe/207kWt), která může být provozovaná 24 hodin za den, ale nesmí překročit 3 000 hodin za rok z důvodu získání zelených bonusů.



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

ENERGETICKÉ BILANCE		100% el.výkonu	75% el.výkonu	50% el.výkonu
ELEKTRICKÝ VÝKON	eKW	140	105	70
VÝKON MOTORU	bKW	148	111	74
ÚČINNOST GENERÁTORU	%	94.9%	95.0%	94.5%
ELEKTRICKÁ ÚČINNOST KGJ	%	36.5%	33.8%	30.8%
ELEKTRICKÁ ÚČINNOST KGJ	%	36.5%	33.8%	30.8%
ÚČINNOST MOTORU	%			
TEPELNÁ ÚČINNOST KGJ	%	53.9%	55.0%	57.3%
CELKOVÁ ÚČINNOST KGJ	%	90.4%	88.8%	88.1%
PŘÍKON V PALIVU MOTORU	kW	384	310	227
ODVOD TEPLA VODNÍM PLÁŠTĚM (JW)	kW	128		
SÁLAVÉ TEPLA Z MOTORU	kW	17		
SÁLAVÉ TEPLA Z GENERÁTORU	kW			
SÁLAVÉ TEPLA Z MOTORU A GENERÁTORU	kW	17	0	0
ODVOD TEPLA MAZACÍM OLEJEM (OC)	kW			
ODVOD TEPLA SPALINAMI (OCHLAZENÍ NA 25°C)	kW			
ODVOD TEPLA SPALINAMI (OCHLAZENÍ NA 120°C)	kW	79	171	130
ODVOD TEPLA 1. STUPNĚM MEZICHLADIČE (1AC)	kW			
ODVOD TEPLA 2. STUPNĚM MEZICHLADIČE (2AC)	kW	16		
TEPELNÝ VÝKON KGJ	kW	207	171	130
SPOTŘEBA PALIVA MOTORU	MJ/ekW-hr	9.37	10.10	11.03
SPOTŘEBA PALIVA MOTORU	MJ/bkW-hr	3 MJ/h	3 MJ/h	3 MJ/h
INSTALOVANÝ PŘÍKON VLASTNÍ SPOTŘEBY EE (kW)	kW	2.7		

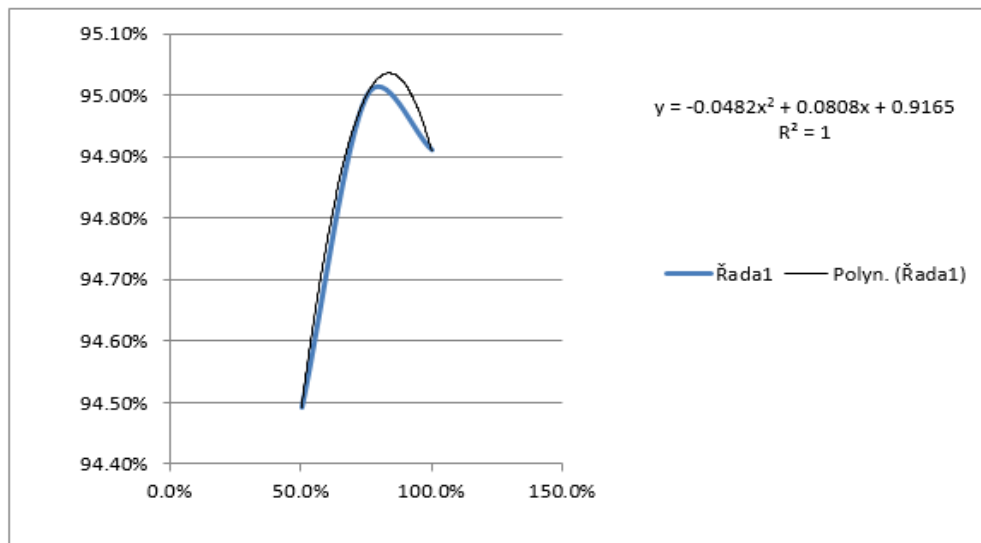
Obr. 59 Zadávání vstupních parametrů kogenerační jednotky „záložka Nastavení“

Výsledné hodnoty energetické bilance pro zadaný typ kogenerační jednotky jsou v záložce „Model KGJ“.

Ze zadaných parametrů jsem namodelovala polynomicke rovnici 2. stupně, ze které lze pak vyčíslit jakékoli provozní parametry kogeneračních jednotek v rozsahu zatížení 100 % až 50 %.

Z funkční závislosti účinnosti generátoru na zatížení v procentech jsem vytvořil polynomicke rovnici (1) pro výpočet účinnosti generátoru pro rozsah zatížení 100 % až 50 %. Pro kogenerační jednotku 140kWe/207kWt má rovnice tvar zobrazený na obrázku 60.

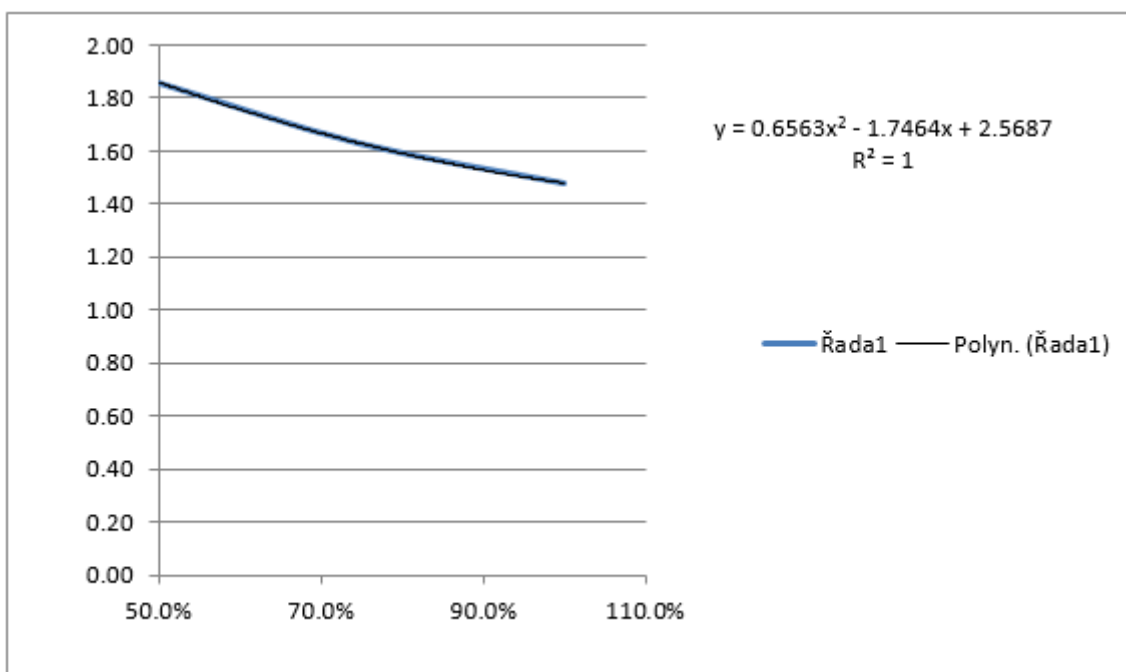
$$-0,048X^2 + 0,0808X + 0,9165 = Y \quad (1)$$



Obr. 60 Závislost účinnosti generátoru na zatížení KGJ a polynomičká rovnice

Dále se získá funkční závislost poměru tepelného a elektrického výkonu, pomocí které vytvoříme funkční závislost na zatížení kogenerační jednotky, a to v procentech. Výsledkem je polynomičká rovnice 2. stupně (1). Z takto stanovené hodnoty v rozsahu zatížení 100 % až 50 % stanovíme tepelný výkon KGJ při známém elektrickém výkonu a naopak. Pro konkrétní kogenerační jednotku 140kWe/207kWt má rovnice tvar uváděný na obrázku 61.

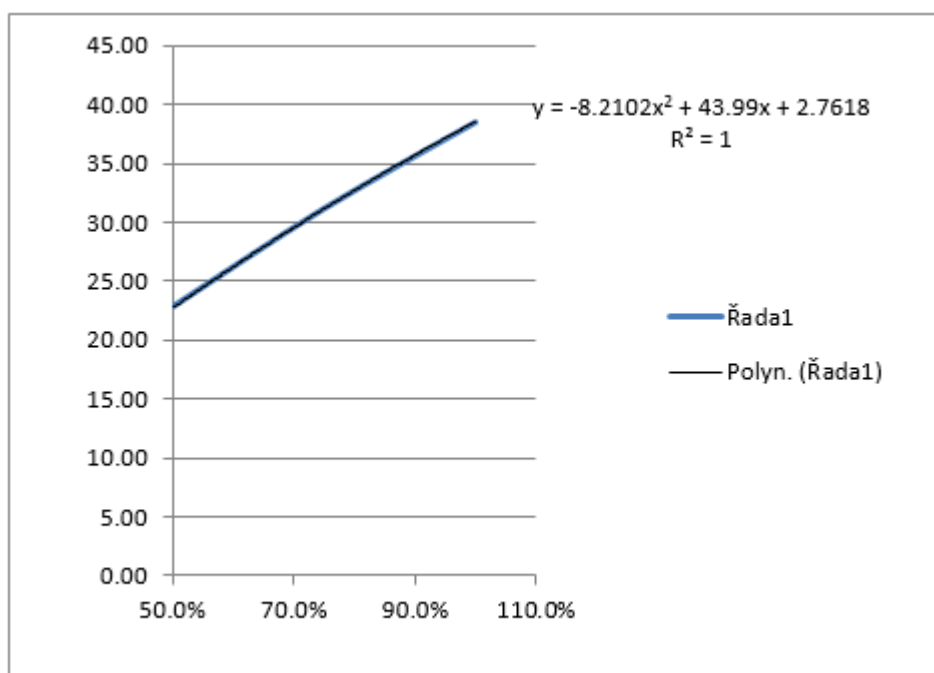
$$0,6563 X^2 - 1,7464 X + 2,5687 = Y \quad (2)$$



Obr. 61 Závislost poměru výkonu PT/PE na zatížení KGJ a polynomičká rovnice

Z funkční závislosti spotřeby paliva na zatížení kogenerační jednotky v procentech vytvoříme polynomickou rovnici 2. stupně (1). Spotřeba paliva se uvažuje při normálních podmínkách, tj. při teplotě 0 °C a tlaku 101 325 Pa nebo při obchodních podmínkách, to je při teplotě 15 °C a tlaku 101 325 Pa vše v rozsahu zatížení KGJ od 100 % do 50 % [31]. Takto stanovená spotřeba zemního plynu v [Nm³/h, nebo m³/h] pro libovolné provozní zatížení KGJ 140kWe/207kWt má tvar rovnice uváděný na obrázku 62.

$$-8,210 X^2 + 43,99 X + 2,761 = Y \quad (3)$$



Obr. 62 Závislost spotřeby paliva na zatížení KGJ a polynomická rovnice

S růstem nadmořské výšky neboli jinak řečeno s poklesem atmosférického tlaku, se snižuje točivý moment a výkon spalovacího motoru [35]. Je to z toho důvodu, že energetický zisk z jednoho pracovního zdvihu pístu odpovídá energii získané hořením náplně válce. Energie náplně válce je limitována množstvím kyslíku, který se do válce při sacím zdvihu dostane [36]. Pro stanovení tlaku vzduchu v závislosti na nadmořské výšce jsem použil vztah (1).

$$P = 101325 * (1 - 2,25577 * 10^{-5} * H)^{5,2558} \quad (4)$$

kde: P – tlak v dané nadmořské výšce (Pa),
 H – nadmořská výška (m).

