

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta elektrotechnická

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



David Janoušek

Řízení kogenerační jednotky ORC

Katedra měření

Vedoucí práce: Ing. Richard Šusta, Ph.D.





## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student:	<b>David Janoušek</b>
Studijní program:	<b>Kybernetika a robotika</b>
Obor:	<b>Senzory a přístrojová technika</b>
Název tématu česky:	<b>Řízení kogenerační jednotky ORC</b>
Název tématu anglicky:	<b>Control System for ORC Based Cogeneration Unit</b>

### Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujete experimentální mikrokogenerační jednotku na bázi ORC (Organický Rankinův cyklus) provozovanou na UCEEB ČVUT v Praze.
2. Stručně popište technologii ORC.
3. Proveďte rešerši možností řízení kogenerační jednotky.
4. Navrhněte řídicí program pro její automatický provoz s důrazem na diagnostiku poruch.
5. Popište řídicí systém, měřené veličiny a regulované prvky.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Vodička, V., Zelený, Z., Mascuch, J.: Provoz prototypu ORC pro využití průmyslového odpadního tepla na UCEEB ČVUT. In: ES 2016: 15. ročník konference Energetické stroje a zařízení, termomechanika & mechanika tekutin. 9. - 10. června 2016, Západočeská univerzita v Plzni [online]. [vyd. 18.10.2016]. Dostupné z [https://kke.zcu.cz/konference/historie/es\\_2016/sbornik\\_cz.html](https://kke.zcu.cz/konference/historie/es_2016/sbornik_cz.html)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Richard Šusta, Ph.D. (K 13135)

Datum zadání bakalářské práce: 16. ledna 2016

Platnost zadání do<sup>1</sup>: 30. září 2018

L. S.

Prof. Ing. Jan Holub, Ph.D.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 16. 1. 2017

<sup>1</sup> Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne.....

.....



## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Richardovi Šustovi, Ph.D. za vedení a poskytování cenných rad a věcných připomínek při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavovi Vodičkovi a Ing. Zbyňkovi Zelenému, kteří mi poskytli odborné vedení a umožnili, aby tato práce mohla vzniknout. Nakonec bych chtěl poděkovat všem přátelům, kolegům a ostatním za jejich podporu.





## Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a programováním řídicího programu pro kogenerační jednotku na bázi ORC (organický Rankinův cyklus). Regulátory pro veličiny vyskytující se v procesu ORC jsou také popsány. Dále je obsaženo vyhodnocování a diagnostika chyb, které mohou při řízení nastat. Výsledkem této práce je program, který umožňuje automatizované řízení mikroelektrárny zaměřené na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny.

**Klíčová slova:** kogenerační jednotka, CHP, ORC, PLC

## Annotation

This work is focused on design and programming of control program for cogeneration unit based on ORC (organic Rankine cycle). Regulators for variables occurring in the process of ORC are also described in this work. Evaluation and diagnostic of errors, which can happen while controlling are also contained in this work. The result of this work is a program, which allows automatically control micro-power plant focused on production of heat and power.

**Keywords:** cogeneration unit, CHP, ORC, PLC,



# Obsah

1. Úvod .....	1
2. Teoretická část - energetika .....	2
2.1 Energetické systémy .....	2
2.2 Kombinovaná výroba energií.....	3
2.3 Kogenerační jednotka .....	5
2.4 KJ s nepřímou přeměnou energetických zdrojů .....	7
2.5 KJ s přímou přeměnou energetických zdrojů.....	7
2.6 Primární jednotka.....	8
2.7 PJ s nepřímou přeměnou energie .....	8
2.8 PJ s přímou přeměnou energie.....	8
2.9 Organický rankinův cyklus.....	8
3. Teoretická část – řízení .....	9
3.1 Automatizace.....	9
3.2 Analogová hodnota a digitální stav.....	10
3.3 Vstupy a výstupy (V/V).....	10
3.4 Analogové a digitální V/V .....	10
3.5 Řídící jednotka.....	10
3.6 Software pro řízení.....	12
3.7 Programovací jazyk PLC.....	12
4. Studium kogenerační jednotky na UCEEB.....	13
4.1 Zařazení do energetického hospodářství .....	14
4.2 Typ kogeneračního systému .....	14
4.3 Identifikace kogenerační jednotky .....	14
5. Možnosti řízení kogenerační jednotky .....	16
5.1 Vhodný způsob řízení .....	16
5.2 Měřené veličiny a regulované prvky .....	17
6. Návrh řízení.....	18

6.1 Řídící systém .....	18
7. Návrh programu .....	20
7.1 Stav připraven .....	21
7.2 Stav najíždění .....	23
7.3 Stav provoz .....	27
7.4 Stav sjíždění .....	28
7.5 Diagnostika .....	30
8. Návrh regulátoru .....	33
8.1 Zjednodušený model soustavy .....	34
9. Závěr .....	36
10. Seznam použité literatury .....	37
11. Přílohy .....	38
11.1 Seznam obrázků .....	38
11.2 Seznam tabulek .....	39
11.3 Seznam rovnic .....	39
11.4 Seznam CD .....	39

# 1. Úvod

V dnešní době je důležitá otázka energetické účinnosti zařízení, které vyrábějí, respektive přeměňují energii. Toho si je vědoma Evropská unie, která v roce 2006 vydala akční plán [1]. Ten shrnuje stav hospodaření s energetickými zdroji a obsahuje návrhy na jeho zlepšení. Klíčovými body tohoto zlepšení je zvyšování energetické účinnosti produktů, které využívají zdroje energie, rozvoj služeb pro energetickou účinnost u konečného uživatele a zvyšování energetické účinnosti budov.

Dalším souvisejícím tématem dnešní doby je otázka obnovitelných zdrojů, které jsou mnohdy společností upřednostňovány. Například Evropská unie obnovitelné zdroje podporuje. V roce 2007 byl Evropskou komisí připraven pracovní plán [2] pro obnovitelné zdroje energie. Navrhuje se v něm posílení právních ustanovení k odstranění překážek integrace obnovitelných zdrojů do energetického systému EU. Doporučuje se v něm přezkoumat systém podpory pro obnovitelné zdroje energie a také využívat všech dostupných finančních nástrojů k jeho prosazování v EU i mimo ni.

Jedním z logických důsledků, které prosazování vyšší energetické účinnosti a obnovitelných zdrojů přináší, je tlak na omezení používání neobnovitelných zdrojů v oblastech, kde je možné použít zdroje obnovitelné, a také tlak na vyšší energetickou účinnost zařízení, které neobnovitelné zdroje energie používají.

Možným způsobem, jak zvýšit energetickou účinnost z hlediska využití primárních zdrojů, je kombinovaná výroba energií. Účinnost kombinované výroby totiž může převyšovat celkovou účinnost výroby oddělené [3], a to přestože dílčí účinnost u oddělené výroby bývá většinou vyšší. Zařízení, které umožňuje kombinovanou výrobu tepla a elektřiny, se nazývá kogenerační jednotka. Tato práce se zaměřuje na návrh řízení pro experimentální mikrokogenerační jednotku na bázi ORC [4] provozovanou v Laboratoři organických Rankinových cyklů a jejich aplikací (LORCA) na Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT. Zmíněná jednotka využívá pro výrobu elektřiny a tepla biomasu,

která se řadí do obnovitelných zdrojů. Řízení jednotky vyžaduje zpracování dat z velkého množství senzorů a s těmito daty provádět matematické výpočty v reálném čase. Zároveň se požaduje stabilita provozu a bezpečnost celého zařízení. Cílem této práce je především prostudovat funkci vyvíjené mikrokogenerační jednotky, popsat v ní použitou technologii ORC a navrhnout a naprogramovat pro ni automatizované řízení.

## 2. Teoretická část - energetika

Důležitost energetických zdrojů pro potřeby lidstva byla v minulosti mnohokrát prokázána. V dnešní době využíváme zdroj energie v průmyslu i v domácnosti. Za pomoci energetických zdrojů se přepravujeme v dopravních prostředcích, vzdáleně komunikujeme, můžeme připravit kvalitní zdravotní péči, atd. Snaha získávat energetické zdroje, přepravovat je a transformovat na konečnou (využitelnou) formu energie je zřejmá. Můžeme ji pochopit jako určitou formu hospodářství, jedná se zde o uspokojení poptávky spotřeby po určitém druhu zboží. Následující část se věnuje definici pojmů na základě odborné literatury. [3]

### 2.1 Energetické systémy

*Energetickém hospodářství (EH)* se skládá ze dvou částí. Těmito částmi jsou *energetický výrobní řetězec* a *vlastní spotřeba energetických zdrojů*. Zmíněné části zahrnují transformaci a dopravu *primárních energetických zdrojů (PZ)* ke spotřebiteli a následné využití *konečných energetických zdrojů (KZ)* spotřebitelem. Jedná se o činnosti, které můžeme rozdělit na [3]:

- *výrobu,*
- *dopravu,*
- *spotřebu.*

Výroba a doprava se uskutečňuje v *energetických systémech*, které můžeme dále rozdělit podle jejich rozlehlosti a vzdálenosti na [3]:

- *centralizované systémy – dálkové,*

- *decentralizované systémy – lokální.*

*Centralizované systémy (CS)* mají výhodu v podobě velkokapacitní výroby, ve které lze povětšinou dosáhnout vyšší účinnosti transformace. Další výhodou je, že se často nacházejí v blízkosti výskytu primárních energetických zdrojů a eliminuje se tak nutnost tyto zdroje přepravovat. [3]

*Decentralizované systémy (DES)* naopak nepotřebují přepravovat konečné energetické zdroje ke spotřebiteli, protože se většinou nachází v jeho blízkosti. To může mít výhodu v podobě velmi nízkých energetických ztrát vzniklých při dopravě, a také v podobě ochrany životního prostředí. [3]

Energetické systémy také rozdělujeme podle formy konečné energie nebo energetického zdroje, s kterým pracují. Systém pro výrobu elektrické energie nazýváme *elektrizační soustava (ES)*, systému pro zásobování plynými *plynofikační soustava (PS)*, systém pro dodávku tepla *teplofikační soustava (TS)*, atd. [3]

## ***2.2 Kombinovaná výroba energií***

„Kombinovaná výroba energií je společná (integrovaná), postupná nebo současná produkce konečných forem energií přeměněných z primární formy v transformačních řetězcích a připravených k využití u spotřebitele. Nejčastějšími formami koncových energií využívaných ve spotřebě je elektrická a tepelná energie, takováto výroba se nazývá *kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie (KVET, KV)* nebo *kogenerace*“ [3]. V angličtině se používá název *combined heat and power (CHP)*. [5]

Energetický systém, který umožňuje KVET, nebo-li kogeneraci, nazýváme *kogenerační systém (KS)*. KS zajišťuje výrobu a dopravu elektrické a tepelné energie. Tato výroba,

respektive transformace PZ na elektrickou a tepelnou energii, probíhá v energetickém zařízení (jednotce), kterou nejčastěji nazýváme *kogenerační jednotka (KJ)*. [3]

Kogenerační systémy dále rozdělujeme podle toho, v jakém pořadí dochází k produkci elektrické a tepelné energie na [3]:

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

Oba typy kogeneračních systémů nejprve určitým způsobem získávají teplo. Liší se však v pořadí využívání tohoto tepla. U horních kogeneračních systémů se nejprve získané teplo využije požadovaným způsobem spotřebitelem, a teprve poté se zbylé teplo použije k výrobě elektřiny. U dolních kogeneračních systémů je tomu naopak. Získané teplo je nejprve použito k výrobě elektřiny a následně je zbylé teplo využito požadovaným způsobem spotřebitelem. [3]

Častěji se používají dolní kogenerační systémy, protože k efektivní výrobě elektřiny je ve většině případech nutné dodávat vstupní látku o vysoké teplotě. [3]

