

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Model mikroturbíny pro výrobu elektrické a tepelné
energie**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Šíp**
Osobní číslo: **E13N0086P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Model mikroturbíny pro výrobu elektrické a tepelné energie**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte matematický popis výroby elektrické a tepelné energie pomocí mikroturbíny
2. Aplikujte matematický model na objektově programovatelný software firmy CORYS
3. Provedte realizaci modelu

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

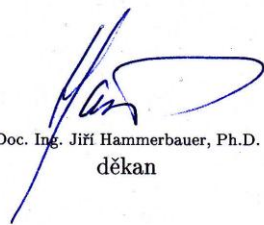
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Emil Dvorský, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku týkající se mikroturbíny a jejího modelování. První část práce obsahuje teoretický popis mikroturbíny. Jsou zde popsány konstrukce, princip, využití a vlastnosti mikroturbíny. Druhá část práce obsahuje matematický popis mikroturbíny. Tato část obsahuje zejména matematický popis plynové turbíny. Ve třetí části práce je popsán postup při tvorbě a funkce modelu mikroturbíny. Tento model byl vytvořen v programu SWING. Vytvořený model klade důraz na simulaci mikroturbíny z hlediska přeměny energie obsažené v palivu na elektrickou energii.

Klíčová slova

Mikroturbína, SWING, model, plynová turbína, hmotnostní průtok.

Abstract

The thesis is focused on issue of a microturbine and its modeling. The first part contains a theoretical description of the microturbine. There are describe construction, principle, usage and characteristics of the microurbine. The second part contains a mathematical description of the microturbine. This part contains particularly the mathematical description of a gas turbine. The third part contains a procedure of a creation of a model of the microturbine. This model was created in SWING. This model emphasizes the simulation of the microturbine in terms of conversion the energy of the fuel into electrical energy.

Key words

Microturbine, SWING, model, gas turbine, mass flow.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 6.5.2015

Radek Šíp

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Emilovi Dvorskému CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a Mgr. Pavlu Stejskalovi z VSE a.s. za profesionální rady.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	12
1 TEORETICKÝ POPIS MIKROTURBÍNY	13
1.1 KONSTRUKCE MIKROTURBÍNY	13
1.1.1 <i>Mechanická konstrukce</i>	14
1.1.2 <i>Elektrické vybavení</i>	15
1.1.3 <i>Řídicí systémy</i>	16
1.2 PRINCIP MIKROTURBÍNY	16
1.2.1 <i>Spalovací turbína</i>	16
1.2.2 <i>Tepelný oběh mikroturbíny</i>	17
1.2.3 <i>Synchronní generátor s permanentními magnety</i>	23
1.3 PARAMETRY MIKROTURBÍN	24
1.3.1 <i>Elektrický a tepelný výkon</i>	24
1.3.2 <i>Účinnost</i>	24
1.3.3 <i>Provozní parametry</i>	25
1.3.4 <i>Ostatní parametry</i>	26
1.3.5 <i>Ekonomické parametry</i>	27
1.3.6 <i>Porovnání s ostatními zdroji elektrické energie</i>	27
1.4 PROVOZNÍ REŽIMY MIKROTURBÍN	27
1.4.1 <i>Mikroturbína v ostrovním režimu</i>	27
1.4.2 <i>Mikroturbína pracující do tvrdé sítě</i>	28
1.5 POUŽITÍ MIKROTURBÍN	28
1.5.1 <i>Výroba pouze elektrické energie</i>	28
1.5.2 <i>Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla</i>	29
1.6 APLIKACE V ČR	29
1.7 HLAVNÍ VÝROBCI	30
2 MATEMATICKÝ POPIS MIKROTURBÍNY	32
2.1 PLYNOVÁ TURBÍNA	32
2.2 GENERÁTOR	35
2.3 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA	36
3 MODEL MIKROTURBÍNY V PROGRAMU SWING	38
3.1 POPIS PROGRAMU SWING	38
3.2 VLASTNÍ MODEL	39
3.2.1 <i>Model plynové turbíny</i>	41
3.2.2 <i>Model elektrické části</i>	44
3.2.3 <i>Grafická část a ovládání modelu</i>	49
3.3 VÝSLEDKY MODELU	50
ZÁVĚR	54
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	55

Seznam symbolů a zkratk

c_p	Měrná tepelná kapacita vzduchu [$J/(kg \cdot ^\circ C)$]
$c_{p\ air}$	Průměrná měrná tepelná kapacita vstupního vzduchu [$J/(kg \cdot ^\circ C)$]
$c_{p\ exh}$	Průměrná měrná tepelná kapacita výfukového plynu [$J/(kg \cdot ^\circ C)$]
i_v	Entalpie vzduchu [kJ/kg]
i_p	Entalpie vodní páry [kJ/kg]
i_d	Proud v ose d [A]
i_q	Proud v ose q [A]
I_{dc}	Usměrněný proud [A]
I_m	Maximální hodnota výstupního proudu ze střídače [A]
I_{LL}	Proud generátoru [A]
I_{LLm}	Maximální hodnota proudu generátoru [A]
I_a	Proud generátoru [A]
J	Kombinovaný setrvačný moment rotoru a zátěže [$kg \cdot m^2$]
K	Koeficient pro přepočet entalpie [–]
L_q	Indukčnost v ose q [H]
L_d	Indukčnost v ose d [H]
m	Hmotnostní průtok vzduchu [kg/s]
m_p	Hmotnostní průtok paliva [kg/s]
m_c	Výsledný hmotností průtok vzduchu [kg/s]
m_{cc}	Hmotností průtok výfukových plynů ze spalovací komory [kg/s]
m_t	Hmotnostní průtok turbínou [kg/s]
M_{sp}	Hmotnostní tok spalin vzduchu [kg/s]
$n_{i,po}$	Cena jednotky [E/kW]
$n_{i,po}$	Celkové investiční náklady [E/kW]
p	Počet pólů [–]
p_1	Tlak vzduchu na vstupu do kompresoru [Pa]

p_2	Tlak vzduchu na výstupu z kompresoru [Pa]
p_3	Tlak vzduchu na vstupu do spalovací komory [Pa]
p_4	Tlak na výstupu ze spalovací komory [Pa]
p_6	Tlak na výstupu z turbíny [Pa]
$P_{E,n}$	Elektrický výkon [W]
P_k	Výkon spotřebovaný kompresorem [W]
P_t	Výkon turbíny [W]
$P_{už}$	Užitečný výkon spalovací turbíny [W]
P_{tht}	Tepelný výkon generovaný turbínou [W]
P_{thc}	Tepelný výkon spotřebovaný kompresorem [W]
P_g	Výkon generátoru [W]
P_{dc}	Výkon vystupující z usměrňovače [W]
$P_{T,n}$	Tepelný výkon odběru [W]
q	Poměrné množství paliva [-]
q_h	Horní výhřevnost paliva [J/kg]
q_{sp}	Spodní výhřevnost paliva [J/kg]
Q_p	Přivedené teplo [J]
Q_o	Odvedené teplo [J]
R_s	Odpor statorového vinutí [Ω]
T_1	Teplota vzduchu vstupujícího do kompresoru [$^{\circ}C$]
T_2	Teplota vzduchu vystupujícího z kompresoru [$^{\circ}C$]
T_3	Teplota vzduchu vstupujícího do spalovací komory [$^{\circ}C$]
T_4	Výstupní teplota spalin ze spalovací komory [$^{\circ}C$]
T_6	Výstupní teplota spalin z turbíny [$^{\circ}C$]
T_{68}	Izoentropická teplota na výstupu z turbíny [$^{\circ}C$]
T_{28}	Izoentropická teplota ve výtlačku kompresoru [$^{\circ}C$]
T_{shaft}	Točivý moment hřídele [N.m]
T_e	Točivý moment generátoru [N.m]