V obrázku 63 jsou vypočteny vlivy nadmořské výšky a teploty nasávaného vzduchu na výkon motoru bez turbokompresoru. Výsledná hodnota je přepočtená na koeficient snížení výkonu motoru. V obrázku 64 jsou uvedeny hodnoty pro motor s turbokompresorem.

Při porovnání hodnot bez turbokompresoru a s turbokompresorem je vidět, že koeficient výkonu motoru je vyšší než u motoru s turbokompresorem.

Nadmořská výška	Teplota nasávané ho vzduchu		
	25°C	35°C	45°C
0 m	1.000	0.950	0.900
100 m	0.990	0.940	0.890
200 m	0.980	0.930	0.880
300 m	0.970	0.920	0.870
400 m	0.960	0.910	0.860
500 m	0.950	0.900	0.850
600 m	0.940	0.890	0.840
700 m	0.930	0.880	0.830
800 m	0.920	0.870	0.820
900 m	0.910	0.860	0.810
1000 m	0.900	0.850	0.800
1100 m	0.890	0.840	0.790
1200 m	0.880	0.830	0.780
1300 m	0.870	0.820	0.770
1400 m	0.860	0.810	0.760
1500m	0.850	0.800	0.750

Obr. 63 Vliv nadmořské výšky a teploty nasávaného vzduchu na výkon motoru bez turbodmychadla (Koeficient snížení výkonu motoru)

Nadmořská výška	Teplota nasávané ho vzduchu		
	25°C	35°C	45°C
0 m	1.000	0.950	0.900
100 m	0.992	0.942	0.892
200 m	0.984	0.934	0.884
300 m	0.976	0.926	0.876
400 m	0.968	0.918	0.868
500 m	0.960	0.910	0.860
600 m	0.952	0.902	0.852
700 m	0.944	0.894	0.844
800 m	0.936	0.886	0.836
900 m	0.928	0.878	0.828
1000 m	0.920	0.870	0.820
1100 m	0.912	0.862	0.812
1200 m	0.904	0.854	0.804
1300 m	0.896	0.846	0.796
1400 m	0.888	0.838	0.788
1500m	0.880	0.830	0.780

Obr. 64 Vliv nadmořské výšky a teploty nasávaného vzduchu na výkon motoru s turbodmychadlem (Koeficient snížení výkonu motoru)



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

VLIV NADMOŘSKÉ VÝŠKY NA VÝKON MOTORU		
NÁZEV OBECE PRO UMÍSTĚNÍ KGJ		Hlučín
NADMOŘSKÁ VÝŠKA PRO UMÍSTĚNÍ KGJ		241 m
TEPLOTA NASÁVANÉHO VZDUCHU (°C)		25.0 °C
TURBODMYCHADLO (a/n)		n
TLAK VZDUCHU V NADMOŘSKÉ VÝŠCE		98 463 Pa
Korekční koeficient změny výkonu motoru	97.6%	0.976

Obr. 65 Zadávací tabulka v programu pro vliv nadmořské výšky na výkon motoru

Výsledné hodnoty modelu kogenerační jednotky jsou zobrazeny formou bilanční grafiky. V modelu jsou zachyceny vstupy, mezi které patří spalované palivo a vstupní topná voda. Naopak výstupem z kogenerační jednotky je výstupní topná voda a vyrobená elektrická energie. Ukázka modelu je zobrazena na obrázku 66.



Legenda k Modelu kogenerační jednotky na obrázku 66:

P_m – výkon motoru na hřídeli [kW],

ETA_g – účinnost generátoru [%],

P_E – elektrický výkon KGJ [kW],

P_T/P_E – poměr tepelného a elektrického výkonu KGJ[-],

P_T – tepelný výkon KGJ [kW],

P_C – celkový výkon KGJ [kW],

E_{vyr} – elektrická energie vyrobená za rok [MWh],

Q_{vyr} – teplo vyrobené za rok [GJ],

Q_{v1} – tepelný výkon ve vodě zákaznického okruhu na vstupu do KGJ [GJ/h, MW],

Q_{v2} – tepelný výkon ve vodě zákaznického okruhu na vstupu z KGJ [GJ/h, MW],

Q_i – výhřevnost ZP [MJ/m³],

SP_T – spalné teplo ZP [kWh/m³],

SP_{ZP} – spotřeba ZP při normálních podmínkách tj. při 0°C, 101 325 Pa [Nm³/h],

$SP_{ZP OP}$ – Spotřeba ZP, obchodní podmínky tj. při 15°C, 101 325 Pa [m³/h],

VS_{Epr} – vlastní spotřeba elektrické energie KGJ (provozní příkon), procentní podíl z vyrobené elektrické energie [kW, %],

P_{pal} – příkon v palivu [kW],

$P\check{R}_M$ – příkon KGJ (motoru) [MJ/h],

M_{pal1} – hodinová spotřeba paliva [GJ/h],

M_{pal2} – hodinová spotřeba paliva při obchodních podmínkách [m³/h],

M_{pal3} – hodinová spotřeba paliva vztažená k výhřevnosti [kWh],

M_{palr1} – roční spotřeba paliva [GJ/h],

M_{palr2} – roční spotřeba paliva při obchodních podmínkách [m³/h],

M_{palr3} – roční spotřeba paliva vztažená k výhřevnosti [kWh],

S_{pal_mp} – měrná spotřeba tepla v palivu na výrobu 1 kWh mechanické práce [MJ/kWh],

S_{pal_ec} – měrná spotřeba tepla v palivu na výrobu 1 kWh elektrická energie [MJ/kWh],

S_{pal_t} – měrná spotřeba tepla v palivu na výrobu 1 kWh tepla [MJ/kWh],

ETA_E – elektrická účinnost KGJ [%],

ETA_T – tepelná účinnost KGJ [%],

ETA_C – celková účinnost KGJ [%].

Základní vztahy pro bilancování KGJ jsou následující:

Výkony

Výkon mechanický:

$$P_m = \frac{P_E}{\eta_g}, [kW, kW, \%] \quad (5)$$

Výkon elektrický:

$$P_E = P_m * \eta_g [kW, kW, \%] \quad (6)$$



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Výkon tepelný:

$$P_T = P_E * \frac{P_T}{P_E}, [kW, kW, kW, kW] \quad (6)$$

Výroby:

$$E_{VYR} = P_E * \text{provozní hodiny}, [kWh, kW, h] \quad (7)$$

$$Q_{VYR} = \frac{P_T}{1000} * 3,6 * \text{provozní hodiny}, [GJ, kW, -, -, h] \quad (8)$$

Příkony:

$$P\check{R}M = SPZP OP * Q_i, \left[\frac{MJ}{h}, m^3, \frac{MJ}{m^3} \right] \quad (9)$$

Měrná spotřeba paliva:

$$Spal_{mp} = \frac{P\check{R}_M}{P_C}, \left[\frac{MJ}{kWh}, \frac{MJ}{h}, kW \right] \quad (10)$$

$$Spal_{ee} = \frac{P\check{R}_M}{P_E}, \left[\frac{MJ}{kWh}, \frac{MJ}{h}, kW \right] \quad (11)$$

$$Spal_t = \frac{P\check{R}_M}{P_T}, \left[\frac{MJ}{kWh}, \frac{MJ}{h}, kW \right] \quad (12)$$



Účinnosti:

Účinnost elektrická

$$ETA_E = 3,6 * \frac{\eta_g}{Spal_{mp}} * 100, \left[\%, -, \%, \frac{MJ}{kWh}, - \right] \quad (13)$$

Účinnost tepelná

$$ETA_T = 3,6 * \eta_g * \frac{P_T}{P_E * Spal_{mp}} * 100, \left[\%, -, \%, kW, kW, \frac{MJ}{kWh}, - \right] \quad (14)$$

Účinnost celková

$$ETA_C = 3,6 * \eta_g * \frac{\frac{P_T}{P_E} + 1}{Spal_{mp}} * 100, \left[\%, -, \%, kW, kW, \frac{MJ}{kWh}, - \right] \quad (15)$$

7.3 Ekonomické zhodnocení

Modelací kogenerační jednotky jsem získal informace o spotřebě paliva, vyrobeného tepla, vyrobené elektrické energie a jiných důležitých parametřů. Tyto informace nejsou z pohledu proveditelnosti projektu s kogenerační jednotkou postačující. Výsledné parametry z modelu vstupují do ekonomické části „Ekonomika“.

Pro ekonomické zhodnocení jsou zapotřebí následující parametry:

- výše investice (cena KGJ),
- doba odepisování,
- prodejní cena tepla,
- ztráty v tepelných sítích,
- výkupní cena elektřiny (sazba zeleného bonusu),
- cena paliva,
- servis KGJ,
- energetický management,
- nájem za pronajatý majetek,
- režijní náklady,
- personální náklady,
- jiné finanční náklady,

Pod pojmem „Vstupní informace“ je myšlena kupní cena kogenerační jednotky s pomocnými perifériemi, jako jsou napojení na topný okruh, tlumič hluku, vyvedení elektrického výkonu, vzduchotechnika, napojení paliva a MaR (měření a regulace). Další důležitou vstupní informací je

„Doba odepisování“ investice, která se nejčastěji se volí na 10 let. Prodejní cena tepla patří mezi základní zdroje z pohledu příjmů. Většinou se tato hodnota pohybuje kolem 600 Kč/kJ. Ztráta v tepelných sítích se zadává v procentech, a myslí se tím kolik tepla se ztratí v potrubí při přenosu tepla. Mezi další položky z pohledu příjmů patří výkupní cena elektřiny, která je taktéž udávána jako zelený bonus. Zelenými bonusy za rok 2018 jsou zobrazeny na obrázku 67. Cena paliva zemního plynu je různá, ale nejčastěji se pohybuje od 200Kč/GJ do 250Kč/GJ. Pod pojmem „servis KGJ“ jsou myšleny pravidelné údržby spojené s výměnou oleje, čištění výměníků, seřízení stroje a jiných oprav na stroji. Servis kogenerační jednotky se uvádí v ceně za motohodinu (Kč/mth). Cena servisu malých jednotek kolem výkonu 100kWe se pohybuje kolem 30Kč/mth, naopak u jednotek o výkonu 4MWe se servis pohybuje kolem 500Kč/mth. Náklady pod označením „Energetický management“ odkaz představují měsíční vyplňování formulářů o množství spotřebovaného tepla, vyrobeného tepla a elektrické energie. Pokud je provozovatel v podnájmu, je nutné počítat s položkou „Nájem za pronajatý majetek“, odkaz režijními náklady se myslí drobné položky, jež jsou zapotřebí při provozu stroje. Každý stroj vyžaduje obsluhu, proto je nutné zahrnout i personální náklady. Malé kogenerační jednotky většinou nepotřebují až tak významnou obsluhu jako stroje o výkonech v řádů MW. Pokud víme, že budeme mít i jiné náklady, než které byly popsány, je možné je zahrnout do položky „Jiné finanční náklady“.