Kogenerační systémy také rozdělujeme podle počtu transformací, které je nutné provést k přeměně PZ na KZ. Přeměna se provádí [3]:

- *přímým způsobem,*
- *nepřímým způsobem.*

U přímého způsobu je primární energetický zdroj přímo transformován na elektrickou energii. Na principu přímého způsobu transformace je založena technologie palivových článků. Zde se na základě elektrochemické reakce přímo získává elektrické napětí na elektrodách. [3]

U nepřímého způsobu je prováděno více kroků v průběhu celkové transformace. Primární energetický zdroj je nejprve transformován na tepelnou energii, a ta je následně



využita ke konání práce. Tuto práci nazýváme technická práce. Využíváme ji dále k mechanickému pohonu elektrického generátoru, který produkuje výslednou elektrickou energii. [3]

V obou případech, u přímého i nepřímého způsobu, je prvotní přeměna energie prováděna pomocí *primární jednotky (PJ)* nebo jinak *primárního motoru (PM)* a v obou případech je hlavním nebo vedlejším produktem této přeměny teplo. [3]

### ***2.3 Kogenerační jednotka***

Kogenerační jednotku můžeme principiálně popsat jako výrobu složenou ze [3]:

- *zařízení pro úpravu primárního zdroje energie (paliva),*
- *primární jednotky (primárního motoru),*
- *zařízení pro výrobu a úpravu elektrické energie,*
- *zařízení pro rekuperaci tepelné energie.*

Zařízení pro úpravu primárního zdroje energie zajišťuje potřebné parametry primárního energetického zdroje, respektive paliva. Může provádět [3]:

- *zušlechtění paliva,*
- *úpravy prvkového složení paliva,*
- *úpravy podmínek pro použití.*

Zušlechtění paliva zvyšuje jeho využitelnost, představuje dodatečné náklady. Úpravy prvkového složení paliva se provádí většinou za účelem odstranění nežádoucích látek z paliva, jako je třeba voda nebo síra. Úprava podmínek pro použití zajišťuje takové podmínky, při kterých je zisk energie z paliva optimální. Jedná se jak o způsob dopravy paliva, tak i o parametry, při kterých je energie z paliva uvolňována (tlak, teplota paliva). [3]

Primární jednotka je hlavní částí kogenerační jednotky a výrazně ovlivňuje možnost jejího použití. Obstarává přeměnu energie z paliva na ušlechtlejší formu energie (elektrickou, popřípadě mechanickou). Při této přeměně vzniká zbytkové teplo, které může být dále využito. Jako primární jednotka se nejčastěji používá [3]:

- *tepelný motor,*
- *palivový článek.*

Volba primární jednotky zásadním způsobem ovlivňuje celkovou účinnost výroby. Dalším činitelem, který má na účinnost výroby velký vliv je zařízení pro výrobu a úpravu elektrické energie. Může být tvořeno [3]:

- *elektrickým generátorem,*
- *elektrickým měničem.*

Elektrický generátor transformuje mechanickou energii vzniklou v tepelném motoru na elektrickou energii. Parametry získané elektrické energie se mohou lišit v závislosti na typu použitého generátoru. U menších výkonů kogenerační jednotky se používají asynchronní generátory. Pro možnost provozu bez spolupráce s vnější elektrizační soustavou se používají synchronní generátory. V některých případech, kdy se energie předává přímo do konkrétního elektrického zařízení, se používají stejnosměrné generátory. [3]

Elektrický měnič se používá v případě, že je potřeba měnit parametry elektrického proudu nebo napětí, jako je například jejich velikost, či frekvence, případně jejich typ, střídavý nebo stejnosměrný. [3]

Poslední částí kogenerační jednotky je zařízení pro rekuperaci tepelné energie, které umožňuje předávat vzniklé teplo požadovanému médiu v požadované teplotě. Nejběžnějšími používanými médii jsou [3]:

- *voda o teplotě do 100 °C,*

- voda o teplotě 150-200 °C,
- vodní pára,
- teplý vzduch.

## ***2.4 KJ s nepřímou přeměnou energetických zdrojů***

V případě nepřímé přeměny PZ na KZ je nejprve prováděna přeměna energie PZ na tepelnou energii v *tepelném zdroji (TZ)*. Technická práce může být získána pouze opakujícím se procesem, *tepelným oběhem (TO)* pracovní látky mezi TZ a *tepelným motorem (TM)*. Existují dva způsoby fungování TO. U prvního způsobu pracovní látka obíhá opakovaně, u druhého je neustále dodávána nová. Rozdělujeme tedy TO na [3]:

- *otevřené,*
- *uzavřené.*

Otevřené oběhy obsahují pracovní látky v plynném skupenství. Uzavřené oběhy využívají změny skupenství pracovní látky z plynného na kapalné a naopak. Uvolnění tepla z PZ probíhá buď mimo TM v samostatném TZ nebo může být součástí TM. V případě samostatného TZ je energie často předávána pracovní látce na výměníku. Z hlediska umístění TZ, resp. umístění spalovacího prostoru rozlišujeme TM se spalováním [3]:

- *vnitřním,*
- *vnějším.*

TM s vnitřním spalováním někdy označujeme jako spalovací motory. [3]

## ***2.5 KJ s přímou přeměnou energetických zdrojů***

Za přímou přeměnu energetických zdrojů je považována například obrácená elektrolýza vody [3]. Elektrochemickou reakcí mezi vodíkem a kyslíkem zde dochází k uvolnění elektronů, které nesou elektrický proud. [3]

## 2.6 Primární jednotka

Nejdůležitější částí kogenerační jednotky je *primární jednotka (PJ)*. Zde probíhá transformace primární energie na elektrickou. Hodnocení PJ má významný vliv na parametry celé KJ. Typ PJ se liší v závislosti na kogenerační technologii. [3]

## 2.7 PJ s nepřímou přeměnou energie

Účinnost PJ s nepřímou přeměnou energie se odvíjí od účinnosti TO. Pracovní látka TO prochází v PJ energetickými změnami. Po vstupu do TM se část energie pracovní látky transformuje na technickou práci. Zbylé teplo se může využít pro vnější tepelný okruh. Energetické hodnocení přeměny v TO je ovlivněno tepelnou účinností TM. Každý TO můžeme porovnat s ideálním *Carnotovým oběhem (CO)* a stanovit Carnotovu účinnost. [3]

## 2.8 PJ s přímou přeměnou energie

U PJ s přímou přeměnou energie nemůžeme stanovit Carnotovu účinnost, protože energie je transformována přímo, bez pomoci TO. Účinnost přeměny energie posuzujeme podle elektrické účinnosti, která je obvykle dána účinností elektrochemické reakce. [3]

## 2.9 Organický rankinův cyklus

Typickým představitelem PJ s vnějším spalováním jsou *parní turbíny (PaT)*. PaT využívají jako TO *Rankinův oběh (RC)*. Tepelná energie přivedená z TZ se předává vodě o vysokém tlaku. V parním generátoru pak dochází ke změně skupenství vody na páru. Páru využívá parní turbína, která pomocí její expanze vytváří technickou práci. Zbylá energie páry je odevzdávána v kondenzátoru nebo v tepelném výměníku. Teplo zde předané je většinou dále využito, třeba k vytápění objektů. [3]

*Organický Rankinův cyklus (ORC)* je založen na stejném principu jako RC. Liší se v použití pracovní látky. Místo vody zde obíhá organická sloučenina. Používat organické látky má své výhody při [3]:

- *nízkých teplotách,*
- *nízkých výkonech.*

Při nízkých teplotách se pracovní látka u RC během expanze dostává do oblasti mokrých par. To způsobuje brzdění proudu v turbíně. U ORC je možné tento problém řešit použitím organické látky, která se do oblasti mokrých par nedostává. [3]

Nízké výkony na turbíně komplikují expanzi páry. Z ekonomického hlediska a tepelných ztrát je při nízkých výkonech nevhodné používat vysoké otáčky turbíny. Poměr rychlosti otáčení lopatek k rychlosti proudění par by měl být přibližně konstantní. Voda má malou molekulární hmotnost a rychlost proudění je nepřímo úměrná druhé mocnině molekulární hmotnosti. U organických látek, resp. při použití ORC bývá molekulární hmotnost par vyšší a tím pádem nejsou potřeba tak vysoké otáčky. [3]

### 3. Teoretická část – řízení

Řízení obecně spočívá v nastavování parametrů nějakého systému, v našem případě konkrétně kogenerační jednotky. Pro řízení kogenerační jednotky je potřeba nastavovat parametry akčních členů v závislosti na informacích ze senzorů. Řízení musí probíhat automaticky, bez trvalé přítomnosti obsluhy. Takové řízení umožňuje automatizace. Následující část se věnuje definici pojmů na základě odborné literatury. [6]

#### *3.1 Automatizace*

*Automatizace* je použití logických programovacích instrukcí a mechanizovaného vybavení k nahrazení rozhodování a manuální práce člověka. Na rozdíl od mechanizace, automatizace výrazně redukuje potřebu člověka a jeho smyslů v procesu, současně optimalizuje produktivitu. [6]

### ***3.2 Analogová hodnota a digitální stav***

Jedním ze základních vlastností automatizované logiky je *digitální stav*. Kontakt může být sepnutý nebo rozepnutý, přepínač zapnutý nebo vypnutý. Stav mnoha elementů v automatizačním schématu může být reprezentován pomocí 1 nebo 0. Avšak některé vlastnosti nelze popsat takto jednoduše. Motor může být zapnutý nebo vypnutý, ale obsahuje také další parametry, jako například otáčky, které se vyjadřují numericky. Velikost otáček můžeme reprezentovat též jako *analogovou hodnotu* v definovaném rozsahu. [6]

### ***3.3 Vstupy a výstupy (V/V)***

Řízení systému vyhodnocuje vstupní informace a odpovídajícím způsobem nastavuje výstupní informace. Vstupní a výstupní informace může mít obecně libovolnou formu, například elektrický či pneumatický signál nebo textový řetězec a jiné typy dat. [6]

### ***3.4 Analogové a digitální V/V***

Analogovou hodnotu i digitální stav často vyjadřujeme formou elektrického napětí nebo proudu, kdy určitá velikost odpovídá konkrétní hodnotě nebo stavu. Analogová hodnota může nabývat v daném rozsahu nekonečně mnoha velikostí, digitálních stavů je vždy konečně mnoho. Pro účely počítačového zpracování často vyjadřujeme analogovou hodnotu v digitální formě. Provádíme kvantizaci, omezuje se rozsah a počet hodnot. Pomocí AD a DA převodníků zpracováváme a ovládáme analogové vstupy a výstupy. Digitální vstupy a výstupy můžeme realizovat na základě spínání a rozpínání kontaktů nebo také za pomoci elektrického signálu. [6]

### ***3.5 Řídící jednotka***

*Řídící jednotka* poskytuje potřebný výpočetní výkon, provádí výpočty a řídí vstupy a výstupy automatizovaného systému. Řízení může být realizováno jako: [6]

- *počítač,*
- *distribuovaný řídicí systém (DCS),*
- *programovatelný logický automat (PLC),*

- *vestavěný systém.*

Běžný osobní počítač není pro řízení vhodný. Pro spolehlivé řízení se používá hardware, označený jako průmyslový počítač. Takový počítač splňuje podmínky definovaných norem pro použití do průmyslového prostředí. Zajišťuje potřebnou spolehlivost a odolnost.