U_a	Výstupní napětí [V]
U_{LL}	Napětí generátoru [V]
U_{dc}	Usměrněné napětí [V]
U_m	Maximální hodnota výstupního napětí ze střídače [V]
U_{LLm}	Maximální hodnota napětí generátoru [V]
v_d	Napětí v ose d [V]
v_q	Napětí v ose q [V]
w	Měrný výkon [W/(kg · s)]
W_t	Mechanická práce [J]
W_t^K	Kompresní práce [J]
W_t^{TM}	Výstupní mechanická práce z oběhu [J]
η_C	Celková účinnost [%]
$\eta_{E,n}$	Elektrická účinnost [%]
η_k	Izoentropická účinnost kompresoru [-]
η_t	Izoentropická účinnost turbíny [-]
η_{ii}	Celková vnitřní tepelná účinnost [-]
θ_r	Úhlové natočení rotoru [rad]
λ	Magnetický tok propojující rotor a stator [Wb]
σ	Modul teplotní výroby [-]
τ_c	Časová konstanta kompresoru [s]
τ_{cc}	Časová konstanta spalovací komory [s]
τ_t	Časová konstanta turbíny [s]
φ	Fázový posun mezi napětím a proudem vystupujících ze střídače [rad]
φ_2	Fázový posun mezi napětím a proudem generátoru [rad]
ω	Úhlová frekvence výstupního napětí a proudu ze střídače [rad/s]
ω_{LLm}	Úhlová frekvence proudu a napětí generátoru [rad/s]
ω_r	Úhlová rychlost rotoru [rad/s]

Úvod

Předkládaná práce se zabývá problematikou mikroturbín a jejich modelování. Vzhledem k četným faktorům neustále roste v posledních letech používání distribuované výroby elektrické energie. Podle druhu primární energie se liší technologie distribuovaných zdrojů pro výrobu elektrické energie. Mezi tyto technologie patří fotovoltaické elektrárny, větrné elektrárny, elektrárny využívající biomasu, mikroturbíny a palivové články. Z těchto technologií se v poslední době dostává stále větší pozornosti mikroturbínám díky jejich některým příznivým vlastnostem. Mezi tyto vlastnosti patří schopnost poskytovat elektrickou energii jak v základním, tak i ve špičkovém pásmu diagramu denního zatížení, minimální požadavky na údržbu, malé prostorové rozměry v porovnání s ostatními distribuovanými zdroji, flexibilita v použití paliva, nízké emise oxidů dusíku, zvýšení energetické účinnosti, kdy funguje jako kombinovaná výroba elektrické energie a tepla. Mikroturbína může být také používána jako záložní zdroj k obnovitelným zdrojům elektrické energie. Tyto a další vlastnosti, spolu s principem funkce mikroturbíny, jsou popsány v první části práce.

Díky rostoucímu zájmu o mikroturbíny je tedy nutný výzkum a studie jejich chování. Tyto studie většinou popisují chování mikroturbíny připojené k elektrické síti nebo pracující v ostrovním režimu. Studie chování mikroturbíny z energetického hlediska je popsána ve druhé části práce. Důležitou součástí studie je i modelování mikroturbín. Modelem mikroturbíny se zabývá třetí část práce, kde je popsán model mikroturbíny v programu SWING.

1 Teoretický popis mikroturbíny

Mikroturbíny představují novou generaci spalovacích turbín. Používají vysokorychlostní generátory, čímž odpadá použití převodovky a tím i problematika olejového hospodářství. Celé soustrojí je bez převodovky značně menší a lehčí, což rozšiřuje možnosti jeho použití. Mikroturbíny používají vzduchová ložiska, které vydrží až 120 000 ot. /min a nevyžadují žádné mazání. Celé soustrojí obsahuje pouze jeden pohyblivý díl. Díky těmto faktům se výrazně zvyšuje spolehlivost oproti jiným zařízením. Mikroturbíny jsou schopné kromě elektrické energie vyrábět i tepelnou energii. Mikroturbíny patří do skupiny distribuovaných zdrojů o výkonu 1 kW až 50 MW. [1]

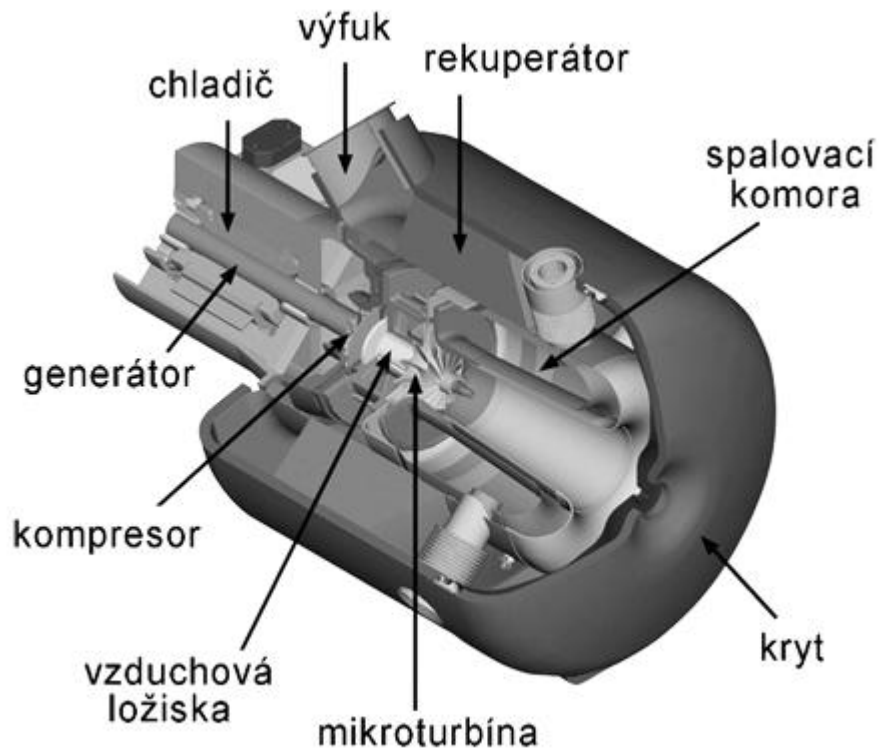


Obr. 1.1 Mikroturbína od firmy CAPSTONE [6]

1.1 Konstrukce mikroturbíny

Mikroturbínou nazýváme celý systém obsahující spalovací turbínu, generátor elektrické energie a výkonovou elektroniku pro úpravu parametrů výstupního elektrického proudu. Kromě těchto základních částí obsahuje mikroturbína ještě další nezbytné součásti, jako je

řídící systém, zařízení pro úpravu paliva a další. Mikroturbína může v některých případech obsahovat i tepelné výměníky pro zvýšení účinnosti a využití odpadního tepla.