Sazby zelených bonusů podporovaných zdrojů EE - ZP			
Instalovaný výkon		Provozních	Sazba
od	do		
(kW)	(kW)	(hod)	(Kč/MWh)
0	200	3 000	1 547
0	200	4 400	1 128
0	200	8 400	0
200	1 000	3 000	1 180
200	1 000	4 400	813
200	1 000	8 400	0
1 000	5 000	3 000	890
1 000	5 000	4 400	609
1 000	5 000	8 400	0

Obr. 67 Zelený bonusy za rok 2018

Na základě výše uvedených vstupních dat a předpokladů byl proveden ekonomický výpočet prosté doby návratnosti a výpočet kritérií efektivity plánovaného záměru zohledňující časovou hodnotu peněz. Ekonomický výpočet je uveden na obrázku 68, 69, 70 a 71. Výpočet kritérií efektivity pak v tabulce 72. Při výpočtu ekonomických kritérií byly použity následující vzorce.

Čistá současná hodnota

$$NPV = -IN + \sum_i^n CFW_i * r \quad (16)$$



$$r = \frac{1}{(1 + d)^i} \quad (17)$$

$$CFW = \text{příjmy} - \text{výdaje} = \text{čistý zisk} + \text{odpisy} \quad (18)$$

kde:	NPV	- čistá současná hodnota,
	IN	- aktualizované investiční náklady,
	r	- odúročitel,
	CFW	- roční salda cash-flow,
	i	- roky provozování investice,
	n	- doba provozu,
	d	- diskontní sazba.

Čistá současná hodnota představuje sumu diskontovaných ročních cash flow z provozní činnosti navrhované investice za celou dobu hodnocení projektu po odpočtu vložených jednorázově vložených investičních prostředků. Investice s kladnou hodnotou čisté současné hodnoty (NPV) se doporučují k realizaci, se zápornou hodnotou se zamítají [26].

Vnitřní úroková míra

$$IRR = -IN + \frac{CFW_1}{(1 + IRR)^1} + \frac{CFW_2}{(1 + IRR)^2} + \dots + \frac{CFW_n}{(1 + IRR)^n} = 0 \quad (19)$$

kde:	CFW	- peněžní toky v jednotlivých letech hodnocení (provozní) investice,
	IRR	- vnitřní úroková míra,
	n	- celková doba hodnocení projektu.

Vnitřní úroková míra (IRR) představuje úroveň rentability projektu. V podstatě je to ta výše diskontní sazby, při které se čistá současná hodnota rovná nule. Pro stanovení vnitřní úrokové míry existují v prostředí MICROSOFT EXCEL příslušné vzorce. Na diskontní sazbu, lze pohlížet dvěma způsoby a to buď jako na vážený průměr kapitálu, nebo míru rizika projektu [26]. Pokud je vnitřní úroková míra (IRR) větší než diskontní sazba, projekt se doporučuje k realizaci v opačném případě se odmítá.

Ekvivalentní anuita

$$RENTA = NPV * \frac{r^n * d}{r^n - 1} \quad (20)$$



$$r = 1 + d \quad (21)$$

kde:	NPV	- čistá současná hodnota,
	r	- úročíteľ,
	d	- diskontní sazba,
	n	- doba provozování investice.

Ekvivalentní anuita (RENTA) představuje průměrný roční zisk investice. Je to vlastně čistá současná hodnota projektu přepočtená pomocí složeného úročení na konstantní roční průměr - anuitu [26]. Investice s kladnou anuitou se přijímají k realizaci, se zápornou odmítají.

Diskontovaná doba návratnosti

$$\sum_{t=1}^{T_n} CFW_t / (1 + d)^n = 0 \quad (22)$$

kde:	CFW	- roční peněžní tok,
	T_n	- diskontní doba návratnosti,
	d	- diskontní sazba,
	n	- doba provozování investice.

Diskontovaná doba návratnosti projektu představuje okamžik zvratu čisté současné hodnoty. A to kdy čistá současná hodnota přechází ze záporné hodnoty do kladné (je nulová) [26].

Provozní náklady:

$$PN = RPN + FIXN = (\text{Proměnné náklady} + \text{Fixní náklady}) \quad (23)$$

Zisk před odpisy, úroky a dani z příjmů:

$$EBITDA = TRT + TRE - FIXN = (\text{Tržby teplo} + \text{Tržby elektřina} - \text{Provozní náklady}) \quad (24)$$

Zisk před úroky a dani z příjmů:



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

$$EBIT = EBITDA + ODP = (\text{Zisk před odpisy, úroky a dani z příjmů} - \text{Odpisy majetku}) \quad (25)$$

Zisk před dani z příjmů:

$$EBT = EBIT - ÚR = (\text{Zisk před úroky a dani z příjmů} - \text{Úroky z úvěrů}) \quad (26)$$

Pro $EBT > 0$, zaokrouhluje se na 1000 Kč dolů, současná sazba daně činí 19%

(27)

Na základě výše uvedených vstupních dat a předpokladů byl proveden ekonomický výpočet prosté doby návratnosti a výpočet kritérií efektivnosti plánovaného záměru zohledňující časovou hodnotu peněz [26]. Ekonomický výpočet je uveden v tabulce 68 a tabulce 69 a 70. Výpočet kritérií efektivnosti pak v tabulce 71. Při výpočtu ekonomických kritérií byly použity následující vzorce.

Provozní náklady:

$$PN = RPN + FIXN = (\text{Proměnné náklady} + \text{Fixní náklady}) \quad (28)$$

Zisk před odpisy, úroky a dani z příjmů:

$$EBITDA = TRT + TRE - FIXN = (\text{Tržby teplo} + \text{Tržby elektřina} - \text{Provozní náklady}) \quad (29)$$

Zisk před úroky a dani z příjmů:

$$EBIT = EBITDA + ODP = (\text{Zisk před odpisy, úroky a dani z příjmů} - \text{Odpisy majetku}) \quad (30)$$

Zisk před dani z příjmů:



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

$$EBT = EBIT - \text{ÚR} = (\text{Zisk před úroky a daní z příjmů} - \text{Úroky z úvěrů}) \quad (31)$$

Pro $EBT > 0$, zaokrouhluje se na 1000 Kč dolů, současná sazba daně činí 19%

Daň z příjmů:

$$DA\check{N} = ZZD * SD = (\text{Zaokrouhlený základ daně} * \text{Sazba daně}) \quad (32)$$

Čistý zisk (Hospodářský výsledek):

$$\check{C}Z = EBT - DA\check{N} = (\text{Zisk před daní z příjmů} - \text{Daň}) \quad (33)$$

Provozní Cash flow:

$$CFW_n = (\text{Příjmy} - \text{Výdaje}) = \check{C}Z + ODP = (\text{Čistý zisk} + \text{Odpisy}) \quad (34)$$



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

EKONOMICKÉ HODNOCENÍ EFEKTIVNOSTI PROJEKTU:

INVESTIČNÍ NÁKLADY		6.000 mil.Kč
Investiční náklady bez dotace celkem (Kč)		6.000 mil.Kč
Výše dotace (%), (mil.Kč)	0.0%	0.000 mil.Kč
Hodnota odepisovaného majetku (Kč)		6.000 mil.Kč
Odpisová sazba		10.0%
Doba odepisování pro účetní odpisy (roky)		10.0
VÝNOSY		2.253 mil.Kč
TEPLO		
P _{tj} (kW)		207.0 kW
Provozních hodin při P _{tj} (h)		3 000
P _{tzbytek} průměr (kW)		178.5 kW
Provozních hodin při P _{tzbytek} (h)		0
Výroba tepla při P _{tj} (GJ)		1 928 GJ
Výroba tepla při P _{tzbytek} (GJ)		0 GJ
Výroba tepla ze zdroje celkem (GJ)		1 928 GJ
Průměrná prodejní cena TEPLA (Kč/GJ)		528.31 Kč/GJ
Ztráty v tepelných sítích (% z Q _{vyr}), (GJ)	5.7%	111 GJ
Užitečná (fakturovaná) dodávka tepla (GJ)		1 817 GJ
Výnosy za TEPLO (mil.Kč)		0.960 mil.Kč

Obr. 68 Výpočet prosté doby návratnosti



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

ELEKTRICKÁ ENERGIE	
Pej (kW)	140.0 kW
Provozních hodin při Pej (h)	3 000
Pezbytek průměr (kW)	0.0 kW
Provozních hodin při Pezbytek (h)	0
Výroba EE při Pej (MWh)	420.0 MWh
Výroba EE při Pezbytek (MWh)	0.0 MWh
Výroba EE ze zdroje celkem (MWh)	420.0 MWh
VLASTNÍ SPOTŘEBA ELEKTRICKÉ ENERGIE	
BETAe	0.4396
BETAq	0.5604
VS EE (MWh)	0.0 MWh
VS EE el (MWh)	0.0 MWh
VS EE t (MWh)	0.0 MWh
Dodávka EE (MWh)	420.0 MWh
ZELENÉ BONUSY Z ELEKTRICKÉ ENERGIE	
Množství EE spadající pod zelené bonusy (MWh)	420.0 MWh
Sazba zeleného bonusu (Kč/MWh)	2 065.00 Kč/MWh
Výnosy za ZELENÉ BONUSY (mil.Kč)	0.867 mil.Kč
EE - VÝNOSY ZA PRODEJ OBCHODNÍK	
Množství prodané EE obchodník (MWh)	420.0 MWh
z něho: - ve vysokém tarifu (VT) (MWh)	420.0 MWh
- v nízkém tarifu (NT) (MWh)	0.0 MWh
Průměrná cena prodané EE obchodník	1 000.00 Kč/MWh
- ve vysokém tarifu (VT) (Kč)	1 000.00 Kč/MWh
- v nízkém tarifu (NT) (Kč)	0.00 Kč/MWh
Výnosy z prodeje obchodníkovi (mil.Kč)	0.420 mil.Kč
- ve vysokém tarifu (VT) (mil.Kč)	0.420 mil.Kč
- v nízkém tarifu (NT) (mil.Kč)	0.000 mil.Kč
BONUS ZA DECENTRÁLNÍ VÝROBU	
Množství EE spadající pod bonus (MWh)	420.0 MWh
Výše bonusu za decentralní výrobu (Kč/MWh)	13.00 Kč/MWh
Výnosy za ZELENÉ BONUSY CELKEM (mil.Kč)	0.005 mil.Kč
EE - VÝNOSY ZA SYSTÉMOVÉ SLUŽBY	
Konečná spotřeba výrobce (MWh)	0.0 MWh
Cena za systémové služby (Kč/MWh)	74.46 Kč/MWh
Výnosy za systémové služby (mil.Kč)	0.000 mil.Kč