Distribuované řídicí systémy se používají ve velkých průmyslových komplexech, například v petrochemickém průmyslu v ropných rafinériích. Typickou částí DCS je regulační smyčka obsahující řídicí jednotku, senzor a akční člen. DCS mohou obsahovat mnoho regulačních smyček s V/V zařízeními distribuovanými polohou nebo funkcemi ovládanými lokálně řídicí jednotkou nebo vzdáleně prostřednictvím sítě. Vzhledem k tomu, že každé zařízení musí být schopné komunikovat, DCS bývají finančně nákladné. [6]

V průmyslové automatizaci je velice rozšířeno používání *programovatelných logických automatů (PLC)*. PLC se vyrábí v mnoha provedeních a má řadu výhod z hlediska řízení. Bývá přímo navržen pro ovládání více analogových a digitálních V/V a většinou umožňuje použití ve velkém teplotním rozsahu. Obvykle má také vyšší odolnost proti elektrickému rušení i mechanickým vibracím. Program PLC může být uložen v paměti typu nonvolatile zálohované baterií. Jeho vykonávání probíhá v reálném čase a reakce na vstupní podmínky bývá zaručena v určitém čase. PLC je vybaveno do ztížených prostředí, odolné vůči prachu, vlhku, horku, mrazu, atp. [6]

Vestavěné systémy jsou obvykle součástí celého zařízení včetně hardwaru a mechanických částí. Na rozdíl od počítače, vestavěné systémy bývají úzce zaměřené na daný problém, například ovládání bankomatu. Komponenty vestavěného počítače jsou většinou podobné komponentám v klasickém počítači s výjimkou těch určených k fungování v reálném čase. Jádro operačního systému může obsahovat programové části schopné zajistit ovládání V/V v reálném čase. [6]

### *3.6 Software pro řízení*

Chování řídicí jednotky určuje její software. Kromě toho je software používán také pro návrh a dokumentaci. Programovací jazyk pomocí kterého je software tvořen může být různý, například BASIC, C, reléové schéma nebo různé jazyky specifické pro výrobce dané řídicí jednotky. Panely operátora, které jsou většinou grafické se pak programují pomocí tlačítek, textových kolonek, přepínačů, apod. [6]

Programování zahrnuje návrh, tvorbu kódu, ladění a údržbu programu, který je tvořen sadou instrukcí. Instrukce říkají procesoru jaké kroky má vykonávat. Zapisujeme je v kódu programu a ten zpravidla rozdělujeme podle jazyka na: [6]

- *nízkoúrovňový,*
- *vysokoúrovňový.*

### *3.7 Programovací jazyk PLC*

Programovací jazyk PLC se typicky odlišuje od klasických programovacích jazyků, bývá úzce zaměřený na ovládání V/V. V minulosti bylo běžné, že si jazyk kompletně navrhoval sám výrobce PLC. Až v roce 1993 vznikla norma IEC 61131, kterou většina výrobců integrovala. Její třetí část popisuje základní programovací jazyky PLC: [6]

- *reléové schéma (LD),*
- *jazyk funkčních bloků (FBD),*
- *jazyk mnemokódů (IL),*
- *strukturovaný text (ST),*
- *jazyk sekvenčního programování (SFC).*

Reléové schéma LD je grafická reprezentace fyzického zapojení reléových kontaktů. Jazyk vzniknul odvozením od řízení pomocí relé. Program se skládá z horizontálních čar, které



představují elektrický okruh po stranách uzavřený vertikálními čarami. Do okruhu jsou vkládány vstupy, výstupy, kontakty, časovače, čítače a různé operace s daty. [6]

Jazyk funkčních bloků FBD používá boxy a čáry mezi nimi, které indikují tok programu pomocí šipek. Jazyk mnemokódů IL je nízkoúrovňový textový jazyk podobný jazyku symbolických adres. Oproti tomu strukturovaný text ST je vysokoúrovňový jazyk založený na jazyku PASCAL. Posledním jazykem v normě je jazyk sekvenčního programování SFC, který využívá aktivních a neaktivních kroků, povolených a zakázaných přechodů mezi nimi a akcí k němu přidružených. [6]

## 4. Studium kogenerační jednotky na UCEEB

Experimentální mikrokogenerační jednotka WAVE (dále jen WAVE) je v současné době umístěna v laboratoři LORCA (Laboratoř organických Rankinových cyklů a jejich aplikací) na UCEEB (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov) ČVUT.



Obrázek 1 – Experimentální mikrokogenerační jednotka WAVE

## ***4.1 Zařazení do energetického hospodářství***

Z hlediska energetického hospodářství se WAVE řadí do oblasti decentralizovaných energetických systémů. Je schopná dodávat energii přímo v místě spotřebitele. Energetické ztráty při dopravě konečného energetického zdroje, respektive tepla a elektřiny ke spotřebiteli jsou proto minimalizovány. Jako primární energetický zdroj je použita dřevěná štěpka, což přináší nevýhodu v podobě nutnosti její pravidelné dodávky. Naopak výhodou je, že WAVE z principu kogeneračního systému funguje jako elektrizační i teplofikační soustava, tzn. je možné v místě spotřebitele vytvořit ostrovní systém nezávislý na vnějších energetických soustavách. Důvodem, proč se používá dřevěná štěpka je nízká cena, jedná se velmi levný zdroj energie.

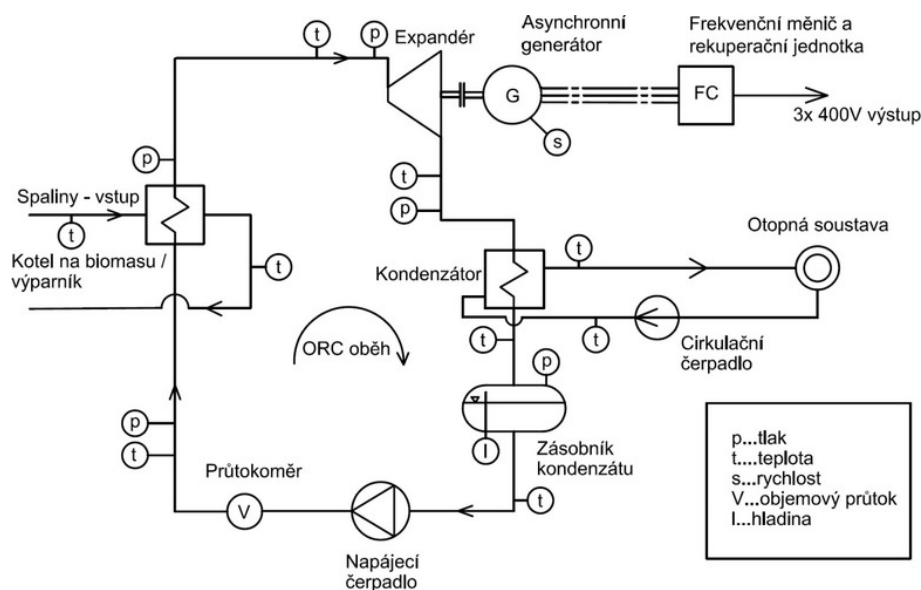
## ***4.2 Typ kogeneračního systému***

Mikrokogenerační jednotka WAVE využívá vysokého tepelného potenciálu pracovní látky k produkci elektrické energie a po jeho snížení také k produkci tepelné energie. Funguje, jako většina kogeneračních jednotek, na principu dolního kogeneračního systému. V primárním motoru, respektive v ohništi, začíná nepřímá transformace primárního zdroje, dřevěné štěpky, ze které je uvolněna tepelná energie. V praxi to znamená její zapálení a odvod vzniklého tepla. Teplo se částečně mění v mechanickou práci a ta následně v generátoru na elektrickou energii. Zbylé teplo je dodáváno spotřebiteli, na UCEEB konkrétně do tepelného okruhu budovy.

## ***4.3 Identifikace kogenerační jednotky***

Vzhledem k orientaci WAVE na malé spotřebitele a z toho vyplývajícího zařazení do nižší cenové kategorie, není použito zařízení pro úpravu primárního zdroje energie. Dřevěná štěpka před spálením není dále upravována. Dodatečné náklady, které by vznikly, nejsou v tomto okamžiku dostatečně opodstatněné. Palivo je skladováno v násypce, ze které je nahnováno do kotle pomocí šnekového dopravníku. V ohništi kotle dochází ke spalování paliva. Spalovací proces je podporován dvěma hořákovými ventilátory.

WAVE využívá jako teplotní oběh Organický Rankinův cyklus. Pracovní látkou je organická sloučenina, Hexamethyldisiloxan.



Obrázek 2 – Schéma tepelného oběhu ORC [4]

Tepelná energie uvolněná z dřevěné štěrky v ohništi je přiváděná do výparníku v podobě horkých spalin s využitím spalinového ventilátoru. Teplota spalin je regulována pomocí spalinové klapky. Na výparníku je tepelná energie předávána pracovní látce, která proudí v tepelném oběhu mezi tepelným zdrojem (kotlem) a tepelným motorem (expandérem). Pracovní látka je čerpána ze zásobníku napájecím čerpadlem, přičemž se kontroluje průtok. Tepelný oběh je uzavřený, pracovní látka neuniká ven a využívá se vnějšího spalování. Jakmile se pracovní látka zahřeje na pracovní teplotu, přivádí se do lamelového expandéru. V něm dochází k expanzi, při které se koná technická práce. V průběhu expanze se kontroluje admisní a emisní teplota i tlak.

Zařízení pro výrobu elektrické energie je tvořeno asynchronním elektrickým generátorem, který transformuje mechanickou energii z lamelového expandéru na elektrickou energii dodávanou do elektrické sítě. Spotřebovaná a vyrobená elektřina je zaznamenávána elektroměrem. Otáčky generátoru jsou sledovány senzorem a regulovány pomocí frekvenčního měniče.

Zařízení pro rekuperaci tepelné energie představuje kondenzátor. Pára proudí do kondenzátoru z lamelového expandéru. Při kondenzaci zde předává teplo otopné vodě. V laboratoři LORCA je používána voda o teplotě do 100°C. Kondenzační tlak je upravován pomocí trojcestného ventilu. Teplota vody je zaznamenávána s využitím senzoru teploty na vstupu i výstupu otopné vody.

## 5. Možnosti řízení kogenerační jednotky

Kogenerační jednotka WAVE se v průběhu vykonávání své funkce nachází v různých stavech. Obecně můžeme definovat dva stavy:

- *provozní stav,*
- *neprovozní stav.*

Ve svém provozním stavu pracuje v určitém rozmezí tlaků, teplot, atd. V neprovozním stavu se nachází mimo tyto rozmezí. Pro správnou funkci je potřeba KJ uvést do provozního stavu a udržovat ji v něm. Toho lze dosáhnout pomocí automatizovaného řízení na základě V/V.

V průběhu řízení se KJ dále nachází v různých mezistavech a přechází mezi nimi. Řídící jednotka musí být schopna optimálně řídit přechod mezi těmito stavy a také v nich případně zajistit setrvání. K tomu je zapotřebí obsluhovat všechny instalované V/V, dostatečně rychle reagovat a mít paměťové prostředky pro zpracování všech důležitých informací.

### 5.1 Vhodný způsob řízení

Vhodným a široce používaným způsobem řízení v průmyslu je řízení za pomoci programovatelného logického automatu. PLC je uzpůsobeno pro ovládání V/V, splňuje náročné standardy pro průmysl a je schopné fungovat v reálném čase. Jeho spolehlivost byla v praxi mnohokrát ověřena.

## 5.2 Měřené veličiny a regulované prvky

Pro řízení WAVE je potřeba zpracovávat data ze senzorů a ovládat akční členy, které jsou popsány v tabulce níže.

Akční členy, které obsahují trojfázový motor, napájecí čerpadlo, spalínový ventilátor, šnekový dopravník a generátor jsou ovládány pomocí frekvenčních měničů. Ty zajišťují jejich správný výkon a otáčky. Pro WAVE jsou použity frekvenční měniče od firmy Delta Electronics fungující na principu IGBT tranzistorů. Pro generátor je také použita AFE (Active front end) jednotka od stejné firmy. Ta umožňuje dodávat vyrobenou elektřinu zpět do elektrické sítě.