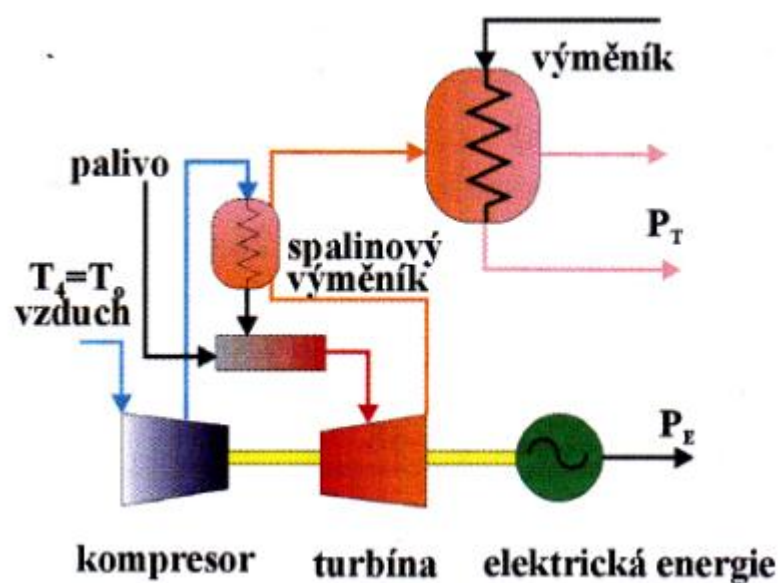


Obr. 1.2 Řez mikroturbínou CAPSTONE C30 [4]

1.1.1 Mechanická konstrukce

Jak již bylo řečeno, hlavními částmi mikroturbíny jsou spalovací turbína, generátor elektrické energie a popřípadě tepelné výměníky. Spalovací turbína se skládá z kompresoru, spalovací komory a turbíny. Kompresor je umístěn na stejném hřídeli, jako generátor a turbína, která ho pohání. Na hřídeli jsou použita olejová nebo vzduchová ložiska. Díky tomu odpadá olejové hospodářství. Mikroturbíny se pohybují rychlostí až 100 000 ot. /min, proto musí být použit vysokofrekvenční generátor s následnou úpravou parametrů elektrické energie. Existuje i varianta dvouhřídelového uspořádání, kdy na jednom hřídeli je kompresor o vysokých otáčkách a na druhém hřídeli turbína s generátorem. U této varianty není nutná úprava parametrů, ale je zde využito více rotujících součástí. Na výstupu z turbíny může být umístěn výměník tepla pro ohřev topné vody. Pro zvýšení účinnosti je možno použít rekuperátor (spalinový výměník), který využívá výfukové teplo ze spalin turbíny k ohřevu vzduchu před vstupem do spalovací komory turbíny. [1], [2]

Další součástí mikroturbíny je sací trakt a filtr vstupního vzduchu. V případě možnosti zamrznutí se v zimě u větších turbín přimíchává ke studenému vzduchu část vzduchu ohřátého stlačením v kompresoru. Výfukový trakt se u venkovního provedení mikroturbín bez výměníků skládá jen z krátkého výfuku. U složitějších instalací obsahuje výfukový trakt spalínovody a komín. Mikroturbína pro svoji činnost potřebuje tlak paliva 0,4 – 0,8 MPa. Ve středotlakém rozvodu zemního plynu je tlak nejvýše 0,4 MPa. Proto je nutné většinou tlak zvýšit pomocí plynového kompresoru. Mikroturbína obsahuje také bezpečnostní zařízení, které má za úkol zabránit přehřátí a poškození výměníku. Principiální schéma mikroturbíny je vidět na Obr. 1.3. [1]



Obr. 1.3 Principiální schéma mikroturbíny [2]

1.1.2 Elektrické vybavení

Generátor je umístěn na stejné hřídeli jako plynová turbína, která se pohybuje rychlostí až 100 000 ot. /min. Kvůli těmto vysokým otáčkám musí být použit vysokorychlostní generátor elektrického proudu. Jedná se o synchronní generátor s permanentními magnety v rotoru. U menších zařízení je možné použít generátor také jako motor, který roztáčí celé soustrojí při startu. Při tomto stavu je do statorového vinutí přiveden střídavý proud a naindukované napětí vytvoří moment, který roztočí rotor. Existují dvě odlišná uspořádání s jiným průběhem magnetického pole – v podélné ose nebo kolmo na ní. Rotor je tvořen kvalitními materiály, např. polykarbonáty. Tyto materiály vydrží až 120000 ot. /min. [1]

Vysokofrekvenční generátor vytváří střídavý proud o frekvenci kolem 1600 – 4000 Hz. Tento proud musí být nejprve usměrněn a následně zpět rozstředán již na frekvenci sítě 50 Hz.

Tento princip se nazývá tzv. elektronická převodovka. Mikroturbína může pracovat paralelně se sítí nebo samostatně. Při druhé možnosti je nutné zařízení doplnit o startovací baterii a další střídač. Toto zařízení slouží pro start z baterie, kdy baterie napájí přes střídač statorové vinutí generátoru a ten v motorickém režimu roztočí soustrojí. [1]

Účinník je u některých generátorů pevně nastavený a u některých je možné ho měnit v určitém rozmezí. Změnou účinníku je možné se podílet na kompenzaci jalového výkonu na straně zákazníka. [1]

1.1.3 Řídicí systémy

Mikroturbína může být řízena několika procesory, z nichž jeden je nadřazený a ostatní procesory řídí palivové hospodářství, výkonovou elektroniku a komunikaci s nadřazeným řídicím systémem. Z číselných údajů zadává operátor zejména velikost požadovaného výkonu. Změna požadovaného výkonu se provádí kombinací změny průtočného množství pracovní látky TO (změna otáček kompresoru) a změny teploty spalin na vstupu do MT. Řídicí systémy turbín obsahují i kontrolu řádné funkce navazujících vnějších zařízení, například zda neuniká plyn, zda funguje ventilace místnosti, oběhové čerpadlo, nepřehřívá se výměník apod. [1]

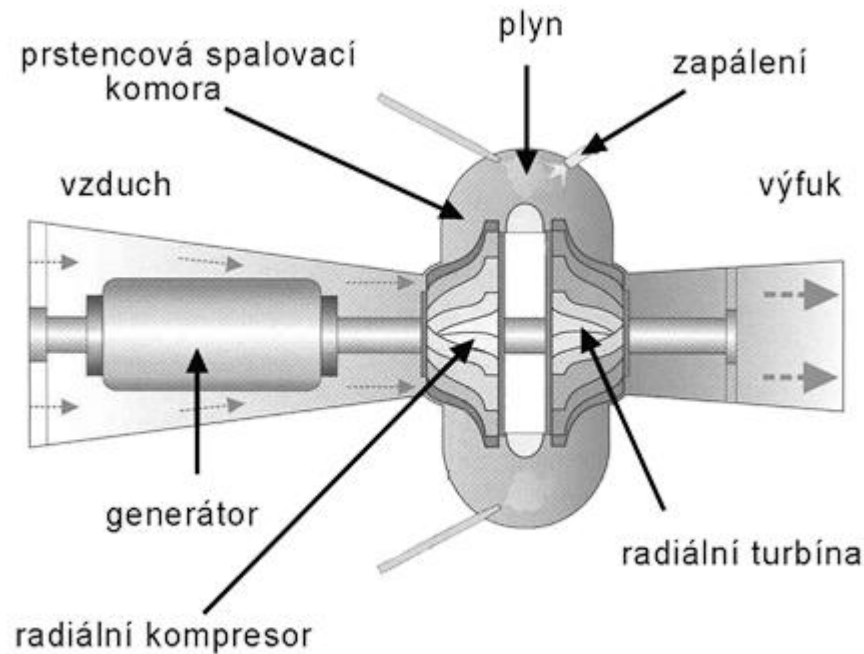
1.2 Princip mikroturbíny

Výrobní jednotky s mikroturbínou používají jako tepelný motor spalovací turbíny malého výkonu, které pracují při vysokých otáčkách. Tato turbína roztáčí vysokofrekvenční generátor, který generuje elektrický proud s vysokou frekvencí, který je následně usměrněn a rozstředěn již na frekvenci sítě. Teplo ze spalin odcházejících z turbíny je možné využít pro ohřev topné vody pro vytápění objektů, užitkovou vodu a podobně. Použitím spalinového výměníku pro předeřev spalovacího vzduchu je možné výrazně zvýšit účinnost, ale sníží se teplota využitelná pro dodávku tepla. [1]