Obr. 69 Výpočet prosté doby návratnosti



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

PROVOZNÍ NÁKLADY - PROMĚNNÉ		1.049 mil.Kč
EE - NÁKLADY ZA SYSTÉMOVÉ SLUŽBY		
Konečná spotřeba výrobce (MWh)		0.0 MWh
Cena za systémové služby (Kč/MWh)		119.25 Kč/MWh
Náklady za systémové služby (mil.Kč)		0.000 mil.Kč
EE - ÚSPORA NÁKLADŮ ZA NÁKUP EE		
Množství uspořené nakupované EE (MWh)		0.0 MWh
Průměrná nákupní cena silové EE (Kč/MWh))		0.00 Kč/MWh
Úspora nákladů na nákup EE (mil.Kč)		0.000 mil.Kč
TEPLO - ÚSPORA NÁKLADŮ ZA NÁKUP TEPLA		
Množství uspořeného nakupovaného tepla (GJ)		0.0 GJ
Průměrná cena nakupovaného tepla (Kč/GJ)		0.00 Kč/GJ
Úspora nákladů na nákup TEPLA (mil.Kč)		0.000 mil.Kč
PALIVO - ZEMNÍ PLYN		
Tepelná účinnost při Ptj		53.9%
Tepelná účinnost při Ptpřůměr		54.8%
Mpal při Ptj (GJ)		3 576 GJ
Mpal při Ptzbytek (GJ)		0 GJ
Mpal celkem (GJ)		3 576 GJ
Výhřevnost paliva (MJ/m3)		34.00
Mpal při Ptj (m3)		105 170 m3
Mpal při Ptzbytek (m3)		0 m3
Mpal celkem (m3)		105 170 m3
Cena paliva (Kč/GJ)		221.74 Kč/GJ
Náklady na palivo (mil.Kč)		0.793 mil.Kč
NÁKLADY NA SERVIS A ÚDRŽBU		
Počet provozních hodin celkem (h)		3 000
Cena servisu 1 provozní hodiny KGJ + PERIFERIE (Kč/mth)		79.97 Kč/mth
Náklady na servis celkem (mil.Kč)		0.240 mil.Kč
OSTATNÍ PROMĚNNÉ NÁKLADY		
Ostatní proměnné náklady (% z pal.nákladů), (mil.Kč)	2.0%	0.016 mil.Kč
PROVOZNÍ NÁKLADY - FIXNÍ		0.850 mil.Kč
Energetický Management (Kč), (mil.Kč)	50 000	0.050 mil.Kč
Nájemné za pronajatý majetek (Kč), (mil.Kč)	0	0.000 mil.Kč
Režijní náklady (Kč), (mil.Kč)	0	0.000 mil.Kč
Personální náklady (Kč), (mil.Kč)	200 000	0.200 mil.Kč
Účetní roční odpisy (Kč) (Kč), (mil.Kč)	600 000	0.600 mil.Kč
Daňové roční odpisy (Kč) (Kč), (mil.Kč)	600 000	0.600 mil.Kč
Finanční náklady celkem (Kč) (Kč), (mil.Kč)	0	0.000 mil.Kč
NÁKLADY VÝROBY CELKEM		1.899 mil.Kč

Obr. 70 Výpočet prosté doby návratnosti



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

VÝNOSY, NÁKLADY, REKAPITULACE	
Výnosy za TEPLŮ (mil.Kč)	0.960 mil.Kč
Výnosy za EE (mil.Kč)	1.293 mil.Kč
Výnosy CELKEM (mil.Kč)	2.253 mil.Kč
Naklady celkem (mil.Kč)	1.899 mil.Kč
z nich:	
PROMĚNNÉ (mil.Kč)	1.049 mil.Kč
FIXNÍ (mil.Kč)	0.850 mil.Kč
ZISKY , CASHFLOW	
EBIT DA	0.954 mil.Kč
EBIT	0.354 mil.Kč
EBT	0.354 mil.Kč
Základ daně (Kč)	0.354 mil.Kč
Zaokrouhlený základ daně (Kč)	0.354 mil.Kč
Daň ze zisku (Kč)	0.067 mil.Kč
Hospodářský výsledek (Kč)	0.287 mil.Kč
Splátka úvěru	0.000 mil.Kč
Roční Cash Flow (Kč)	0.887 mil.Kč
Prostá doba návratnosti (roky) - zjednodušený výpočet	6.8

Obr. 71 Výsledný ekonomický výpočet

KATEGORIE	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
PODMIKATELSKÝ PLÁN																
KGSJ 140 kW/207 kWt																
Diskontní sazba																
Rok pro vyhodnocování																
5,0%																
15																
KRITÉRIA EFEKTIVNOSTI PROJEKTU																
NPV(15) = 0,489 mil.Kč																
IRR(15) = 15,1%																
RENTA(15) = 6,6 mil.Kč																
DDN(roky) = 5,5																
PDN(roky) = 5,5																
INVESTIČNÍ VÝDAJE :																
Investice do HMM	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Investiční výdaje ostatní (nepodléhající odepisování)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Investiční výdaje celkem	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SLOŽKY VÝHODSÚ A NÁKLADŮ (mil.kč)																
Výnosy za TEPLLO (prodej + ZB)	0,000	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278	1,278
Výnosy za EE (prodej EE + ZB)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Výnosy za CHLAD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Příjmy celkem	0,000	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391	2,391
PROVOZNÍ VÝDAJE :																
Náklady na palivo	0,000	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920
Náklady na nákup EE a TEPLA	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Náklady na servis a údržbu KGSJ	0,000	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240
Náklady na vodu	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ostatní proměnné náklady	0,000	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Proměnné náklady celkem	0,000	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178
Náklady na údržbu, opravy a revize, SO, GO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Personální náklady	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Režijní náklady	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nájemné za pronajatý majetek	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Náklady za služby	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Stálé provozní výdaje celkem	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Celkové provozní výdaje	0,000	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178	1,178
Účetní odpisy	0,000	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600
Daňové odpisy	0,000	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600
Finanční náklady	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Náklady výnosy celkem	0,000	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778	1,778
ZISKY, ZTRÁTY																
EBITDA - zisk před odpisy a finančními náklady	0,000	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213
EBIT - provozní zisk před finančními náklady	0,000	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613
EBT - zisk před zdaněním	0,000	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613
Základ daně zabezruhlený	0,000	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613	0,613
DAŇ	0,000	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116
ZISK po zdanění - Hospodářský výsledek	0,000	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497
PEŇEŽNÍ TOKY																
CASH-FLOW	-8,000	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097
CASH-FLOW kumulovaný	-8,000	-4,903	-3,807	-2,710	-1,614	-0,517	0,579	1,676	2,773	3,869	4,966	6,063	7,160	8,257	9,354	10,451
CASH-FLOW dletočovaný	-8,000	1,044	0,995	0,947	0,902	0,859	0,818	0,779	0,742	0,707	0,673	0,640	0,607	0,574	0,541	0,508
KRITÉRIA EFEKTIVNOSTI PROJEKTU																
Čistá současná hodnota - NPV	-8,000	-4,966	-3,961	-3,014	-2,112	-1,252	-0,434	0,345	1,087	1,794	2,467	3,042	3,569	4,110	4,606	5,079
Vnitřní úroková míra - IRR	%	-100,0%	-81,7%	-67,1%	-54,9%	-43,9%	-34,9%	-27,9%	-22,8%	-18,5%	-14,8%	-11,6%	-9,0%	-6,9%	-5,4%	-4,4%
Ekvivalentní annuita - RENTA	mil.Kč	-5,000	-2,130	-1,107	-0,596	-0,289	-0,086	0,060	0,168	0,252	0,320	0,366	0,405	0,438	0,465	0,489
Prostá doba návratnosti - PDN	roky	5,5														
Diskontovaná doba návratnosti - DDN	roky	6,6														

Obr. 72 Výpočet kritérií efektivity projektu



Kritéria efektivity projektu

Kritéria efektivity hodnoceného projektu tvoří čistá současná hodnota za dobu provozování 15-ti let – NPV (15), ekvivalentní annuita a vnitřní úroková míra za stejnou dobu provozu investice – RENTA(15), IRR(15) a také diskontovaná doba návratnosti do investice vložených prostředků – DDN [26]. Zkratka PDN značí prostou dobu návratnosti.

- NPV (15) (Čistá současná hodnota)	5,079 mil.Kč
- IRR (15) (Vnitřní úroková míra)	16,1%
- RENTA (15) (Ekvivalentní annuita)	0,489 mil.Kč
- DDN (Diskontní doba návratnosti)	6,6 let
- PDN (Prostá doba návratnosti)	6,5 let

Při zhodnocení ukázkového podnikatelského záměru se jeví investice z pohledu kritérií efektivity životaschopný a perspektivní pro možnou realizaci. Po patnácti letech provozu zamýšlené investice se zvýší tržní hodnota energetické firmy realizující danou investici o 5,079 mil. Kč. Průměrný roční zisk za stejnou dobu provozu investice dosáhne hodnoty 0,489 mil. Kč. Rentabilita projektu bude 16,1 % při diskontované návratnosti do investic vložených prostředků 6,8 let.

8 Přínosy disertační práce

Experimentální měření na konkrétních kogeneračních jednotkách:

Měření probíhalo na konkrétních kogeneračních jednotkách, ze kterých byly získány informace o provozu, jak z pohledu elektrického, tak i tepelného. Zároveň se hodnotily jednotky na bioplyn a zemní plyn. Tato část disertační práce nám dává návod, jak předcházet různým problémům při provozu kogeneračních jednotek.

Z pohledu elektrické energie byly kogenerační jednotky vyhodnoceny dle normy ČSN EN 50160. Tato měření mohou sloužit pro zhodnocení podobných typů kogeneračních jednotek. Mezi nejčastější problémy z pohledu elektrické energie mohou patřit například nejasné výpadky kogeneračních jednotek, problémy s fázováním či nestabilní kompenzace. Popisované problémy jsou v práci vysvětleny na konkrétních případech, a je ukázáno i jejich následné řešení. Většina výše popsaných problémů byla vyřešena i v praxi.

Na kogeneračních jednotkách probíhalo také měření z pohledu tepelné energie. U vyráběné tepelné energie v kogeneračních jednotkách se nejčastěji setkáváme s problémem zanášením se tepelných výměníků. V práci jsou popsány možnosti řešení těchto problémů.

Modelace kogenerační jednotky:



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Ze získaných informací s provozem kogenerace byl vytvořen model, který umožňuje namodelovat jakoukoliv kogenerační jednotku se spalovacím motorem. Vstupními parametry pro modelaci jsou nejčastěji základní parametry od výrobce. Modelem můžeme nasimulovat jednotku i v různých režimech provozu. Ve výstupu dostaneme informace o energetické bilanci provozu kogenerační jednotky.

Ekonomické zhodnocení:

Tato část navazuje na model energetické bilance kogenerační jednotky, ve které můžeme provést její ekonomické zhodnocení. Program obsahuje vstupní parametry pro kogeneraci, mezi které patří náklady a příjmy. Mezi náklady patří investice spojené s pořízením jednotky, servis, údržba, cena paliva a ostatní položky. Vliv na návratnost investice má především cena za vyrobené teplo a elektřinu.

Výsledkem ekonomického výpočtu jsou kritéria vyhodnocení projektu. Jednotlivé příjmy a výdaje jsou vyhodnoceny za jednotlivé roky provozu. Ekonomické zhodnocení je namodelováno pro jednotlivé roky až do 15 let provozu kogenerační jednotky.

Využívané přínosy v praxi:

Řízená kompenzace (MASTER SLAVE)

Plynulé fázování asynchronních motorů za pomoci softstartéru.

Zvýšení využití tepelné energie v technologii kogenerace s použitím akumulace.

Metody čištění deskových výměníků.

Aplikování výpočetního programu pro investice do technologií využívající kogenerační jednotky.