Číslo	Název	Identifikátor	Typ	Veličina	Jednotka
1.	Admisní tlak	P_AD	Senzor	Tlak	Pa
2.	Emisní tlak	P_EM	Senzor	Tlak	Pa
3.	Kondenzační tlak	P_KD	Senzor	Tlak	Pa
4.	Tlak za napájecím čerpadlem	P_NC	Senzor	Tlak	Pa
5.	Tlak spalin	P_SP	Senzor	Tlak	Pa
6.	Tlak v ohništi	P_OHN	Senzor	Tlak	Pa
7.	Admisní teplota	T_AD	Senzor	Teplota	°C
8.	Emisní teplota	T_EM	Senzor	Teplota	°C
9.	Kondenzační teplota	T_KD	Senzor	Teplota	°C
10.	Teplota u napájecího čerpadla	T_NC	Senzor	Teplota	°C
11.	Teplota vstupní chladicí vody	T_WI	Senzor	Teplota	°C
12.	Teplota výstupní chladicí vody	T_WO	Senzor	Teplota	°C
13.	Teplota výstupních spalin	T_SPO	Senzor	Teplota	°C
14.	Teplota vstupních spalin první	T_SP1	Senzor	Teplota	°C
15.	Teplota vstupních spalin druhá	T_SP2	Senzor	Teplota	°C
16.	Průtok	prutok	Senzor	Objem/Čas	l/m
17.	Spotřeba elektřiny	E_S	Senzor	Výkon/Čas	kW/h
18.	Výroba elektřiny	E_V	Senzor	Výkon/Čas	kW/h
19.	Měřené otáčky generátoru	otacky_GN	Senzor	Počet/Čas	n/m
20.	Nastavené otáčky generátoru	GN	Akční člen	Počet/Čas	n/m
21.	Otáčky napájecího čerpadla	NC	Akční člen	Procenta	%
22.	Otáčky spalínového ventilátoru	SV	Akční člen	Procenta	%
23.	Otáčky šnekového dopravníku	SM	Akční člen	Procenta	%
24.	Otáčky hořákového ventilátoru 1	HV1	Akční člen	Procenta	%
25.	Otáčky hořákového ventilátoru 2	HV2	Akční člen	Procenta	%
26.	Poloha spalínové klapky	SK	Akční člen	Procenta	%
27.	Poloha trojcestného ventilu	V3	Akční člen	Procenta	%

Tabulka 1 – Měřené veličiny a regulované prvky

Senzory předávají informaci na základě:

- *napětí 0 - 10V,*
- *proudu 4 - 20mA,*
- *změny odporu (PT100 senzor)*
- *rozdílového napětí (termočlánek),*
- *pulsního signálu (elektroměr),*

Akční členy jsou ovládány na základě:

- *napětí 0 - 10V,*
- *frekvenčního měniče.*

## 6. Návrh řízení

Po dohodě mezi pracovníky LORCA bylo PLC zvoleno jako řídicí jednotka. Na základě cenových nabídek a dostupných modelů byla společnost Delta Electronics zvolena jako hlavní dodavatel řídicí elektroniky. Tato část se zabývá popisem použitých prvků řízení.

### 6.1 Řídicí systém

Jako hlavní jednotka celého řízení je použito PLC Delta DVP-SV2. Tento model je nejvyšší z řady S a poskytuje až 30 000 kroků programu, 12 000 datových slov úložiště a nejvyšší rychlost scan cyklu z produktové řady S. Programuje se nejčastěji pomocí reléových schémat. Použitý typ poskytuje v základním provedení 16 digitálních vstupů a 12 reléových výstupů. Počet V/V lze rozšířit pomocí externích modulů, které se připojují na sběrnici. Vzhledem k senzorům a akčním členům z tabulky 1 bylo nutné pořídit několik externích modulů, jejich soupis je obsažen v následující tabulce.

Číslo	Název	Typ	Funkce
1.	Power supply module	DVPPS0X	24V
2.	Functional PLC	DVP28SV11S2	PLC
3.	Digital module	DVP16SP11R	8DI/8RO
4.	Digital module	DVP16SP11R	8DI/8RO
5.	Analog I/O Module	DVP04AD-S	4AI
6.	Analog I/O Module	DVP04AD-S	4AI
7.	Analog I/O Module	DVP04AD-S	4AI
8.	Temperature Measurement Module	DVP04PT-S	4PT100
9.	Temperature Measurement Module	DVP04PT-S	4PT100
10.	Temperature Measurement Module	DVP04TC-S	4TC
11.	Analog I/O Module	DVP04DA-S	4AO
12.	Analog I/O Module	DVP04DA-S	4AO

Tabulka 2 – Soupis řídicí elektroniky

Celkově je použita řídicí elektronika schopná obsloužit:

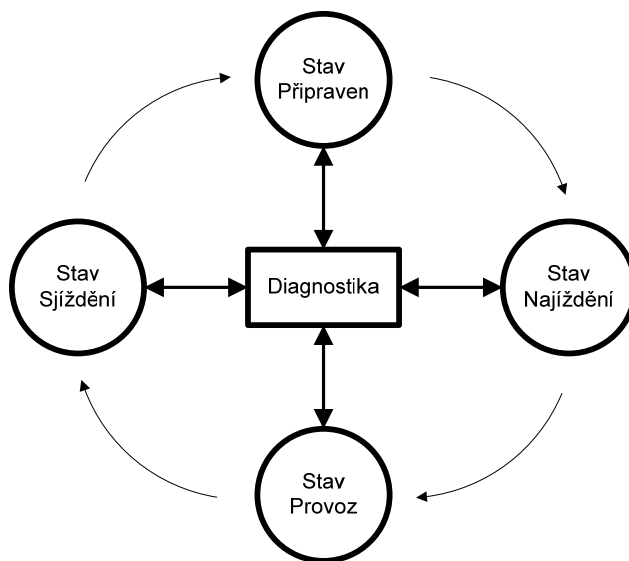
- 32 digitálních vstupů (*DI*),
- 28 reléových výstupů (*RO*),
- 12 analogových vstupů (*AI*),
- 8 analogových výstupů (*AO*),
- 8 vstupů teplotních čidel (*PT100*),
- 4 vstupy termočlánků (*TC*).

## 7. Návrh programu

Celé řízení bylo z návrhového hlediska rozděleno na dvě části:

- *hlavní program,*
- *diagnostika.*

Hlavní program se stará o správnou funkci KJ. Obsluhuje zařízení v případě, že všechny senzory a akční členy fungují správně, tzn. řízené veličiny se nacházejí uvnitř definovaných mezí a řízené V/V posílají a přijímají korektní signály. Diagnostika běží paralelně s hlavním programem a vstupuje do řízení v případě poruchy. Pokud nastane porucha, diagnostika indikuje chybu a podle její závažnosti může začít s fází odstavení zařízení.



Obrázek 3 – Schéma přechodu mezi stavy

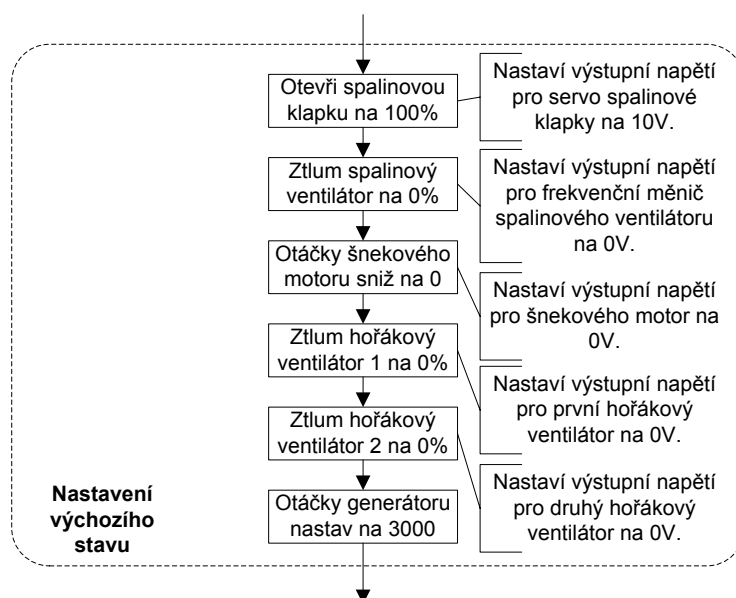
Hlavní program je rozdělen do čtyř stavů a přechodů mezi nimi, přičemž stavy připraven, najíždění a sjíždění jsou neprovozní a stav provoz je provozní, viz. kapitola 5. Na začátku se zařízení nachází ve stavu připraven. Povel přechází do stavu najíždění, ve kterém se zapíná. Po určité době se dostává do stavu provoz, ve kterém setrvává. Povel je možné přejít do stavu sjíždění, kde se zařízení vypíná. Po dokončení tohoto stavu se hlavní program přesune zpět do stavu připraven. V případě poruchy v jakémkoli stavu může diagnostika



převzít řízení, upravit výstupní hodnoty akčních členů a přesunout hlavní program do libovolného stavu, nejčastěji však do stavu sjíždění.

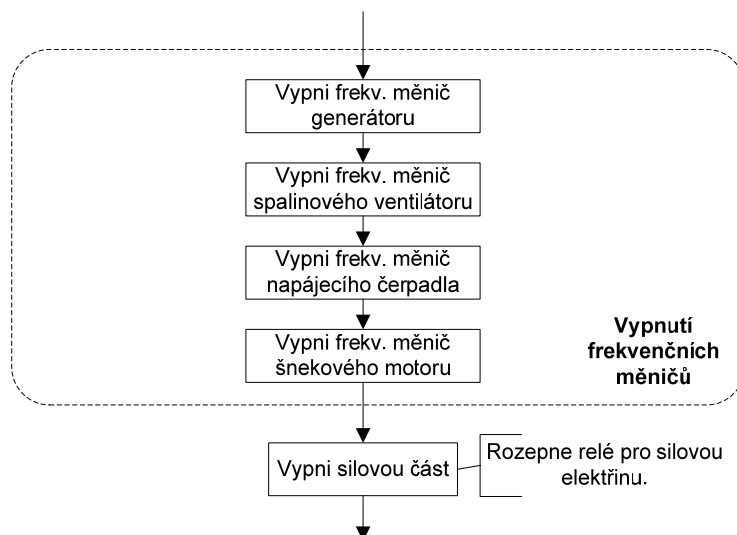
## 7.1 Stav připraven

Po zapnutí řídicí jednotky a inicializaci programu se zařízení dostává do stavu připraven. Nastavují se akční členy na výchozí hodnoty. Otevírá se spalínová klapka a připravují se výchozí otáčky na frekvenčním měniči generátoru. Zároveň se vypínají ventilátory, které mohly být zapnuté v předchozích stavech. Pro jistotu jsou otáčky šnekového dopravníku sníženy na 0. V tomto okamžiku by však už měl být šnekový motor zastavený.



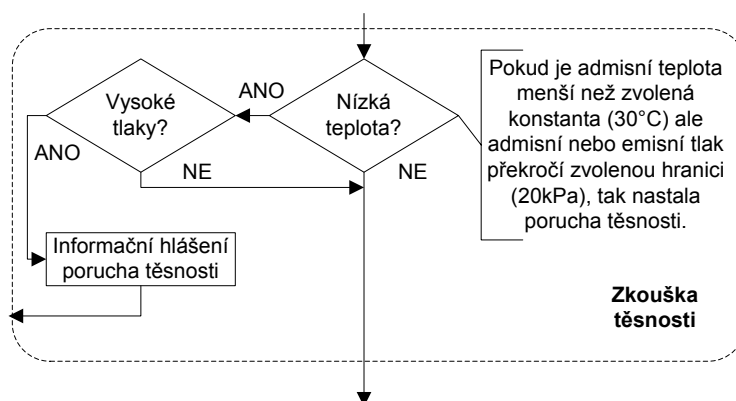
Obrázek 4 – Nastavení výchozího stavu pro připravenost

Frekvenční měniče generátoru, ventilátoru, čerpadla i šnekového dopravníku by v tomto okamžiku také měly být vypnuté. Přesto nelze vyloučit, že diagnostika přejde do stavu připraven z neočekávaného stavu a proto jsou vykonány instrukce pro jejich vypnutí. Ze stejného důvodu je vypnuta také silová elektřina.