1.2.1 Spalovací turbína

Spalovací turbína, označována také jako plynová turbína, je tepelný stroj skládající se z turbíny, kompresoru a spalovací komory. Spalovací turbína používá jako médium spaliny z hoření zemního plynu či jiných paliv. Palivo a vzduch jsou pod tlakem přiváděny do spalovací komory, kde probíhá proces hoření. Vytvořená hořlavá směs paliva a vzduchu je při

startu elektricky zapálena. Při hoření směsi dojde k prudkému zvýšení objemu směsi a následuje expanze přes turbínu. Teplota spalin na vstupu do turbíny je okolo 800 °C a více. Tlaková a tepelná energie spalin expandujících ze spalovací komory je tedy nejprve převedena pomocí turbíny na kinetickou energii. Tato energie je poté prostřednictvím lopatek turbíny převedena na rotační pohyb. [1]



Obr. 1.4 Princip radiální mikroturbíny [6]

1.2.2 Tepelný oběh mikroturbíny

Obecně rozeznáváme tepelné oběhy uzavřené a otevřené. U uzavřeného tepelného oběhu je konečný stav pracovní látky totožný s počátečním stavem. Mezi tyto oběhy patří například Rankin - Clausiův cyklus, se kterým pracují klasické tepelné elektrárny. U otevřeného tepelného oběhu se počáteční a konečný stav pracovní látky liší. Mezi tyto oběhy patří Braytonův oběh, se kterým pracují plynové turbíny a dále pak například Leinoirův oběh plynového pístového motoru a rovnotlaký (Dieselův) oběh vznětového motoru.

Mikroturbína pracuje s otevřeným Braytonovým oběhem. Základní energetická bilance tohoto oběhu je popsána takto: [3]

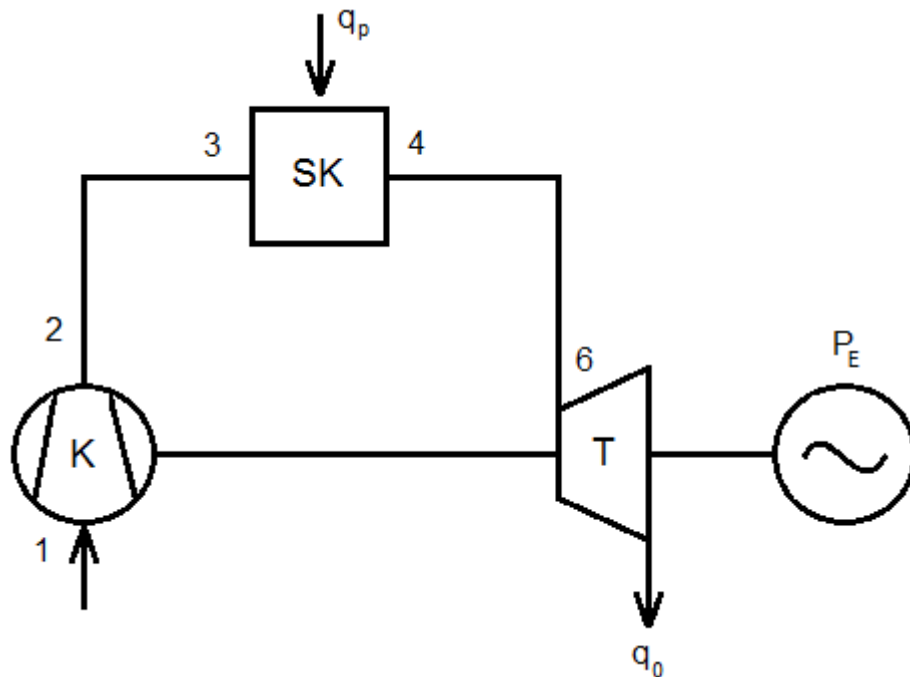
$$Q_p = Q_o + W_t = Q_o + W_t^{TM} - W_t^K \quad (1.1)$$

$Q_p[J]$...přivedené teplo, $Q_o[J]$...odvedené teplo, $W_t[J]$...mechanická práce, W_t^K [W] ...kompresní práce, $W_t^{TM}[J]$...výstupní mechanická práce z oběhu

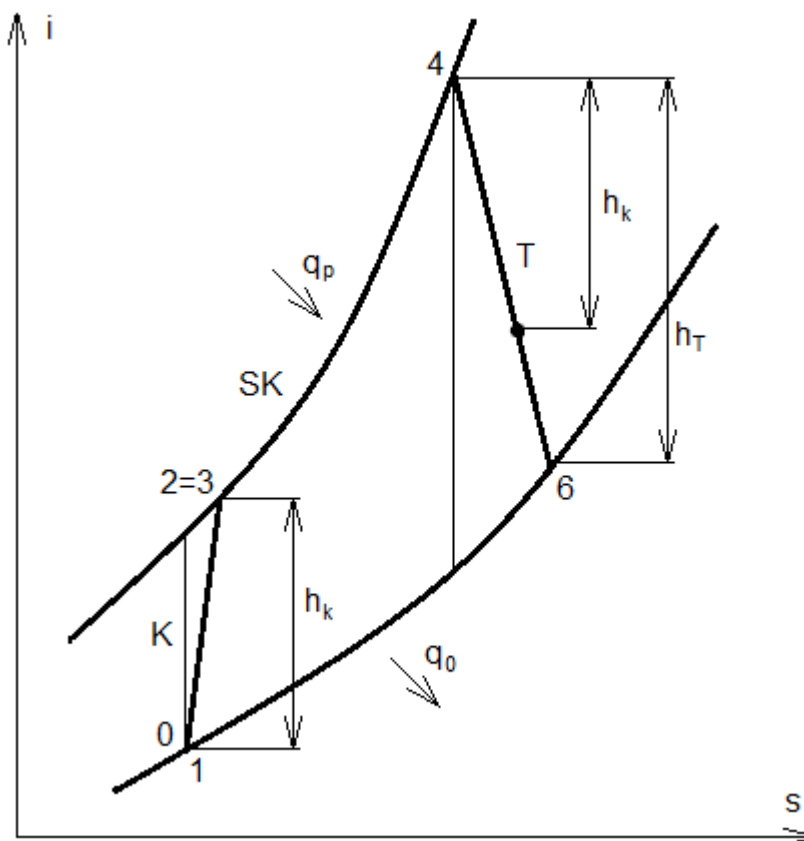
Tato rovnice vyjadřuje, že teplo přivedené do systému se rovná teplu odvedenému a mechanické práci. Mechanická práce je z části spotřebovaná kompresní prací a zbytek je výstupní mechanická práce z oběhu. [3]

Otevřený Braytonův cyklus se skládá z těchto dějů:

1. Izoentropický děj – nasání vzduchu do kompresoru a jeho následné stlačení.
2. Izobarický děj – stlačený vzduch přechází do spalovací komory, kde je za konstantního tlaku ohřán spalujícím se palivem.
3. Izoentropický děj – ohřátý a stlačený vzduch odevzdá svoji energii expanzí v turbíně
4. Izobarický děj – odevzdání tepla plynu do atmosféry [5]



Obr. 1.5 Schéma otevřeného Braytonova oběhu [3]



Obr. 1.6 i-s diagram otevřeného Braytonova oběhu [5]

Dále zde bude popsán částečně idealizovaný otevřený jednoduchý Braytonův oběh spalovací turbíny bez výměníku tepla, jehož i-s diagram je vidět na Obr. 1.6. Označené indexy v textu odpovídají indexům na Obr. 1.5.