9 Závěr

První část práce popisuje současný stav různých typů kogeneračních zdrojů. V dané kapitole byly srovnávány kogenerační jednotky z pohledu dodávky elektrické energie. Posuzovanými jednotkami byl spalovací motor, spalovací turbína a protitlaková parní turbína. Za hodnotící kritéria byla zvolena elektrická účinnost, startovací čas, rozsah regulace výkonu a pořizovací náklady. Zhodnocení kogeneračních jednotek bylo provedeno za pomoci multikriteriální analýzy a programu MCA8, který využívá vícekritériální rozhodování. Nejlépe těmto kritériím vyhověl spalovací motor, nejméně naopak protitlaková parní turbína. Následně jsou v této kapitole popsány jednotlivé komponenty, ze kterých se skládá kogenerační jednotka. Tyto jednotlivé části jsou zhodnoceny jak z pohledu funkčnosti, tak i z hlediska provozu v praxi.

Druhá část popisuje kogenerační jednotky z pohledu provozování v České republice. Zastoupení jednotlivých typů kogenerace a jejich ekonomické zhodnocení je posouzeno i z pohledu zahraničních zemí.

Třetí část se zabývá měřením elektrických parametrů na konkrétní kogenerační jednotce. Měření bylo provedeno na konkrétních kogeneračních jednotkách, ze kterých byly získány informace o provozu, jak z pohledu elektrického, tak i tepelného. Zároveň se hodnotily jednotky na bioplyn a zemní plyn.

Čtvrtá část řeší problematiku řízení jalového výkonu kogeneračních jednotek. Konkrétní problém je popsán na jednom případě v praxi, kdy byl jalový výkon nezávisle kompenzován v kogenerační jednotce a centrální kompenzací. Pro správné fungování regulace jalového výkonu je nutné zvolit, která kompenzace bude MASTER, a naopak která bude SLAVE.

Pátá část popisuje jednu z možných aplikací využívajících tepelnou a elektrickou energii z kogenerační jednotky. Tato popisovaná aplikace je zajímavá tím, že obsahuje akumulační nádrž na teplou vodu. Na této technologii proběhlo několik měření. Jedno z měření se zabývalo elektrickými parametry a druhé řešilo akumulaci elektrické energie.

Poslední část řeší modelaci kogenerační jednotky. Při nasazování kogeneračních jednotek do jakékoliv technologie je zapotřebí mít informace o požadované spotřebě tepla nebo elektrické energie. Nejčastější způsob nasazování kogeneračních jednotek do technologie je na základě spotřeby tepelné energie. Pro modelaci kogeneračních jednotek do tepelného režimu jsem vytvořil program v Microsoft Excel pod názvem „Modelace kogeneračních jednotek do tepelného režimu“.

Cílem programu bylo vytvoření diagramu hodinových spotřeb pro danou technologii, do kterého implementujeme různé velikosti a množství kogeneračních jednotek. Program dokáže namodelovat každou jednotku s požadovaným rozsahem regulace. U kogeneračních jednotek se většinou volí tepelný rozsah regulace v rozmezí 100% až 60% jmenovitého tepelného výkonu, to odpovídá 100% až 50% jmenovitému elektrickému výkonu.

Jedním z výsledků a vizuální kontroly je graf tepelných výkonů, kde jsou vidět modely jednotlivých kogeneračních jednotek. V grafu je vykreslena křivka trvání tepelného výkonu množství tepla v KGJ. Množství vyrobeného tepla z kogeneračních jednotek je ukázáno v legendě. Nepokryté množství tepla z kogeneračních jednotek je zobrazeno jako zbytkové teplo. Tato část bývá nejčastěji pokryta za pomoci plynových kotlů, které se mohou regulovat od 0% do 100% jmenovitého výkonu. Nejlepší aplikací na vykrytí potřebného tepla je použitím akumulační nádrže.



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Při nasazování kogenerační jednotky v praxi je zapotřebí si vypočítat i energetickou bilanci. Ta se počítá v programu „Modelace kogenerační jednotky“. Modelací kogenerační jednotky jsem získal informace o spotřebě paliva, vyrobeného tepla, vyrobené elektrické energie a jiné důležité parametry. Tyto informace však nejsou z pohledu proveditelnosti projektu s kogenerační jednotkou postačující. Výsledné parametry z modelu vstupují do ekonomické části „Ekonomika“, ve kterém můžeme zjistit kritéria efektivnosti hodnoceného projektu. Výstupem programu je čistá současná hodnota, vnitřní úroková míra, ekvivalentní anuita, diskontní doba návratnosti, prostá doba návratnosti a jiné ekonomické ukazatele.



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

10 Možnosti dalšího rozvoje výzkumu

Měření na kogeneračních jednotkách

Pro získání většího povědomí o problematice kogeneračních jednotek, je zapotřebí provést měření na více kogeneračních jednotkách.

Modelace:

Vytvoření ekonomického modelačního programu i pro jiné zdroje, jako jsou například malé vodní elektrárny, fotovoltaické elektrárny a větné elektrárny. Popsaný model byl vytvořen v programu excelu z důvodu možného rozšíření, nebo naopak odebrání nepotřebných položek. Nejčastější měněné položky bývají v podobě dotací, v momentální době je máme pod označením „zelený bonus“.

Internet věci:

S rozvojem sítě fyzických zařízení přichází i možnost aplikování této technologie do kogeneračních jednotek. Zde by se získávaly informace o jejich chodu a následně by docházelo k jejich propojení s elektrickou sítí.



Seznam použité literatury

- [1] MASTNÝ, P. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. 1. vyd. ČVUT Praha, 2011. 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] Energetické stroje, V. Voráček, J. Dobrozemský, J. Kaminský, Ostrava, Vysoká škola báňský v Ostravě, 1985
- [3] Jaderné a klasické elektrárny, J. Doležal, J. Šťastný, J. Špetlík, S. Bouček and Z. Brettschneider, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04936-5, p.260, 2011.
- [4] Malé kogenerační jednotky v komunální a průmyslové energetice, Krbek J., Polesný B., PC-DIR Real, Brno 1999, ISBN 80-85895-23-4
- [5] Kogenerační jednotky Zřizování a provoz, Krbek J., Polesný B., GAS, Praha 2007, ISBN 978-80-7328151-9
- [6] Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie, Dvorský E., Hejtmánková P., BEN – technická literatura, Praha 2005, ISBN 80-7300-118-7
- [7] MIKROTURBÍNY? LEPŠÍ NEŽ MOTORY!, Jan Šurovský, odborný seminář, PODĚBRADY 2012 – Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy – 17. Ročník, 20-21 Listopad, 2012, EGÚ Praha Engineering, a.s., Poděbrady, Czech Republic, ISBN 978-80-230-3394-3
- [8] Renewable energy sources 1 Technologies for a sustainable future, Janíček F., Daruľa I., Gaduš J., Regula E., Smitková M., Polonec L., Ludvík J., Kubica J., Michalík M., Bindzár M., Bratislava, STU FEI (Slovak University of Technology in Bratislava), 2009, ISBN 978-80-89402-05-2
- [9] Elektroenergetika průmyslových a distribučních sítí, Z. Hradílek, P. Moldřík, 2008. ISBN 987-80-7225-291-6.
- [10] ERÚ. *Pravidla provozování distribučních soustav. Energetický regulační úřad – změna 01/2014*. [online]. [cit. 7. 5. 2014]. Dostupné z:
<http://www.eru.cz/documents/10540/462808/CEZ_Distribuce_a_s.pdf/da55c297-d290-4b81-9e8c-827be79b667d>
- [11] MASTNÝ, P. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. 1. vyd. ČVUT Praha, 2011. 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.



- [12] MOTOFOCUS. *Chladič turba – změna 03/2017*. [online]. [cit. 28. 1. 2019]. Dostupné z: <<https://motofocus.cz/vyrobci/25104,chladic-turba-je-pod-tlakem-a-bude-hur>>
- [13] Elektrické stroje. *Asynchronní motory – změna 01/2007*. [online]. [cit. 28. 1. 2019]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwi99bSk9JDgAhXOGuwKHTEFDLIQjhx6BAGBEAI&url=http%3A%2F%2Ffeil.vsb.cz%2Fkat420%2Fvyuka%2FBakalarske_FS%2Fprednasky%2F1_AM_FS.pdf&psig=AOvVaw0TrAXpCs4k9Ln8ECzpR6xh&ust=1548779736620954>
- [14] VIESSMAN. *Kogenerační jednotky – změna 01/2018*. [online]. [cit. 28. 1. 2019]. Dostupné z: <www.viessmann.cz/cs/misc/hledani.html?q=KOGENERA%C4%8CN%C3%8D+JEDNOTK>
- [15] COGENERATION OBSERVATORY AND DISSEMINATION EUROPE. *Cogeneration – změna 01/2018*. [online]. [cit. 28. 1. 2019]. Dostupné z: <<http://www.code2-project.eu/>>
- [16] RUFFER. *Hradicí členy HDO – změna 01/2018*. [online]. [cit. 28. 1. 2019]. Dostupné z: <<http://www.rufer.cz/produkty/hradici-cleny/>>
- [17] PROFI ELEKTRIKA. *Používáte hradicí členy? – změna 01/2019*. [online]. [cit. 28. 1. 2019]. Dostupné z: <<https://elektrika.cz/data/bleskovky/pouzivate-hradici-cleny-hdo/view>>
- [18] Vliv obnovitelných zdrojů na inovaci systému chránění distribuční sítě VN, Jaroslav Pospíšil, Proceeding of the sixth international scientific symposium ELEKTROENERGETIKA 2011, September 21-23, 2011, Stará Lesná, Slovakia, ISBN 978-80-553-0724-4
- [19] Možnosti zvýšení připojitelného výkonu z obnovitelných energetických zdrojů do distribučních sítí, Emil Dvorský, Jan Škorpil, Jiří Erelebach, Proceeding of the fifth international scientific symposium ELEKTROENERGETIKA 2009, September 23-25, 2009, Stará Lesná, Slovakia, ISBN 978-80-553-0237-9
- [20] Využití akumulace tepla pro případ potřeby navýšení výroby z KVET, Emil Dvorský, Pavla Hejtmánková, Proceeding of the 12th International Scientific Conference Electrical Power Engineering 2011, May 17-19, 2011, Kouty nad Desnou, Czech Republic, ISBN 978-80-248-2393-5
- [21] PRAKTICKÉ MOŽNOSTI ELIMINACE VLIVU ROZPTÝLENÉ VÝROBY NA KVALITU NAPĚTÍ, Martin Kašpírek, Jan Jiříčka, David Mezera, Daniel Kouba, Martin Hroudný, Aleš Procházka, odborný seminář, PODĚBRADY 2012 – Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy – 17. Ročník, 2012 Listopad, 2012, EGÚ Praha Engineering, a.s., Poděbrady, Czech Republic, ISBN 978-80-230-3394-3



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

- [22] DISTRIBUČNÍ SÍTĚ S OBNOVITELNÝMI ZDROJI ENERGIE, František Vybíralík, odborný seminář, PODEBRADY 2012 – Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy – 17. Ročník, 2012 Listopad, 2012, EGÚ Praha Engineering, a.s., Poděbrady, Czech Republic, ISBN 978-80-230-3394-3
- [23] Obnovitelné zdroje elektrické energie, P. Mastný, J. Drápela, S. Mišák, J. Macháček, M. Ptáček, L. Radil, T. Bartošík and T. Pavelka, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04937-2, p.256, 2011.
- [24] Electric Power Principles, James L. Kirtley, Massachusetts Institute of Technology, ISBN: 978-0-470-68636-2, Hardcover, 404 pages, 2010
- [25] Thermal Energy Storage, Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen, ISBN: 978-0-470-74706-3, Hardcover, 620 pages, 2010
- [26] Implementace kogeneračních jednotek do tepelného zdroje, M. Špaček, VŠB – Technická univerzita Katedra energetiky, Diplomová práce, Ostrava 2015, p.72, 2019.