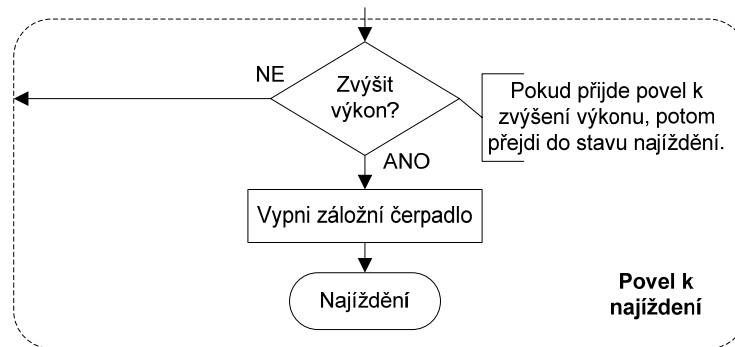
Obrázek 5 – Vypnutí frekvenčních měničů a silové části

Před přechodem do stavu najíždění je užitečné mít zkontrolovanou těsnost zařízení a v případě nízké teploty a vysokých tlaků hlásit poruchu operátorovi.



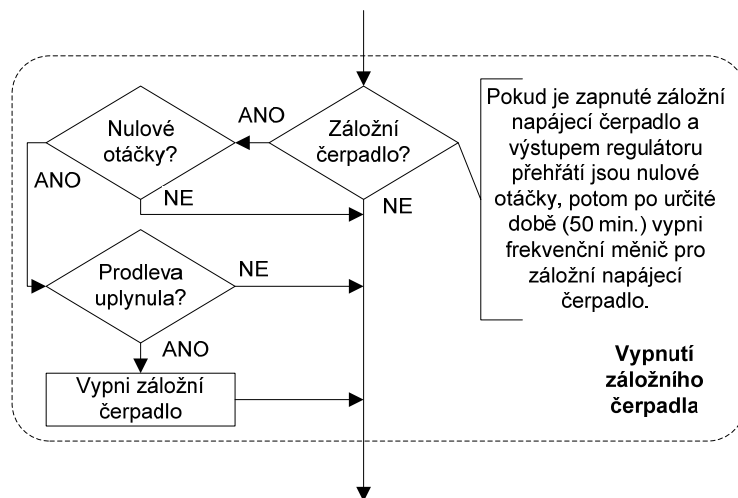
Obrázek 6 – Zkouška těsnosti

V tomto okamžiku by zařízení mělo být připravené na přechod do stavu najíždění. K tomu je nutný povel operátora k zvýšení výkonu. Jakmile přijde povel, dojde k vypnutí záložního čerpadla a program se přesune do stavu najíždění.



Obrázek 7 – Povel k najíždění

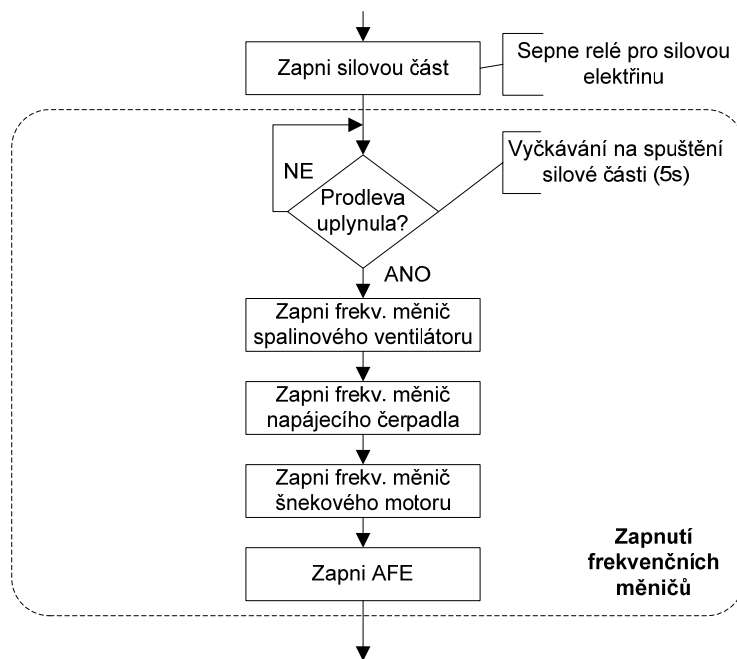
Pro doběh generátoru ve stavu sjíždění je z důvodu úspory energie zapnuto záložní čerpadlo, které je napájeno ze záložního zdroje napájení, není připojeno v silové části. Záložní čerpadlo by se mělo v případě nulových otáček generátoru po stanovené době vypnout. Kvůli tomu, aby program nesetrvával ve stavu sjíždění, probíhá jeho kontrola na začátku stavu připraven.



Obrázek 8 – Vypnutí záložního čerpadla

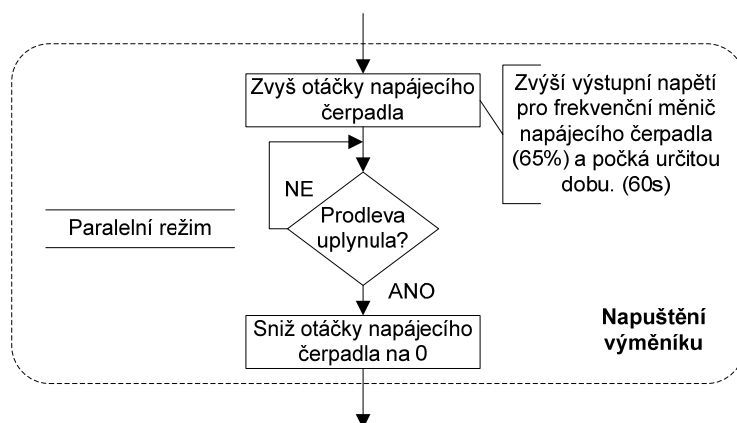
## 7.2 Stav najíždění

Pro najíždění je nutné zapnout silovou část, která napájí frekvenční měniče. Jelikož po zapnutí napájení frekvenčních měničů chvíli trvá jejich inicializace, je nutné před jejich samotným zapnutím (povelem RUN) chvíli počkat. Zároveň s nimi se zapíná také AFE (Active front end) jednotka, která umožňuje spuštění generátorového režimu.



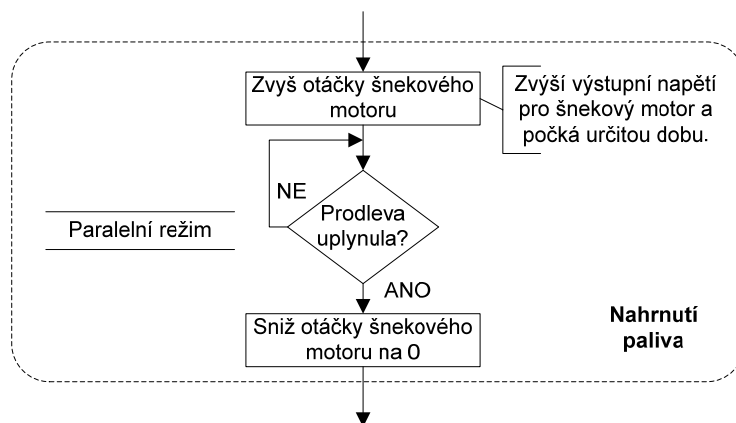
Obrázek 9 – Zapnutí frekvenčních měničů

Po zapnutí frekvenčních měničů je již možné ovládat akční členy. Začíná se s napuštěním výměníku, což vyžaduje načerpání pracovní látky.



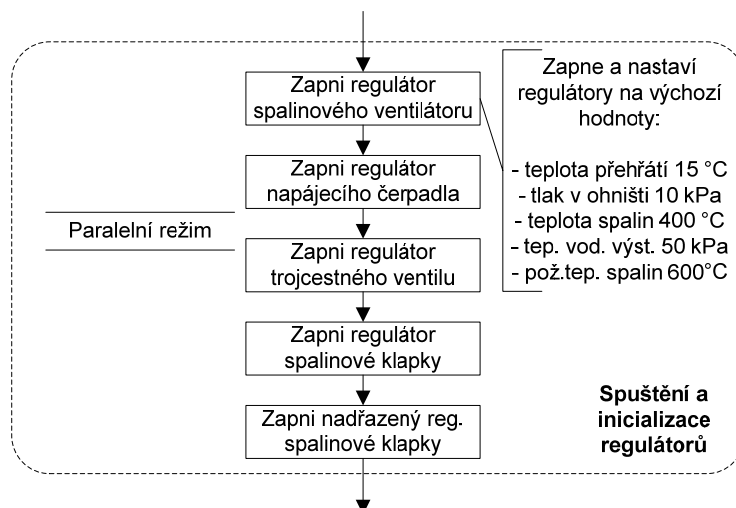
Obrázek 10 – Napuštění výměníku

Paralelně s tím se nahrnuje palivo z násypky do ohniště. Nahrnování zajišťuje šnekový dopravník. Přesné otáčky si reguluje operátor v závislosti na použitém palivu, v případě dřevěné štěpky také může záležet na její vlhkosti.



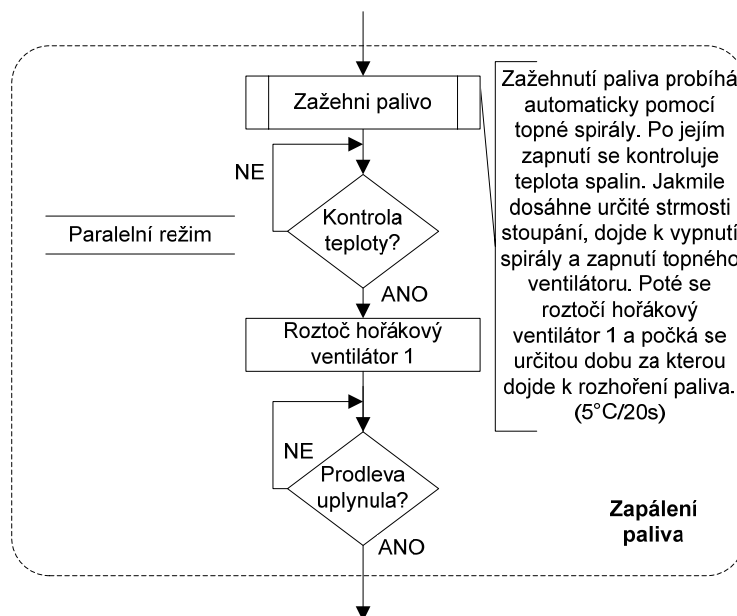
Obrázek 11 – Nahrnutí paliva

Zároveň s nahrnováním paliva se také spouštějí regulátory, které jsou nastavené na výchozí hodnoty.