1. Kompresor

V kompresoru probíhá polytropická komprese vyjádřená izentropickou účinností: [5]

$$\eta_k = \frac{T_{28} - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{x-1}{x}} - 1}{\frac{T_2}{T_1} - 1} \quad (1.2)$$

T_1 [°C] ...teplota vzduchu vstupujícího do kompresoru, p_1 [Pa] ...tlak vzduchu na vstupu do kompresoru, T_{28} [°C] ...izentropická teplota ve výtlaku kompresoru, T_2 [°C] ...teplota vzduchu vystupujícího z kompresoru, p_2 [Pa] ...tlak vzduchu na výstupu z kompresoru

Výkon kompresoru pro stlačovanou hmotu vzduchu: [5]

$$P_k = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = \frac{m \cdot c_p \cdot T_1}{\eta_k} \cdot \left[\frac{T_2}{T_1} - 1 \right] = \frac{m \cdot c_p \cdot T_1}{\eta_k} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x-1}{x}} - 1 \right] \quad (1.3)$$

m [kg/s] ...hmotnostní průtok vzduchu, c_p [J/(kg·°C)] ...měrná tepelná kapacita vzduchu

2. Spalovací komora

Vstupní stav vzduchu do spalovací komory: [5]

$$p_3 = p_2; T_3 = T_2 \quad (1.4)$$

T_2 [°C] ...teplota vzduchu vystupujícího z kompresoru, p_2 [Pa] ...tlak vzduchu na výstupu z kompresoru, T_3 [°C] ...teplota vzduchu vstupujícího do spalovací komory, p_3 [Pa] ...tlak vzduchu na vstupu do spalovací komory

Poměrné množství paliva: [5]

$$q = \frac{m_p}{m} \quad (1.5)$$

m_p [kg/s] ...hmotnostní průtok paliva, m [kg/s] ...vstupní hmotnostní průtok vzduchu

Výstupní teplota spalin ze spalovací komory: [5]

$$T_4 = \frac{m}{m + m_p} \cdot T_2 + \frac{m_p}{m + m_p} \cdot \frac{q_h}{c_p} = (1 - q) \cdot T_2 + q \cdot \frac{q_h}{c_p} \quad (1.6)$$

q_h [J/kg] ...horní výhřevnost paliva, q [-] ...poměrné množství paliva, c_p [J/(kg·°C)] ...měrná tepelná kapacita vzduchu

Rovnice tepelné rovnováhy spalování za konstantního tlaku: [5]

$$m_p \cdot q_h + m \cdot c_p \cdot T_2 = (m + m_p) \cdot c_p \cdot T_4 \quad (1.7)$$

T_4 [°C] ...výstupní teplota spalin ze spalovací komory

3. Turbína

Expanze v turbíně je polytropická, vyjádřená izoentropickou účinností: [5]

$$\eta_t = \frac{T_4 - T_6}{T_4 - T_{68}} = \frac{1 - \frac{T_6}{T_4}}{1 - \frac{T_{68}}{T_4}} = \frac{1 - \frac{T_6}{T_4}}{1 - \left(\frac{p_6}{p_4}\right)^{\frac{x-1}{x}}} \quad (1.8)$$

T_4 [°C]...výstupní teplota spalin ze spalovací komory, T_6 [°C]...výstupní teplota spalin z turbíny, T_{68} [°C]...Izoentropická teplota na výstupu z turbíny, p_6 [Pa]...tlak na výstupu z turbíny, p_4 [Pa]...tlak na výstupu ze spalovací komory

Výkon plynové turbíny: [5]

$$P_t = (m + m_p) \cdot c_p \cdot (T_4 - T_6) = (m + m_p) \cdot T_4 \cdot c_p \cdot \eta_t \cdot \left(1 - \frac{T_{68}}{T_4}\right) = \\ = m \cdot (1 + q) \cdot T_4 \cdot c_p \cdot \eta_t \cdot \left[1 - \left(\frac{p_6}{p_4}\right)^{\frac{x-1}{x}}\right] \quad (1.9)$$

m_p [kg/s]...hmotnostní průtok paliva, m [kg/s]...hmotnostní průtok vzduchu, c_p [J/(kg·°C)]...měrná tepelná kapacita vzduchu, η_t [-]...izoentropická účinnost turbíny, q [-]...poměrné množství paliva

4. Výsledné vlastnosti oběhu spalovací turbíny

Užitečný výkon spalovací turbíny: [5]

$$P_{uz} = P_t - P_k = m \cdot (1 + q) \cdot c_p \cdot \eta_t \cdot T_4 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{x-1}{x}}\right] - \frac{m \cdot c_p}{\eta_k} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{x-1}{x}} - 1\right] \quad (1.10)$$

P_t [W]...výkon turbíny, P_k [W]...příkon kompresoru, m [kg/s]...hmotnostní průtok vzduchu, c_p [J/(kg·°C)]...měrná tepelná kapacita vzduchu, η_t [-]...izoentropická účinnost turbíny, q [-]...poměrné množství paliva, T_4 [°C]...výstupní teplota spalin ze spalovací komory, p_2 [Pa]...tlak vzduchu na výstupu z kompresoru, p_1 [Pa]...tlak vzduchu na vstupu do kompresoru, η_k [-]...Izoentropická účinnost kompresoru

$$P_{uz} = m \cdot c_p \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{x-1}{x}} - 1\right] \cdot \left\{(1 + q) \cdot \eta_t \cdot T_4 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1-x}{x}} - \frac{T_1}{\eta_k}\right\} \quad (1.11)$$

Celková vnitřní tepelná účinnost: [5]

$$\eta_{ti} = \frac{P_{už}}{m_p \cdot q_{sp}} = \frac{c_p}{q_{sp} \cdot q} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x-1}{x}} - 1 \right] \cdot \left\{ (1+q) \cdot \eta_t \cdot T_4 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1-x}{x}} - \frac{T_1}{\eta_k} \right\} \quad (1.12)$$

$P_{už}$ [W]...užitečný výkon spalovací turbíny, q_{sp} [J/kg]...spodní výhřevnost paliva, m_p [kg/s]...hmotnostní průtok paliva

Měrný výkon vyjadřuje výkon připadající na 1 kg pracovní látky za sekundu: [5]

$$w = \frac{P_{už}}{m} = \frac{\eta_{ti} \cdot m_p \cdot q_{sp}}{m} = q \cdot q_{sp} \cdot \eta_{ti} \quad (1.13)$$

η_{ti} [-]...celková vnitřní tepelná účinnost

V rovnici (1.10) pro $P_{už}$ a (1.12) pro η_{ti} je možno definovat buď T_4 , nebo q pomocí rovnice (1.6). Upravená rovnice (1.12) pro η_{ti} : [5]

$$\eta_{ti} = \frac{c_p \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x-1}{x}} - 1 \right]}{q \cdot q_{sp} \cdot \eta_k} \cdot \left[(1+q) \cdot \frac{\eta_t}{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x+1}{x}}} \cdot \left\{ (1-q) \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x-1}{x}} - 1 + \eta_k \right] + \frac{q \cdot q_h}{c_p \cdot T_1} \cdot \eta_k \right\} - 1 \right] \quad (1.14)$$