Vlastní publikace

Web of Science ve sborníku:

- [27] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z., VACULIK, J.: *Multi-criterial analysis of small co-generation units using biogas*. In sborník EPE, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2015, vol. 1, s. 571-576, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [28] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z., MOLDŘÍK, P.: *Cooperation between Photovoltaic and Biogas Power Plants within 22kW Network. Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2015*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, s. 341-345, ISSN 2376-5623, ISBN 978-1-4673-6788-2
- [29] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z.: *Reactive Power Control in Cogeneration Units. Proceedings of the 8th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, Elektroenergetika 2015*, 2015, s. 508-511, ISBN 978-80-553-2187-5.
- [30] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z.: *Automation and Control of Energetic Systems Using Cogeneration Unit in Industry. Advances in Intelligent Systems and Computing. Volume 451*, Springer, 2016, s. 471-479, ISSN 1615-3871, ISBN 978-3-319-33815-6.
- [31] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z.: *Modelling of Cogeneration Units for Energetic Balance. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) : 7-10 June 2016, Florence, Italy*, IEEE, 2016, s. 823-827, ISBN 978-1-5090-2319-6.

Publikace v časopise:

- [32] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z.: *Akumulace a řízení dodávky energie z kogenerační jednotky. ENERGETIKA 2019, Článek bude vydán v první polovině roku 2019.*

Publikace ve sborníku:

- [33] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z., MOLDŘÍK, P.: *Evaluation of Output Measurement of Biogas Station Hodoňovice*. In sborník konference ELNET VŠB - TU Ostrava, 2014, čís. 1., s. 35-41, ISBN 978-80-248-3663-8.
- [34] ŠPAČEK, M.: *Measurement on the biogas plant Hodoňovice. WOFEX 2015 : proceedings of the 13th annual workshop : November 22, 2016, Ostrava, Czech Republic*, VŠB - Technical University of Ostrava, 2015, s. 84-89, ISBN 978-80-248-3787-1.
- [35] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z.: *Modeling of Cogeneration Units. WOFEX 2016 : proceedings of the 14th annual workshop : September 6, 2016, Ostrava, Czech Republic*, VŠB - Technical University of Ostrava, 2016, s. 67-72, ISBN 978-80-248-3961-5.



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulární zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

- [36] ŠPAČEK, M., HRADÍLEK, Z.: *Modelling of Cogeneration Unit 400kW. ELNET 2016 : Proceedings of the 13th Workshop, ELNET 2016, 21th November 2016 : proceedings of papers*, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016, ISBN 978–80–248–4008–6.

Účast na projektech:

- SP2016/95 Optimalizace elektrizační soustavy s on-grid OZE.
- SP2017/54 Optimalizace energetického systému s alternativními zdroji.
- SP2018/61 Provoz distribučních sítí s OZE.

Výpočetní aplikace:

ŠPAČEK, M.: Výpočetní aplikace: Modelace kogenerační jednotky. Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulární zdroj energie as aplikací na řízení kogeneračních jednotek, VŠB-TU Ostrava, ev.č.:002/18-03-2019_SW.

ŠPAČEK, M.: Výpočetní aplikace: Modelace kogeneračních jednotek do tepelného režimu. Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulární zdroj energie as aplikací na řízení kogeneračních jednotek, VŠB-TU Ostrava, ev.č.:003/18-03-2019_SW.



Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma zapojení kogenerační jednotky se spalovacím motorem	17
Obr. 2 Schéma zapojení kogenerační jednotky se spalovací turbínou	19
Obr. 3 Schéma zapojení protitlakové parní turbíny	20
Obr. 4 Kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263 z čelní strany	23
Obr. 5 Kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263 z boční strany	24
Obr. 6 PID schéma kogenerační jednotky se spalovacím motorem	25
Obr. 7 Spalinový výměník [5]	26
Obr. 8 Deskový výměník v KGJ	27
Obr. 9 Znečištěná deska výměníku	27
Obr. 10 Čištění deskového výměníku s vysvětlivkami	28
Obr. 11 Chladič palivové směsi [12]	29
Obr. 12 Chladič palivové směsi	29
Obr. 13 Momentová charakteristika asynchronního stroje [13]	30
Obr. 14 Synchronní generátor v kogenerační jednotce Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263	32
Obr. 15 Svorkovnice generátoru kogenerační jednotky	32
Obr. 16 Výroba elektřiny za pomoci kogenerace v České Republice [15]	34
Obr. 17 Ekonomické vyhodnocení kogenerace [15]	35
Obr. 18 Vícepólové zjednodušené schéma regulace odběru ze sítě v podnikové síti	37
Obr. 19 RTU rozvaděč	39
Obr. 20 Regulace výkonu KGJ pomocí RTU řízení	40
Obr. 21 Hradící členy [16]	40
Obr. 22 Vyrobená elektřina za rok a instalovaný výkon za pomoci kogenerace na Slovensku [16]	41
Obr. 23 Podíl jednotlivých kogeneračních technologií v Polsku [16]	42
Obr. 24 Ekonomické zhodnocení jednotlivých kogenerací v Polsku [16]	43
Obr. 25 Vyrobené teplo za pomoci kogenerace v jednotlivých sektorech [16]	43
Obr. 26 Ekonomické zhodnocení jednotlivých kogenerací [16]	44
Obr. 27 Ekonomické zhodnocení jednotlivých kogenerací [16]	45
Obr. 28 Zastoupení jednotlivých typů kogenerace v Itálii [16]	46
Obr. 29 Ekonomické zhodnocení vybraných typů kogeneračních jednotek [16]	47
Obr. 30 Kogenerační jednotka GE Jenbacher JGS 312 GS-B.LC 637 kW	48
Obr. 31 Schéma zapojení kogeneračních jednotek do distribuční sítě	48
Obr. 32 Celkový činný výkon dodávaný všemi CHP (za období od 20 srpna 2014 do 19 září 2014) ..	49
Obr. 33 Detail průběhu výpadku činného výkonu dodávaný všemi CHP 13 září 2014	49
Obr. 34 Histogram napětí z celkového měření	50
Obr. 35 Detailní průběh napětí ze dne 4 září 2014 od 9:00 do 14:00	51
Obr. 36 Detail účinník v jednotlivých fázích ze dne 4 září 2014 od 9:00 do 14:00	51
Obr. 37 Detail průběhu jalového výkonu v jednotlivých fázích ze dne 4 září 2014 od 9:00 do 14:00 ..	52
Obr. 38 Kogenerační jednotka Jenbacher JGS 312 GS-B.LC	53
Obr. 39 Schéma zapojení kogeneračních jednotek do distribuční sítě a napojení měřicího přístroje BK 500	54
Obr. 40 Graf průběhu celkového činného výkonu dodávaného do sítě	55
Obr. 41 Průběh jalového výkonu	56
Obr. 42 Zapojení kogeneračních jednotek s kompenzací	57
Obr. 43 Zapojení kogeneračních jednotek s kompenzací	58



Obr. 44 Vizualizace technologie kogenerační jednotky s akumulární nádrží a jinými pomocnými zařízeními	61
Obr. 45 Vizualizace přílehlé technologie využívající tepelnou energii	61
Obr. 46 Kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263	62
Obr. 47 Odkrytovaná kogenerační jednotka Viessmann Vitobloc 200 EM-199/263	63
Obr. 48 Energetická bilance [14]	64
Obr. 49 Akumulární nádrž 60 m ³	65
Obr. 50 Nabíjení akumulární nádrže	65
Obr. 51 Vybíjení akumulární nádrže	66
Obr. 52 Jednopolové zapojení kogenerační jednotky do místní elektrické sítě	67
Obr. 53 Průběh elektrického výkonu z KGJ při provozu	68
Obr. 54 Průběh elektrického proudu z KGJ při provozu	68
Obr. 55 Průběh elektrického napětí z KGJ při provozu	69
Obr. 56 Volba velikosti kogenerační jednotky a regulační rozsah	70
Obr. 57 Diagram trvání hodinových tepelných výkonů	71
Obr. 58 Výsledná tabulka s implementovanými kogeneračními jednotkami	72
Obr. 59 Zadávání vstupních parametrů kogenerační jednotky „záložka Nastavení“	74
Obr. 60 Závislost účinnosti generátoru na zatížení KGJ a polynomická rovnice	75
Obr. 61 Závislost poměru výkonu PT/PE na zatížení KGJ a polynomická rovnice	75
Obr. 62 Závislost spotřeby paliva na zatížení KGJ a polynomická rovnice	76
Obr. 63 Vliv nadmořské výšky a teploty nasávaného vzduchu na výkon motoru bez turbodmychadla (Koeficient snížení výkonu motoru)	77
Obr. 64 Vliv nadmořské výšky a teploty nasávaného vzduchu na výkon motoru s turbodmychadlem (Koeficient snížení výkonu motoru)	77
Obr. 65 Zadávací tabulka v programu pro vliv nadmořské výšky na výkon motoru	78
Obr. 66 Model kogenerační jednotky	79
Obr. 67 Zelený bonusy za rok 2018	83
Obr. 68 Výpočet prosté doby návratnosti	88
Obr. 69 Výpočet prosté doby návratnosti	89
Obr. 70 Výpočet prosté doby návratnosti	90
Obr. 71 Výsledný ekonomický výpočet	91
Obr. 72 Výpočet kritérií efektivnosti projektu	92



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulární zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Seznam tabulek

Tab. 1 <i>Jednotlivé varianty a kritéria</i>	21
Tab. 2 <i>Váhy jednotlivých kritérií</i>	22
Tab. 3 <i>Vyhodnocení jednotlivých kogeneračních jednotek pomocí CDI metody</i>	22
Tab. 4 <i>Základní parametry jednotky Vitobloc 200 EM-199/263</i>	62
Tab. 5 <i>Základní parametry jednotky Vitobloc 200 EM-199/263</i>	64