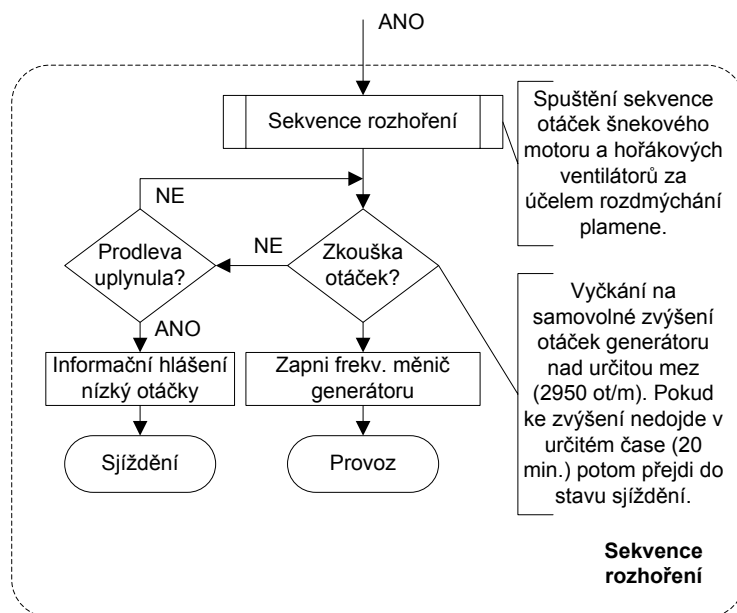
Obrázek 12 – Spuštění a inicializace regulátorů

Nakonec je potřeba zapálit palivo nahrnované šnekovým dopravníkem. Zapalování může probíhat paralelně s nahrnováním a tím pádem se proces urychlí. Palivo je zapáleno pomocí topné spirály, kterou je nutné chladit. K chlazení slouží topný ventilátor, který se spustí spolu s topnou spirálou a vypne se až po určité době od vypnutí spirály. K zapálení nedojde ihned, program musí rozpoznat okamžik, kdy vznikne plamen. Toho je docíleno pomocí kontroly teploty, kdy při určité hodnotě je zřejmé, že palivo začalo hořet. Poté dojde k sepnutí hořákového ventilátoru a vyčká se určitou dobu.



Obrázek 13 – Zapálení paliva

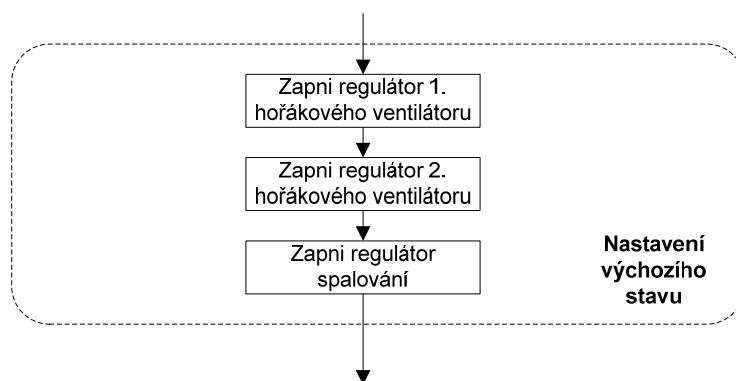
Po zapálení paliva je nutné rozdmýchat plamen. K tomu slouží sekvence rozhoření. Zde dochází k střídání přímého a zpětného chodu motoru šneku při různých otáčkách. Dále se zesiluje výkon druhého hořákového ventilátoru a poté co je sekvence dokončena se přepokládá, že palivo hoří silným plamenem. Pokud se tak stalo, expandér začne roztáčet generátor. Otáčky se začnou zvyšovat. Jakmile se přiblíží synchronním, dojde k zapnutí frekvenčního měniče a přifázování na frekvenci síťového napětí. Poté se program přepne do stavu provoz.



Obrázek 14 – Sekvence rozhoření

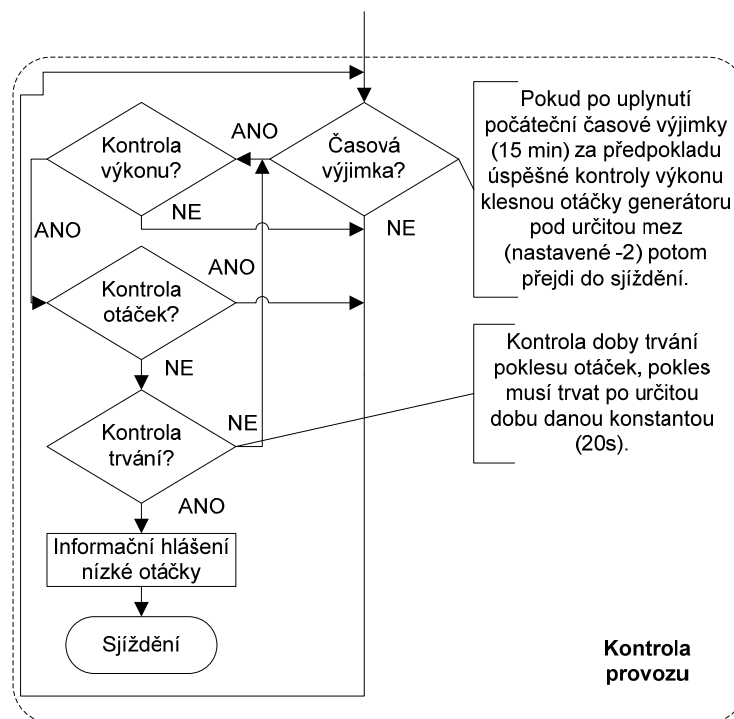
### 7.3 Stav provoz

Po přechodu do stavu provoz dojde k nastavení výchozího stavu hořákových ventilátorů a ke spuštění regulátoru spalování. Regulátor spalování ovládá šnekový dopravník a zajišťuje dostatečný přísun paliva. Hořákové ventilátory jsou zapnuty.



Obrázek 15 – Nastavení výchozího stavu pro provoz

Nyní je zařízení v provozním stavu a úloha programu teď spočívá v monitorování veličin. V první řadě se kontroluje výkon spočítaný na základě skluzu asynchronního motoru s výkonem spočítaným na základě admisní a emisní teploty. Pokud se tyto dva výkony zásadním způsobem liší, pravděpodobně došlo k poruše a diagnostika převezme řízení. Jestliže jsou výkony v pořádku, ale klesli otáčky, pak to nejspíše znamená zastavený přívod paliva a tím pádem i povel k zastavení jednotky. Pro případ krátkodobého poklesu otáček je implementována ochrana v podobě minimální doby, po kterou musí pokles otáček trvat, aby program přešel do stavu sjíždění. Před přechodem do stavu sjíždění se čeká na dotočení generátoru na lehce podsynchronní otáčky.



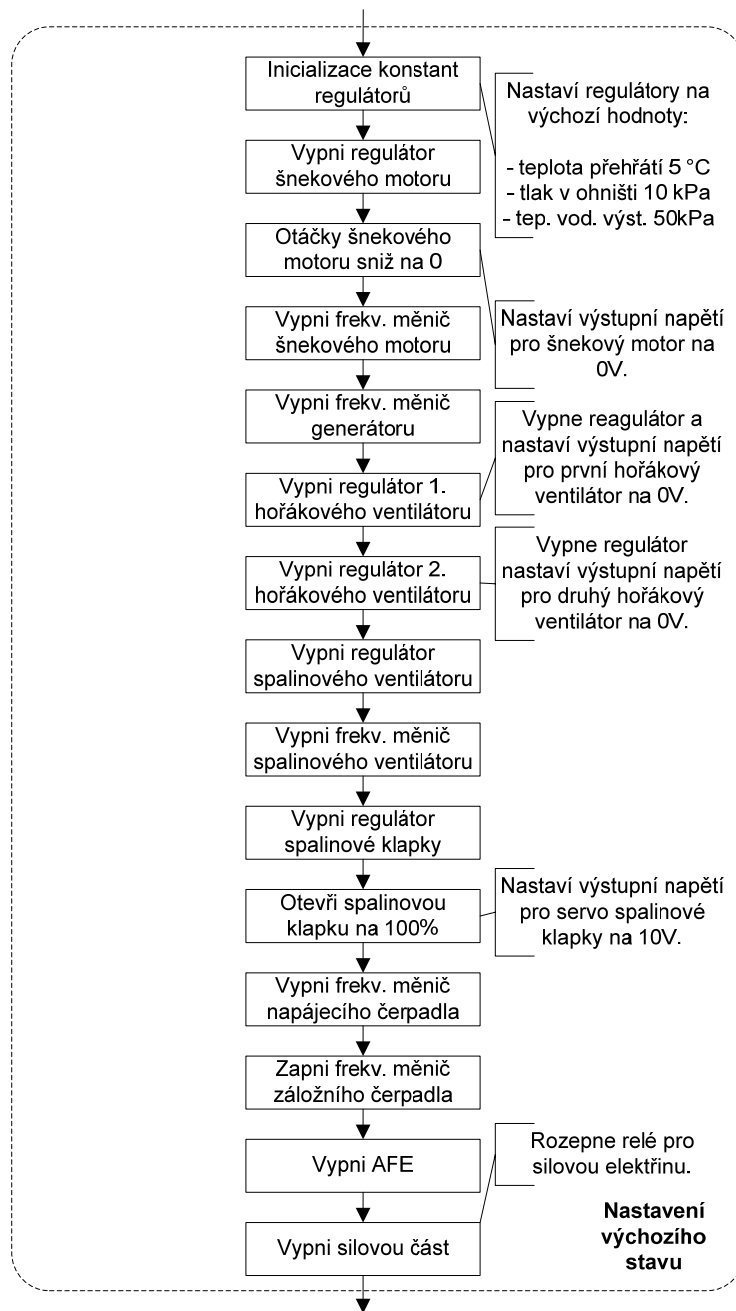
Obrázek 16 – Kontrola provozu

## 7.4 Stav sjíždění

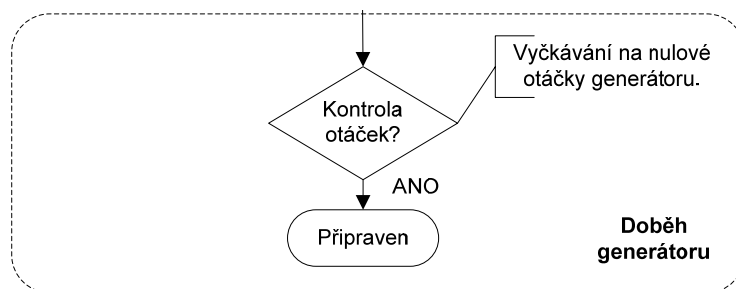
Ve stavu sjíždění dochází k téměř okamžitému vypnutí všech akčních členů. Regulátory se vracejí do výchozích hodnot a vypínají se. Dále se vypínají frekvenční měniče včetně AFE. Napájecí čerpadlo je nahrazeno záložním. Spalinová klapka se úplně otvírá. Nakonec se vypíná silová část. Vypnutí silové části není nutné. Existuje i možnost nechat běžet hlavní napájecí čerpadlo. Nicméně příkon všech spotřebičů připojených v silové části je vysoký. Zejména tlumivka a filtr elektromagnetické interference jsou náročné na spotřebu elektrické energie. Z hlediska úspory energie se vyplatí zapnout frekvenční měnič záložního čerpadla, který je připojen mimo silovou část.

Po nastavení výchozího stavu pro sjíždění se čeká na doběh generátoru. Kontrolují se jeho otáčky a v okamžiku, kdy klesnou na nulu, program přechází do stavu připraven.