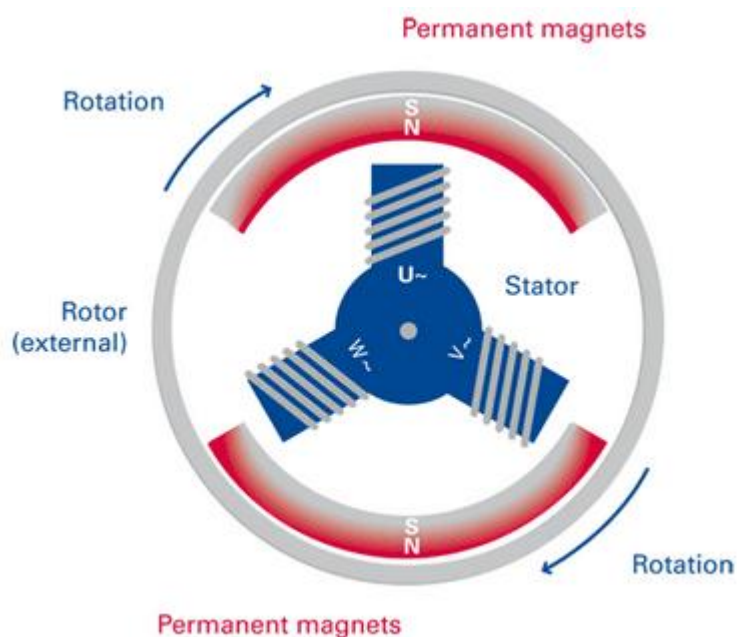
I přes zjednodušení lze celkovou účinnost a měrný výkon vyjádřit obecně: [5]

$$\eta_{ti} = fce \left(c_p; x; q_{sp}; q_h; T_1; \frac{p_2}{p_1}; \eta_k; q; T_4; \eta_t \right) \quad (1.15)$$

To tedy znamená vyjádření devíti proměnnými. Proměnné lze rozdělit na fyzikální vlastnosti pracovní látky (c_p, x), fyzikální vlastnosti paliva q_h a q_{sp} , počáteční teplotu komprese T_1 a expanze T_4 , stlačení p_1/p_2 a účinnosti kompresoru η_k , poměrnou intenzitu přívodu tepla q a účinnost turbíny η_t .

1.2.3 Synchronní generátor s permanentními magnety

Je to generátor, kde je budící pole vytvářeno permanentními magnety namísto budícího vinutí. Materiály magnetů musí obsahovat vysokou magnetickou energii v jednotce objemu a mít vysokou pevnost. Tyto požadavky nejlépe splňují samarium-kobaltové magnety a neodymové magnety. Výhody těchto strojů oproti ostatním strojům jsou jednoduchá konstrukce, eliminace ztrát v mědi, spolehlivý provoz a možnost dosažení velmi vysokých otáček. Nevýhodou je ztráta možnosti řídit buzení a možnost demagnetizace. Stroj má vyšší účinnost než indukční stroje, ale obecně je jeho cena vyšší. Nejnovější aplikace synchronních strojů s permanentními magnety jsou v oblasti distribuované výroby elektrické energie, především u větrných elektráren a právě u mikroturbín. Výhoda vysokorychlostního generátoru je to, že velikost stroje se snižuje téměř přímo úměrně ke zvyšující se rychlosti, což vede k velmi malým rozměrům. Vysokorychlostní generátor s permanentními magnety je důležitou součástí mikroturbíny. [10]



Obr. 1.7 Synchronní stroj s permanentními magnety [14]

Princip funkce: Otáčí – li turbína rotorem, indukují se v jednotlivých cívkách statoru střídavá napětí sinusového průběhu, která jsou v jednotlivých cívkách vzájemně časově posunuta o úhel 120° . Po připojení zátěže ke statoru bude procházet vinutím statoru střídavý elektrický proud. Prochází – li vinutím statoru trojfázový proud, vzniká točivé magnetické pole s otáčkami n_{s1} , které má stejnou rychlost otáčení jako rotor a jeho magnetické pole, skluz stroje je tedy nulový.

1.3 Parametry mikroturbín

Parametry mikroturbín se velmi liší podle výrobce a podle typu mikroturbíny. Některé parametry jsou ovšem díky principu mikroturbíny podobné. Parametry některých mikroturbín jsou vidět v *Tab. 1.1*.

Tab. 1.1 Nákladové a technické parametry mikroturbín [2]

Výrobce		CAPSTONE	INGERSOLD-RAND	TURBEC
Model		C330	70 LM	T100
Parametry turbíny				
Elektrický výkon $P_{E,n}$	[kW _E]	30	70	100
Cena jednotky $n_{i,po}$	[€/kW]	1000	950	800
Celkové investiční náklady $n_{i,c}$	[€/kW]	2516	2031	1561
Elektrická účinnost $\eta_{E,n}$	[%]	23,4	25,2	27,0
Celková účinnost η_C	[%]	73	64	71
Tepelný výkon odběru $P_{T,n}$	[kW]	64	108	163
Parametry kogenerační jednotky				
Teplota spalin z turbíny T_4	[°C]	260	225	260
Hmotnostní tok spalin M_{sp}	[kg/s]	0,32	0,7	0,87
Výstupní teplota spalin z tepelného výměníku	[°C]	65	55	55
Tepelný výkon odběru $P_{T,n}$	[kW]	64	108	163
Celková účinnost η_C	[%]	73	64	71
Modul teplárenské výroby σ	[-]	0,47	0,65	0,62

1.3.1 Elektrický a tepelný výkon

Elektrický výkon používaných jednotek se pohybuje v rozmezí od 30 do 400 kW. Hodnota tepelného výkonu je velmi různá podle použitého výměníku a druhu využití tepelné energie. Modul teplárenské výroby je přibližně 0,5 – 0,7 a jeho hodnota je menší než u klasických plynových turbín. Teplota odcházejících spalin je v rozsahu 220 – 320 °C. [2]

1.3.2 Účinnost

Tepelná účinnost Braytonova cyklu je závislá na tlakovém poměru, teplotě okolního vzduchu, teplotě vzduchu přiváděného do turbíny, účinnosti jednotlivých částí mikroturbíny (turbína, kompresor) a případně rekuperátorech. [1]

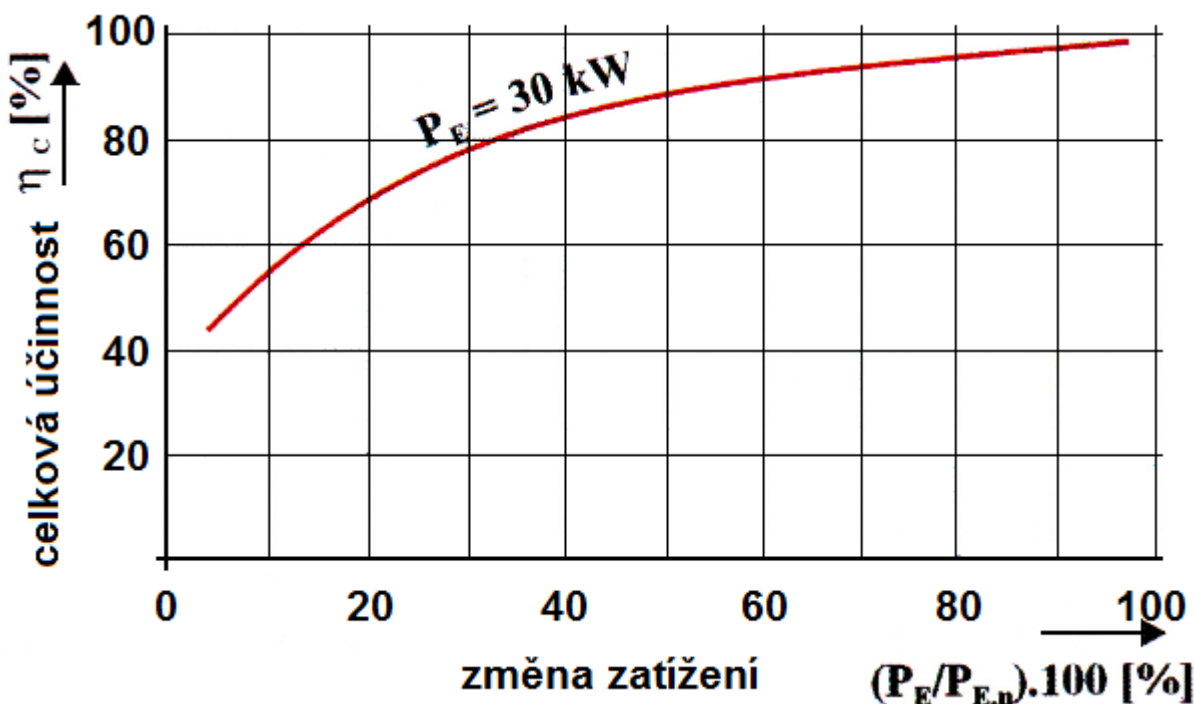
U mikroturbíny rozlišujeme tři druhy účinností:

Elektrická účinnost – poměr elektrického výkonu (kW) k příkonu v palivu (kW)

Tepelná účinnost – poměr tepelného výkonu (kW) k příkonu v palivu (kW)

Celková účinnost – poměr součtu elektrického a tepelného výkonu k příkonu v palivu [1]

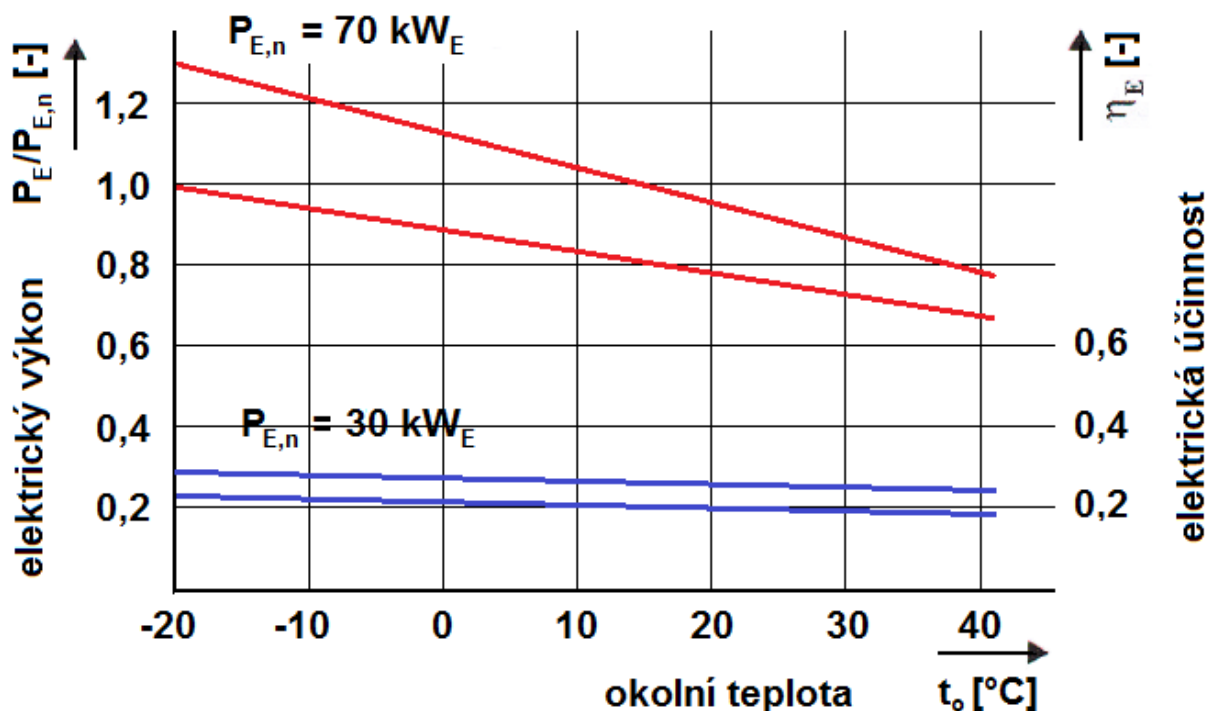
Elektrická účinnost mikroturbín se pohybuje okolo 20 – 30%. Celková účinnost dosahuje hodnoty 65-80 %. Při provozu mikroturbíny účinnost klesá s požadovaným výkonem, jak je vidět na *Obr. 1.8*. Pro zvýšení celkové účinnosti se používá spalínový výměník. [2]



Obr. 1.8 Závislost celkové účinnosti na zatížení [2]

1.3.3 Provozní parametry

Jak již bylo řečeno, změna požadovaného výkonu se provádí kombinací změny průtočného množství pracovní látky a změny teploty spalin na vstupu do mikroturbíny. Změna zatížení je rychlá. Mikroturbíny jsou schopny najet z nulového výkonu na jmenovitý za 15 sekund. *Obr. 1.8* ukazuje změny celkové účinnosti kogenerační jednotky s mikroturbínou při změně zatížení. [2]



Obr. 1.9 Závislost elektrického výkonu mikroturbíny na okolní teplotě [2]

Mikroturbíny vykazují také velkou závislost na okolních podmínkách, jako jsou teplota okolí a nadmořská výška, které ovlivňují hustotu vzduchu. Příklady závislostí elektrické účinnosti a výkonu na okolní teplotě pro mikroturbíny o jmenovitých výkonech 30 a 70 kW_E jsou znázorněny na Obr. 1. 9. [2]

1.3.4 Ostatní parametry

Mezi tyto parametry patří použité palivo, nároky na údržbu, životnost a spolehlivost, pohotovost a environmentální parametry. [2]

Jako palivo lze používat kapalná i plynná paliva. Většinou se používá zemní plyn. Je možné použít širokou škálu paliv. Mezi tyto paliva patří topný olej, propan butan, kerosen a případně i bioplyn. [1]

Běžná údržba se skládá z pravidelné kontroly zařízení, pravidelné výměny zvláště vzduchových a olejových filtrů, přičemž při použití kapalných paliv je nutnost častějších kontrol a případně i oprav. [2]

Životnost a spolehlivost mikroturbín se odhaduje na 40 000 až 80 000 provozních hodin. Díky tomu, že jsou mikroturbíny používány poměrně krátkou dobu, nejsou přesnější údaje k dispozici. [2]

Vzhledem k malému počtu rotujících částí je pohotovost kolem 98% až 99%. [2]

Hlavní emisní produkty mikroturbín jsou NO_x , CO, CO_2 a nespálené uhlovodíky. Mikroturbíny produkují zanedbatelné množství oxidu siřičitého (SO_2). Produkované množství SO_2 je závislé na množství síry v palivu. Hodnoty hluku jsou oproti klasickým plynovým turbínám mnohem nižší, což je způsobeno otáčkami a krátkými vedeními. [2]

1.3.5 Ekonomické parametry

Cena jednotky je závislá na její velikosti, systému zapojení kogenerační jednotky a požadovaných nárocích na provoz. Nákladové parametry ve srovnání s technickými parametry mikroturbín od různých výrobců jsou uvedeny v *Tab. 1.1*. [2]

1.3.6 Porovnání s ostatními zdroji elektrické energie

Mikroturbíny mají obecně o něco nižší elektrickou účinnost než výrobní jednotky se spalovacími motory. Nicméně vzhledem k jejich konstrukční jednoduchosti a menšímu počtu pohyblivých částí, mají mikroturbíny jednodušší instalaci, vyšší spolehlivost, nižší hladinu hluku a vibrací, nižší nároky na údržbu, nižší emise, kontinuální spalování a tím i nižší investiční náklady ve srovnání s pístovými motory. Emise mikroturbíny mohou dosáhnout až osmkrát nižší hodnoty než dieselové generátory. V současné době produkují o 50% méně emisí NO_x než nejmodernější spalovací motory. [7]

1.4 Provozní režimy mikroturbín

Mikroturbína může pracovat ve dvou základních režimech. První z těchto režimů je tzv. ostrovní režim a druhý je nazýván provoz do tvrdé sítě. Chování mikroturbíny v těchto stavech se poměrně dost liší, a proto je nutné tuto problematiku alespoň okrajově rozebrat.