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Seznam příloh

<i>Příloha A</i>	107
<i>Příloha B</i>	114



Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

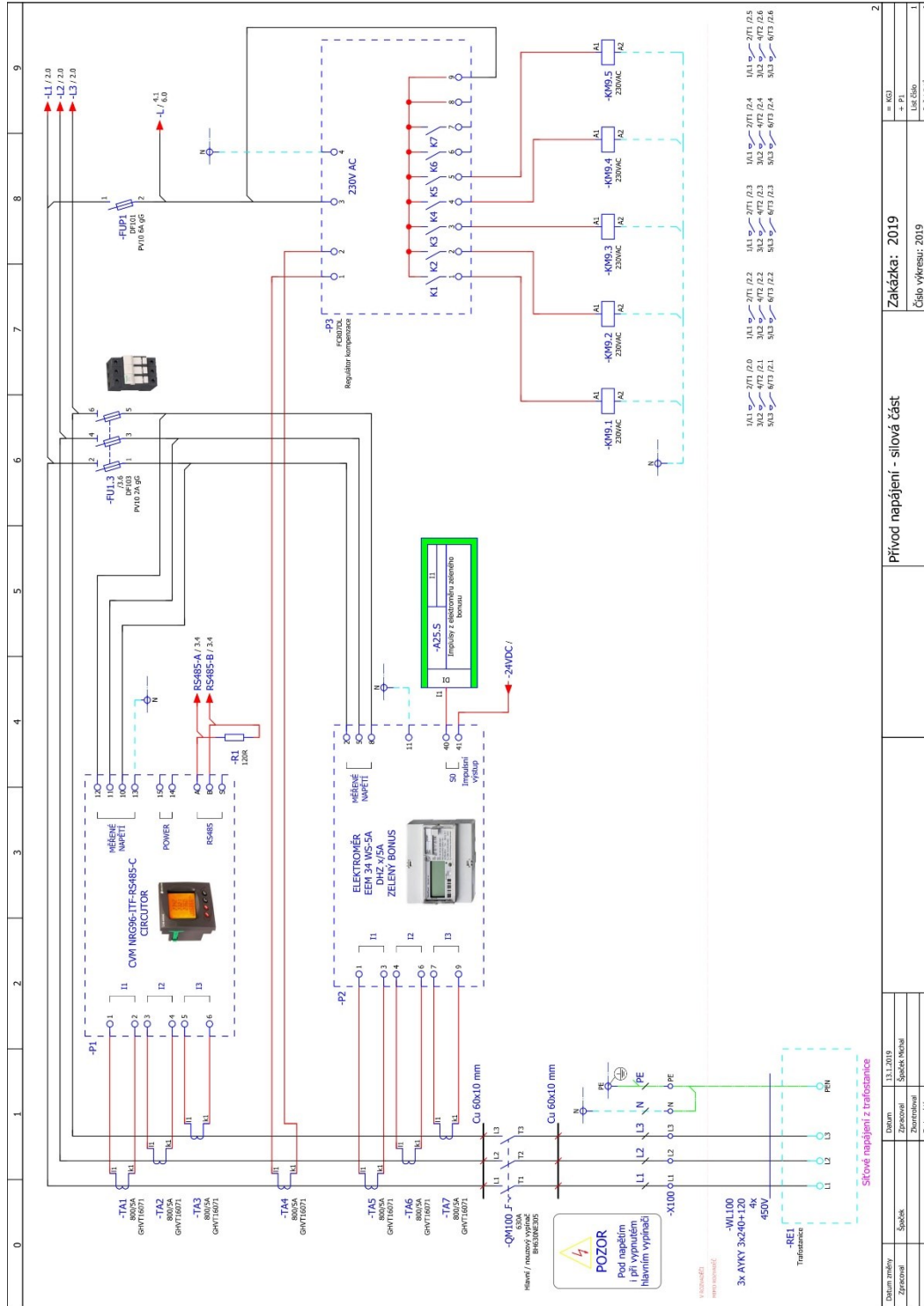
Příloha A

Napojení kogenerační jednotky



Ing. Michal Špaček

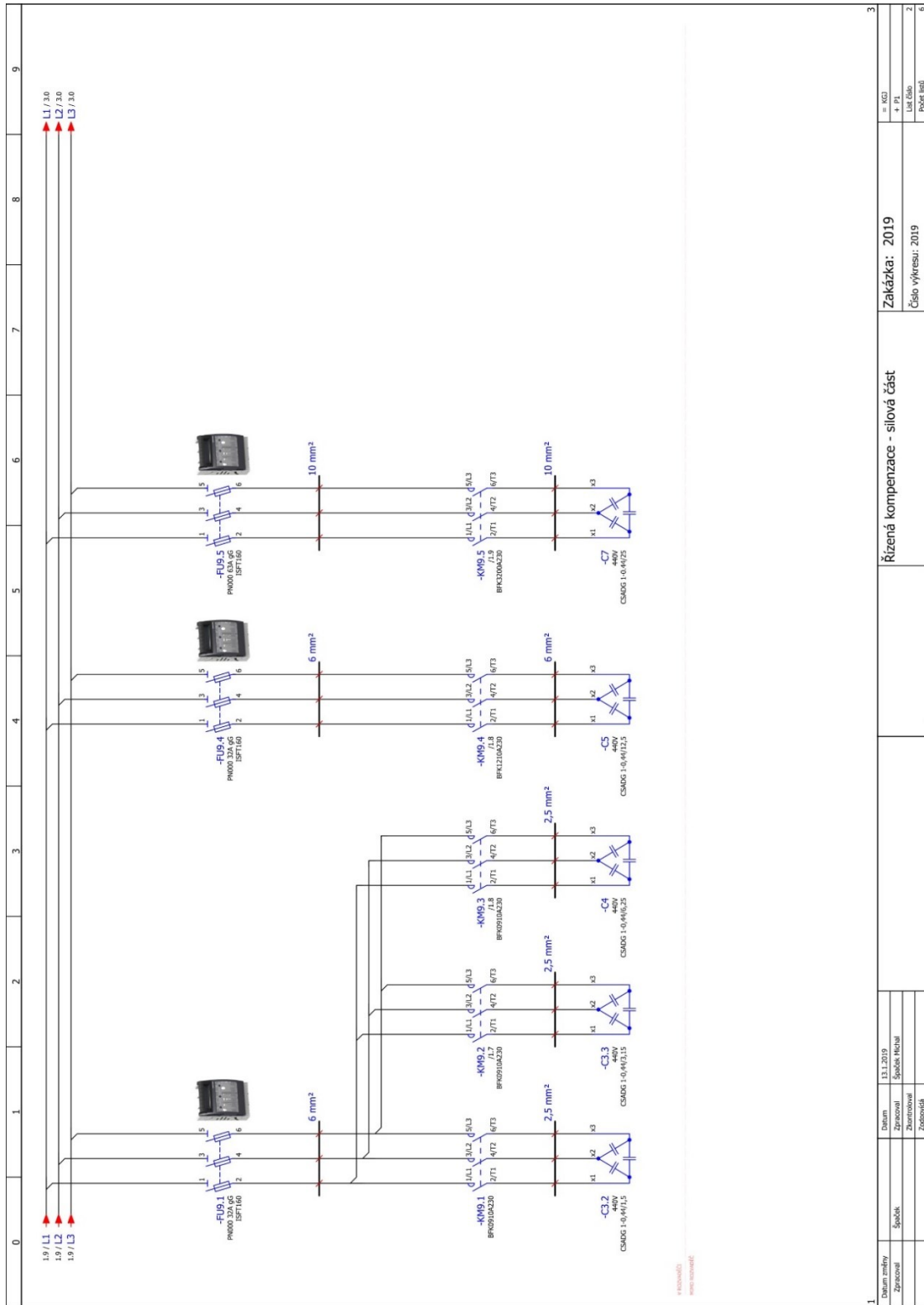
Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek





Ing. Michal Špaček

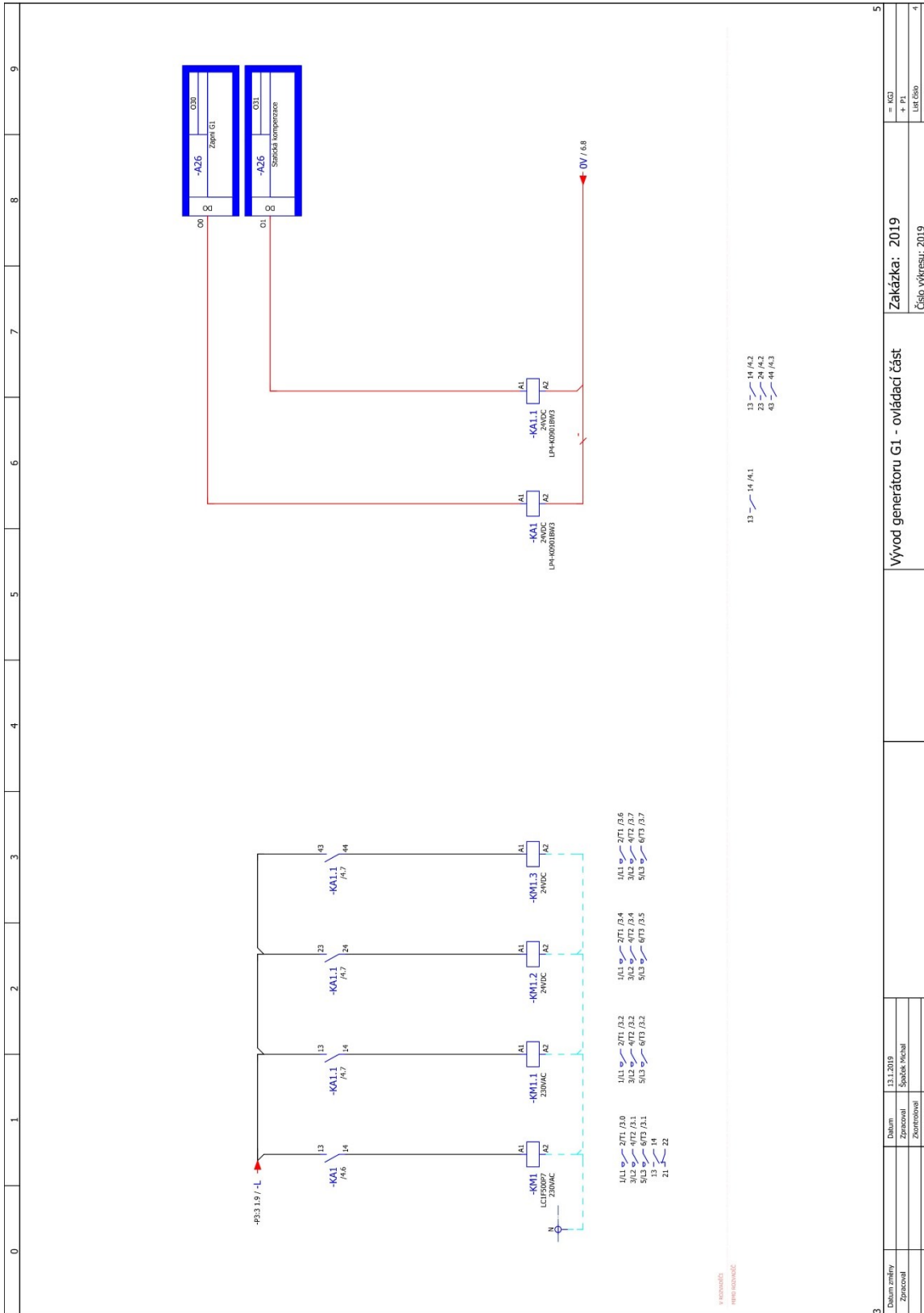
Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