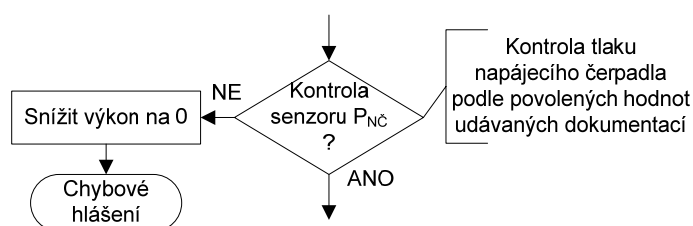
Obrázek 17 – Nastavení výchozího stavu pro sjíždění



Obrázek 18 – Doběh generátoru

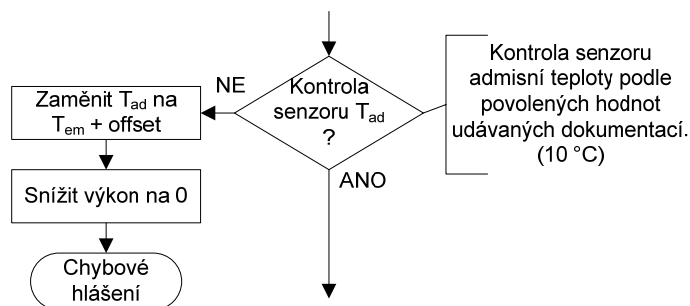
## 7.5 Diagnostika

Hlavním úkolem programu diagnostiky je odhalit poruchy na zařízení a včas reagovat upozorněním operátora nebo zásahem do řízení. Každý senzor připojený do řídicí jednotky musí dávat signál s určitými parametry, závislými na typu komunikace a rozsahem hodnot, ve kterém senzor měří. Tyto parametry jsou udávány v dokumentaci senzoru nebo v dokumentaci zařízení, které signál zpracovává. Například, pokud je tlakový senzor připojený přes standardní proudovou smyčku 4 – 20mA, hodnota pod 4mA znamená jeho poruchu. Všechny senzory jsou tímto způsobem neustále kontrolovány.

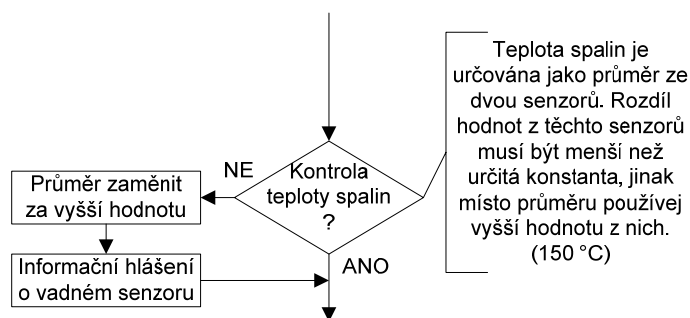


Obrázek 19 – Kontrola senzoru tlaku u napájecího čerpadla

Některé senzory jsou natolik důležité, že v případě poruchy je nutné veličinu, kterou měří, odhadovat na základě hodnoty z jiného senzoru. V takovém případě dojde k nahrazení měřené veličiny výpočtem z jiné naměřené veličiny.

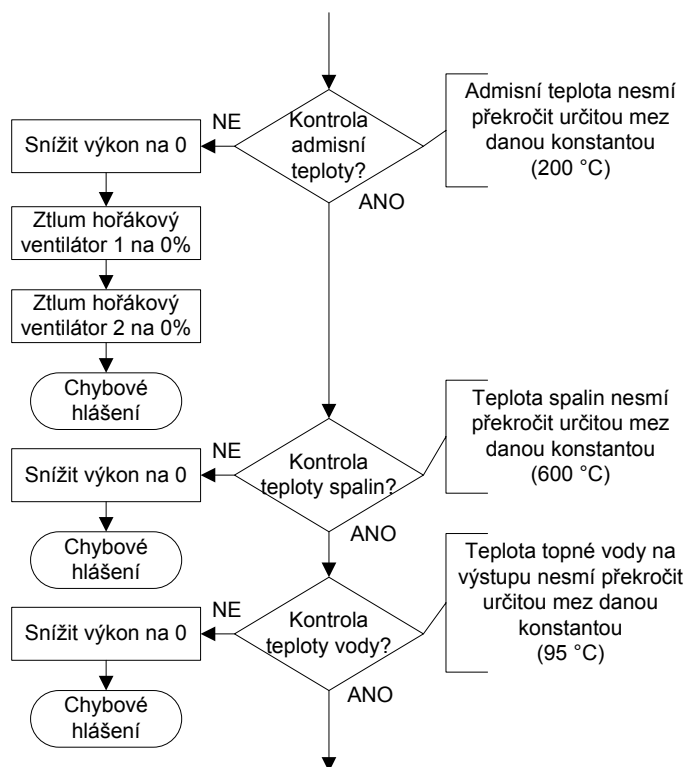


Obrázek 20 – Kontrola senzoru admisní teploty



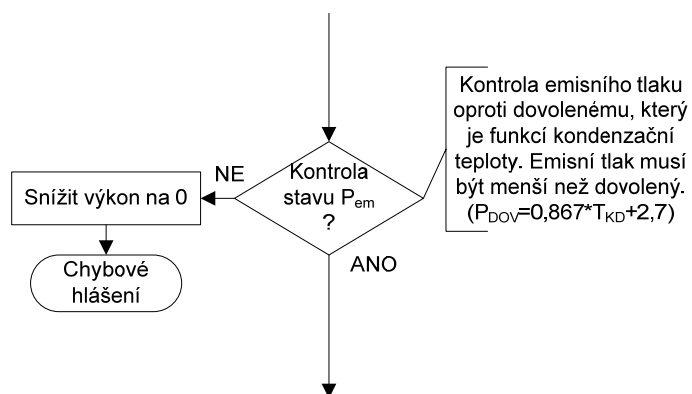
Obrázek 21 – Kontrola senzorů teploty spalin

Kromě kontroly senzorů podle dokumentace, se také kontrolují rozsahy, ve kterých se měřené veličiny musí při provozu nacházet.



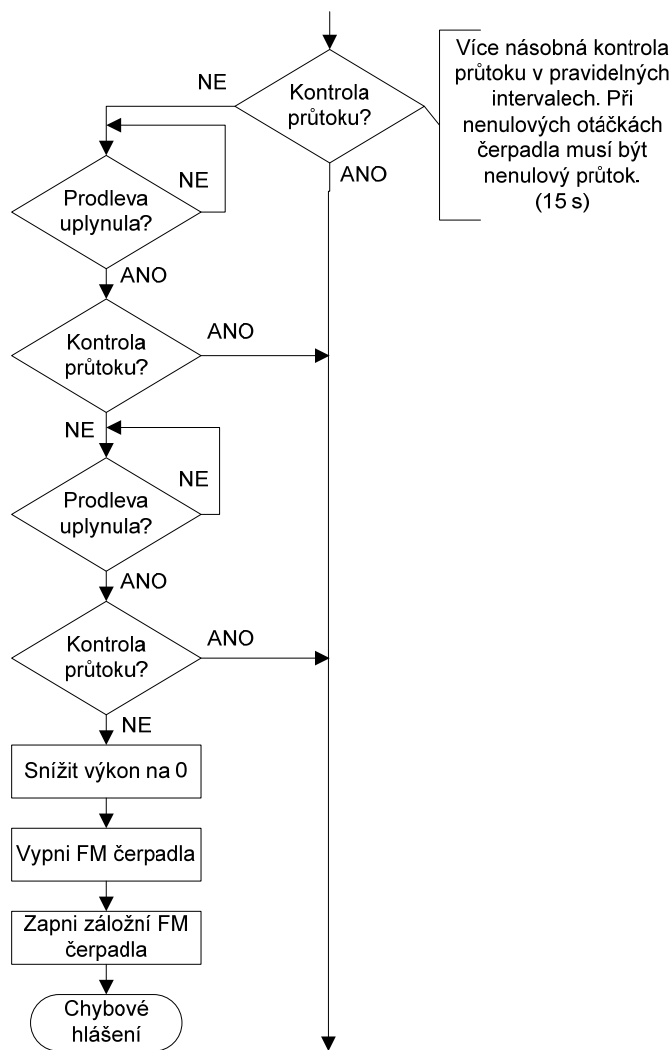
Obrázek 22 – Kontrola měřených veličin podle provozních limitů

Také se kontrolují vzájemné vztahy mezi měřenými veličinami. Tyto vztahy se musí rovněž udržovat v určitých mezích.



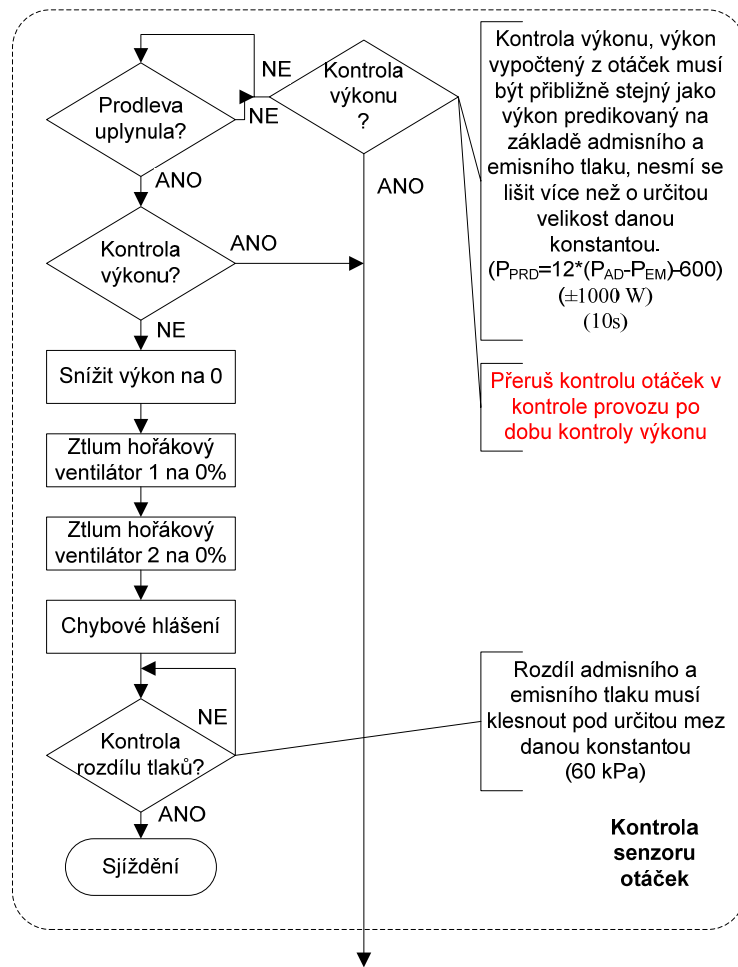
Obrázek 23 – Kontrola emisního tlaku

Důležité akční členy, jako například napájecí čerpadlo jsou zálohovány. V případě poruchy dojde k přepnutí na záložní akční člen.



Obrázek 24 – Kontrola průtoku

Důležitou kontrolou diagnostiky je kontrola výkonu. Mechanický výkon zařízení spočítaný na základě otáček generátoru se musí pohybovat v rozmezí kolem křivky dané admisním a emisním tlakem. V případě, že tato kontrola detekuje chybu, je možné, že nastala porucha na generátoru, mohlo dojít k odpojení magnetické spojky mezi expandérem a generátorem. V tomto případě nelze věřit měřeným otáčkám a je potřeba zastavit zařízení na základě rozdílu admisního a emisního tlaku. Teprve až rozdíl těchto tlaků poklesne pod určitou hodnotu, je možné přejít do stavu sjíždění.