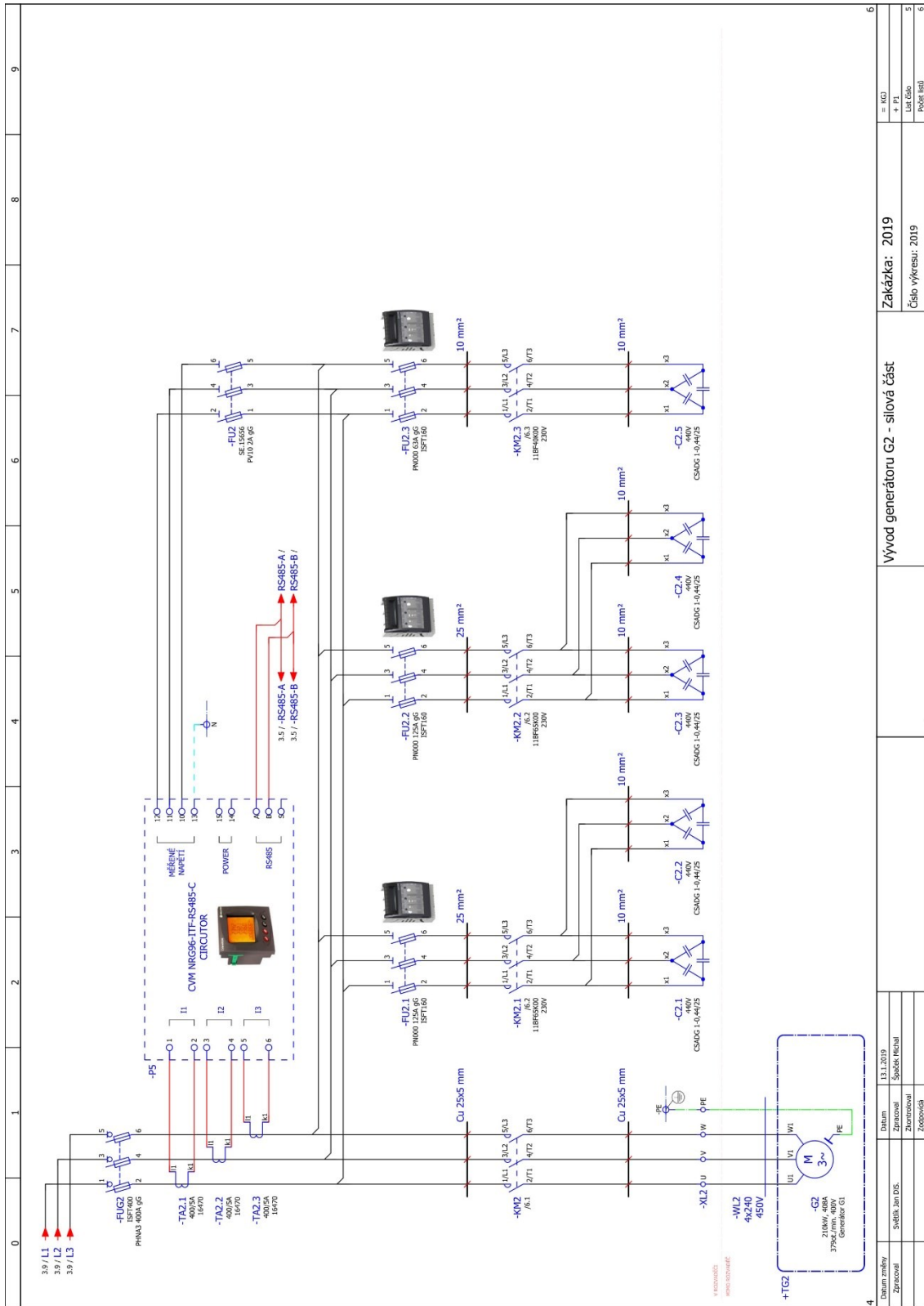




Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulační zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek





Datum změny		13.1.2019	
Zpracoval	Špaček Michal	Zakázka: 2019	
Zkontroval		Číslo výkresu: 2019	
Zodpověděl		= KG	
		+ PL	
		LSP	
		Pilot LED	

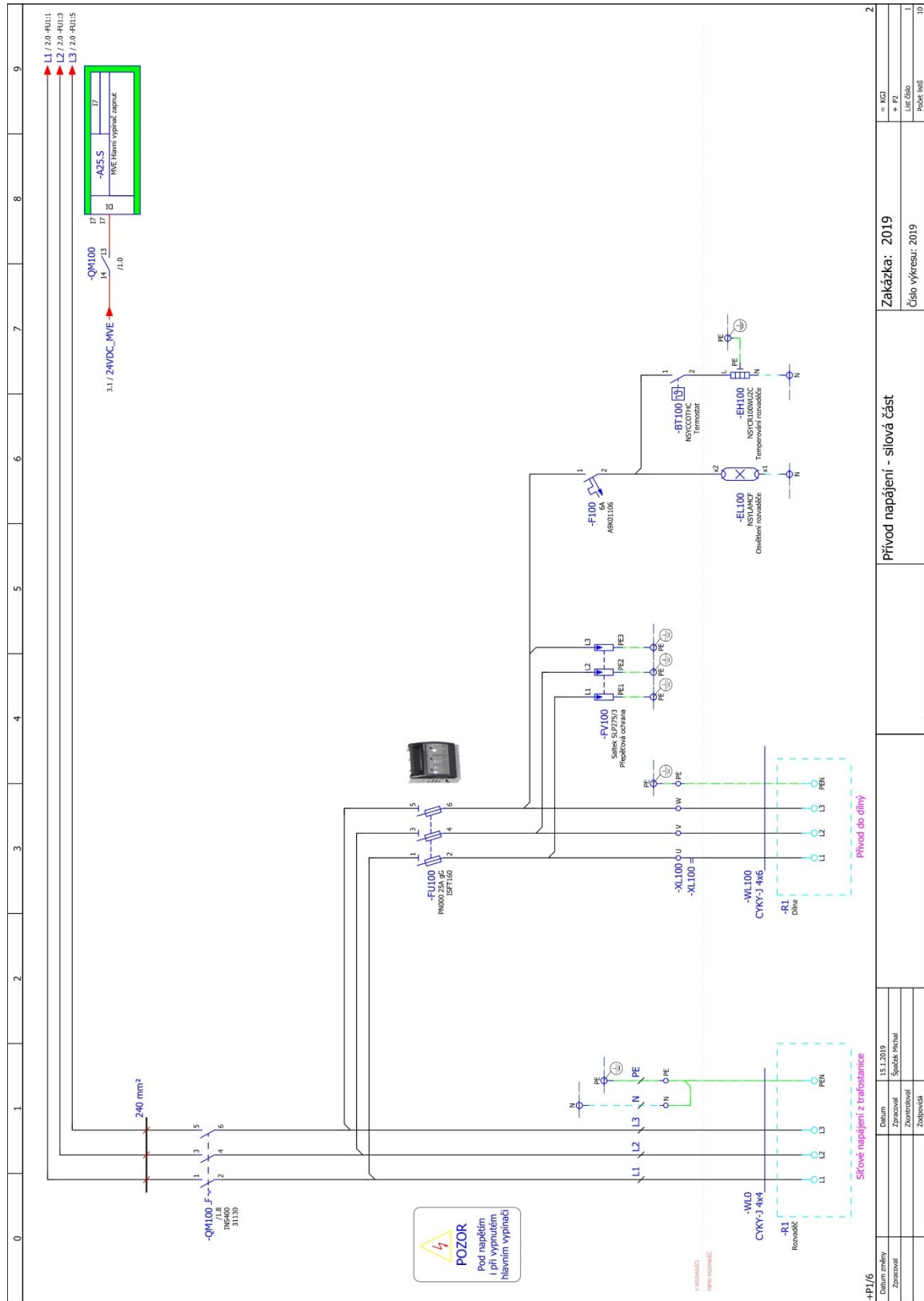


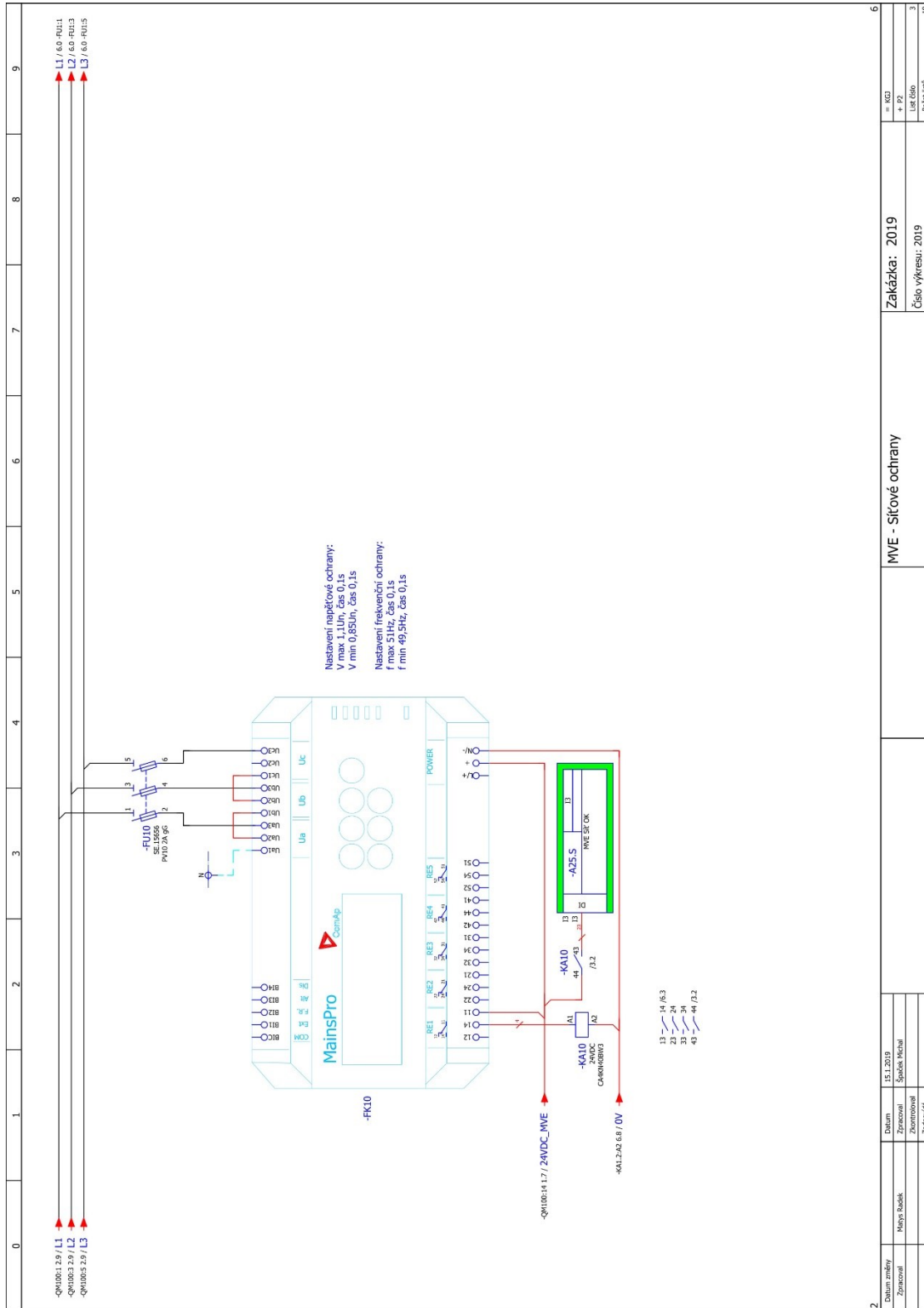
Ing. Michal Špaček

Disertační práce: Výzkum využití biomasy jako akumulární zdroj energie s aplikací na řízení kogeneračních jednotek

Příloha B

Spouštění asynchronního generátoru s malým rázem do elektrické sítě





2	Datum změny	15.1.2019	6
	Zpracoval	Zpracoval Špaček Michal	
	Navrhl	Navrhl Špaček Michal	
	Zkontroloval	Zkontroloval Zodpovědná	
	Zodpovědná	Zodpovědná	
MVE - Síťové ochrany		Zakázka: 2019	= K3 + P2 List číslo Počet listů
		Číslo výkresu: 2019	