Obrázek 25 – Kontrola výkonu

## 8. Návrh regulátoru

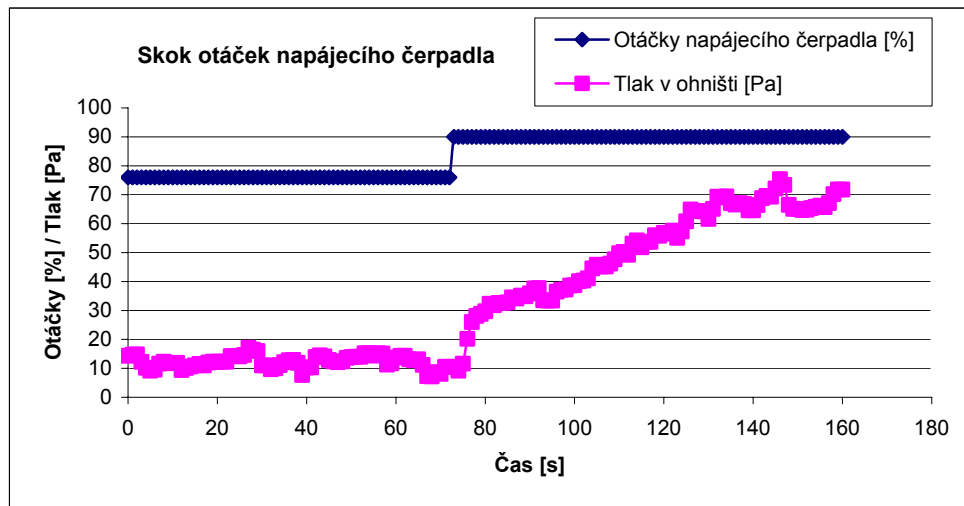
V řízení jsou použity následující regulátory:

- *regulátor otáček napájecího čerpadla v závislosti na přehřátí*
- *regulátor polohy trojcestného ventilu v závislosti na kondenzačním tlaku*
- *regulátor otáček spalínového ventilátoru v závislosti na tlaku v ohništi*
- *regulátor polohy spalínové klapky v závislosti na teplotě spalin*
- *regulátor otáček šnekového motoru v závislosti na přivedeném teple*

Tato práce se okrajově zabývá návrhem jednoho z nich, regulátoru otáček spalínového ventilátoru v závislosti na tlaku v ohništi.

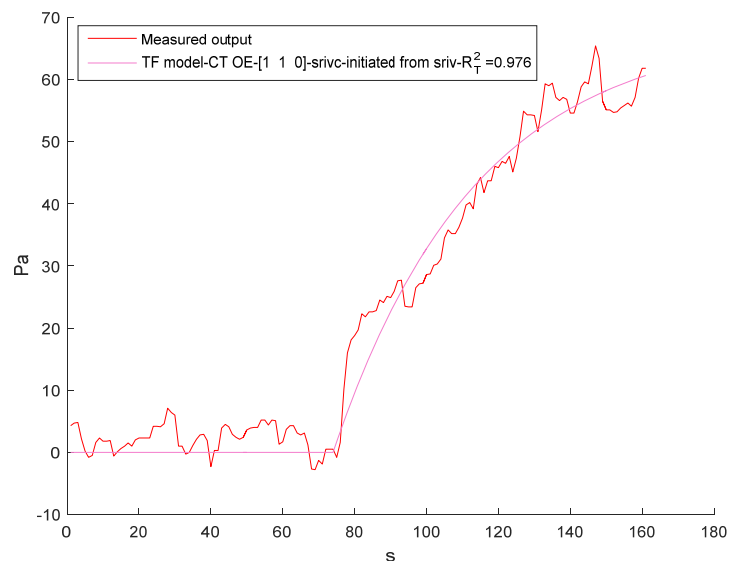
## 8.1 Zjednodušený model soustavy

Pro návrh regulátoru je potřeba nejprve sestavit model soustavy, kde dochází k regulaci. Jelikož odvození matematického modelu soustavy na základě popisu skutečné soustavy převyšuje rozsah a zaměření této práce, matematický model bude odvozen na základě skoku otáček napájecího čerpadla. Výsledkem bude zjednodušený model soustavy, dostačující pro triviální regulaci.



Obrázek 26 – Skok otáček napájecího čerpadla

Pomocí programu MATLAB a toolboxu CONTSID necháme vypočítat odhadovaný model soustavy.

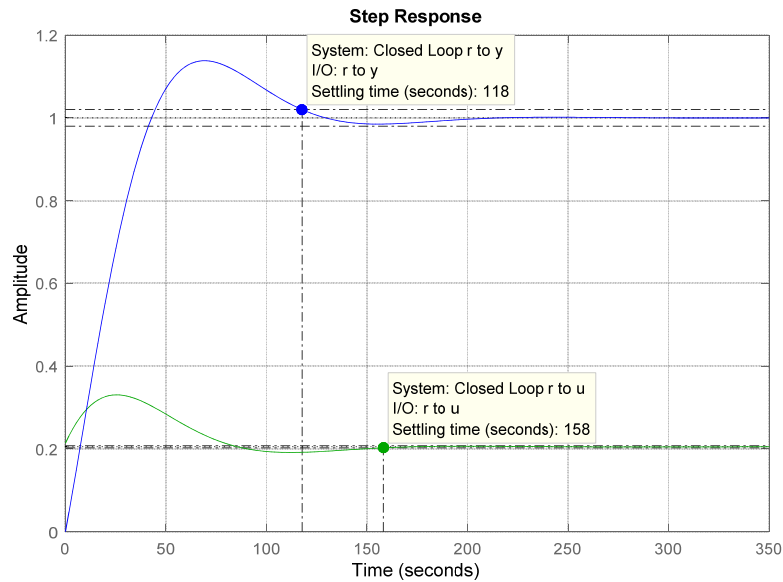


Obrázek 27 – Porovnání chování modelu soustavy a naměřených dat

$$G(s) = \frac{0,1226}{s + 0,02514}$$

Rovnice 1 – Přenos modelu soustavy

Nyní za pomoci modelu soustavy navrhne jednoduchý PI regulátor. Využijeme k tomu program MATLAB a nástroj SISOTOOL.



Obrázek 28 – Odezva modelu soustavy s regulátorem

Z přenosu regulátoru určíme konstanty.

$$C(s) = \frac{0,209651 \cdot s + 0,016127}{s} \Rightarrow K_p \approx 0,21, K_I \approx 0,016$$

Rovnice 2 – Přenos navrženého regulátoru

Zjištěné konstanty použijeme v programu pro regulátor.

## 9. Závěr

Seznámení s experimentální mikrokogenerační jednotkou WAVE probíhalo v laboratoři LORCA na UCEEB ČVUT. Bylo nutné porozumět funkci celého zařízení včetně jeho dílčích částí. Na základě odborné literatury byla kogenerační jednotka WAVE zařazena do kontextu energetického hospodářství. Jednotlivé části WAVE byly identifikovány a popsány s využitím současných znalostí z oblasti kogeneračních jednotek. Tepelný oběh na bázi ORC byl po teoretické stránce stručně popsán. V práci jsou shrnuty jeho hlavní výhody. Konkrétní realizace tepelného oběhu v kogenerační jednotce WAVE byla popsána detailněji, od zapálení paliva až po konečnou produkci.

Z hlediska automatizace byl proveden teoretický rozbor možností řízení. Byly popsány dostupné řídicí jednotky, jejich výhody a nevýhody. Na základě požadavků na řízení kogenerační jednotky WAVE byl proveden výběr vhodné řídicí jednotky. Řídicí program byl navržen a naprogramován s důrazem na bezpečnost a diagnostiku poruch. Diagnostika poruch je schopna odhalit většinu možných chyb a adekvátně reagovat na nastalé poruchy. Automatický provoz WAVE je možný s občasnými zásahy operátora. Celý řídicí systém je v práci popsán, včetně modulů, měřených veličin a regulovaných prvků. V práci byl také okrajově popsán návrh jednoduchého regulátoru.

Testování řídicího programu v současné době stále probíhá. Zařízení má za sebou zhruba 6 měsíců provozu s tímto programem. Provoz zařízení lze obsluhovat na panelu operátora a to i vzdáleně přes aplikaci v mobilním telefonu.

Data z provozu mohou být ukládána na paměťovou kartu nebo jsou posílána přes sériovou linku do programu LabVIEW. Na základě těchto dat jsou průběžně upravovány konstanty regulátorů. Také případné chyby programu se většinou podaří odhalit na základě těchto dat.

Do budoucna je v plánu realizovat vzdálený sběr dat pomocí GSM modulu.



## 10. Seznam použité literatury

- [1] Komise Evropských společenství 2006. Sdělení komise KOM(2006) 545 v konečném znění.  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0545>
- [2] Komise Evropských společenství 2007. Sdělení komise KOM(2007) 848 v konečném znění.  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:52006SC1720>
- [3] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 9788073001186.
- [4] VODIČKA, Václav, ZELENÝ, Zbyněk, MAŠČUCH, Jakub. Provoz prototypu ORC pro využití průmyslového odpadního tepla na UCEEB ČVUT. In: ES 2016: 15. ročník konference Energetické stroje a zařízení, termomechanika & mechanika tekutin, 9.-10. června 2016, Západočeská univerzita v Plzni [online]. [vid. 18.10.2016]. Dostupné z: [https://kke.zcu.cz/konference/historie/es\\_2016/sbornik\\_cz.html](https://kke.zcu.cz/konference/historie/es_2016/sbornik_cz.html)
- [5] PETCHERS, Neil. Combined heating, cooling & power handbook: technologies & applications an integrated approach to energy resource optimization. 2nd ed. New York, NY: Distributed by Marcel Dekker, c2012. ISBN 9781466553347.
- [6] LAMB, Frank. Industrial automation: hands-on. ISBN 978-0071816458.
- [7] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Malé kogenerační jednotky v komunální a průmyslové energetice. Brno: PC-DIR Real, 1999. ISBN 80-85895-23-4.
- [8] ŠMEJKAL, Ladislav a Marie MARTINÁSKOVÁ. PLC a automatizace. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 9788086056586.
- [9] ŠMEJKAL, Ladislav. PLC a automatizace. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 9788073000875.

# 11. Přílohy

## 11.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Experimentální mikrokogenerační jednotka WAVE .....	13
Obrázek 2 – Schéma tepelného oběhu ORC [4] .....	15
Obrázek 3 – Schéma přechodu mezi stavy .....	20
Obrázek 4 – Nastavení výchozího stavu pro připravenost .....	21
Obrázek 5 – Vypnutí frekvenčních měničů a silové části .....	22
Obrázek 6 – Zkouška těsnosti .....	22
Obrázek 7 – Povel k najíždění .....	23
Obrázek 8 – Vypnutí záložního čerpadla .....	23
Obrázek 9 – Zapnutí frekvenčních měničů .....	24
Obrázek 10 – Napuštění výměníku .....	24
Obrázek 11 – Nahrnutí paliva .....	25
Obrázek 12 – Spuštění a inicializace regulátorů .....	25
Obrázek 13 – Zapálení paliva .....	26
Obrázek 14 – Sekvence rozhoření .....	26
Obrázek 15 – Nastavení výchozího stavu pro provoz .....	27
Obrázek 16 – Kontrola provozu .....	28
Obrázek 17 – Nastavení výchozího stavu pro sjíždění .....	29
Obrázek 18 – Doběh generátoru .....	29
Obrázek 19 – Kontrola senzoru tlaku u napájecího čerpadla .....	30
Obrázek 20 – Kontrola senzoru admisní teploty .....	30
Obrázek 21 – Kontrola senzorů teploty spalin .....	30
Obrázek 22 – Kontrola měřených veličin podle provozních limitů .....	31
Obrázek 23 – Kontrola emisního tlaku .....	31
Obrázek 24 – Kontrola průtoku .....	32
Obrázek 25 – Kontrola výkonu .....	33
Obrázek 26 – Skok otáček napájecího čerpadla .....	34

Obrázek 27 – Porovnání chování modelu soustavy a naměřených dat.....	34
Obrázek 28 – Odezva modelu soustavy s regulátorem.....	35

### *11.2 Seznam tabulek*

Tabulka 1 – Měřené veličiny a regulované prvky .....	17
Tabulka 2 – Soupis řídicí elektroniky.....	19

### *11.3 Seznam rovnic*

Rovnice 1 – Přenos modelu soustavy .....	35
Rovnice 2 – Přenos navrženého regulátoru .....	35

### *11.4 Seznam CD*

Příložené CD obsahuje zdrojový kód programu řízení.