1.4.1 Mikroturbína v ostrovním režimu

Ostrovním systémem nazýváme obecně takovou soustavu výroby, rozvodu a využití elektrické energie, která není připojena k distribuční síti. Můžeme se s nimi setkat například tam, kde není možné využívat elektrickou energii z distribuční sítě, nebo by vybudování elektrické přípojky bylo neúměrně drahé. V některých případech jsou ostrovní systémy instalovány čistě proto, že jejich provozovatelé předpokládají jejich finanční výhodnost kvůli elektřině vyrobené z vlastních, zpravidla obnovitelných zdrojů. Přejít do ostrovního režimu

je také děj, který nastane při havarijním stavu sítě. Tento stav je definován poklesem frekvence sítě na hodnotu nižší než 48,0 – 47,5 Hz, nebo naopak na hodnotu vyšší než 51,0 – 53,0 Hz. [11], [15]

Ostrovní režim je možný i u mikroturbín. Mikroturbína v tomto režimu zpravidla napájí elektrickou energií nějaký závod, sídliště apod. Je to speciální režim, který vyžaduje jinou regulaci.

V ostrovním režimu je nutné řídit frekvenci a výstupní napětí, které není při tomto provozu definováno elektrickou sítí.

1.4.2 Mikroturbína pracující do tvrdé sítě

Obecně tento provoz znamená, že výrobní zdroj elektrické energie je připojen přes blokový transformátor do elektrizační soustavy. Jmenovitý činný výkon zdroje udává, jestli bude zdroj připojen do distribuční, nebo přenosové soustavy, popřípadě na jakou napěťovou hladinu. Mikroturbíny patří do skupiny distribuovaných zdrojů o výkonu 1 kW až 50 MW. Jsou tedy připojeny do distribuční soustavy.

Přifázování mikroturbíny do sítě je prováděno automaticky střídačem. V provozu do tvrdé sítě je řízen požadovaný výkon mikroturbíny pomocí změny průtočného množství paliva.

1.5 Použití mikroturbín

Mikroturbíny se hodí pro různé aplikace díky jejich možnosti připojení, schopnosti pracovat paralelně se sítí nebo s jakýmkoliv jiným zdrojem elektrické energie, schopnosti poskytovat spolehlivý zdroj napájení a nízkému emisnímu profilu. Použití mikroturbín lze rozdělit do dvou základních skupin: Výroba pouze elektrické energie a kombinovaná výroba elektrické energie a tepla. Kromě použití v energetice, kde mikroturbína pohání generátor, mají mikroturbíny i jiné možnosti použití, kde jsou poháněny kompresory, čerpadla a dopravní prostředky. Příkladem tohoto použití je hybridní autobus. [7], [1]

1.5.1 Výroba pouze elektrické energie

Mikroturbíny vykazují spolehlivý zdroj elektrické energie a jsou schopné velmi rychle najet na jejich maximální výkon. Tyto vlastnosti umožňují jejich široké využití v diagramu denního zatížení. V současné době roste zájem o používání mikroturbín pro pokrytí špičkové

energie, právě kvůli jejich vysoké rychlosti dosažení maximálního výkonu. Mikroturbíny umožňují vyrábět elektrickou energii na místě spotřeby v době energetických špiček, čímž umožňují finanční úspory. Tzv. vyhlazování špiček snižuje množství energie odebrané z energetické sítě v době kdy, jsou odběrové tarify nejvyšší. Mikroturbíny je možné použít i v místech, kde není k dispozici napájecí síť. [7]

1.5.2 Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla

Při běžném provozu mikroturbína produkuje významné množství výfukových plynů s vysokou teplotou, které lze snadno pomocí výměníku použít pro výrobu tepelné energie. Teplo může být navraceno ve formě teplé vody, nízkotlaké páry nebo mohou být použity přímo výfukové plyny. Odpadní teplo může být použito pro pohon různých tepelných zařízení. Přímý proud výfukových spalin lze použít k sušení materiálů nebo výrobků (obilí, cihly). Sušení přímo proudem spalin je velmi ekonomické a spaliny z mikroturbíny jsou velmi čisté a mohou působit přímo na sušený materiál bez rizika poškození zdraví obsluhy. Hlavní použití mikroturbín s kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla je v průmyslových podnicích zaměřených na zpracování potravin, chemikálií a plastů, které potřebují teplo ve formě vody nebo nízkotlaké páry. [7]

1.6 Aplikace v ČR

První kogenerační jednotka se sériově vyrobenou mikroturbínou v ČR byla uvedena do provozu v Českém brodě v roce 2001. Tato mikroturbína o jmenovitém elektrickém výkonu 30 kW pochází z výroby firmy CAPSTONE. Teplo z mikroturbíny slouží pro vytápění bytů v panelových domech. První rok pracovala jednotka 7954 hodin, vyrobila 441 000 kWh tepla, 199 000 kWh elektrické energie a spotřebovala 98 000 m³ zemního plynu. [1]

Mikroturbíny od firmy CAPSTONE instalované v ČR jsou uvedeny v Tab. 1.2.

Tab. 1.2 Mikroturbíny CAPSTONE v ČR [4]

Město	Provozovatel	Typ mikroturbíny
Český brod	MTH Kolín s.r.o.	C30
Vesec	SAFINA a.s.	C200, C65
Ostrava	WEPLER FILTER s.r.o.	C200
Praha	SVJ	C200
Buštěhrad	ČVUT	C65, C30
Brno	VUT Brno	C30
Ostrava	VŠB – TU Ostrava	C30
Havířov	Gascontrol	C65
Český Těšín	-	C65

1.7 Hlavní výrobci

Mezi hlavní světové výrobce mikroturbín patří firmy CAPSTONE (USA), TURBEC (Itálie), INGERSOLD-RAND (USA) a ELLIOT POWER SYSTEM (USA-Japonsko). [6]

Společnost CAPSTONE se zabývá výrobou mikroturbín již od roku 1988. Prvních 10 let se jednalo o vývoj konstrukčního řešení. Teprve poté byla vyrobena první mikroturbína o výkonu 24 kW. Po úspěšném vyzkoušení bylo přistoupeno ke komerčnímu prodeji. CAPSTONE byla první firmou, která začala dodávat mikroturbíny pro komerční využití a v současnosti prodala již více jak 3500 zařízení. CAPSTONE vyrábí jednohřídelové mikroturbíny, které nemají převodovku a nepoužívají žádné maziva ani jinak ekologicky nebezpečný materiál. Může spalovat plynná a kapalná paliva včetně odpadních plynů. Typy mikroturbín od CAPSTONE a jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 1.3. [6]

Tab. 1.3 Vlastnosti Mikroturbín CAPSTONE [4]

Typ mikroturbíny		C30	C65	C200	C600	C1000
Příkon v palivu	kW	115	224	606	1818	3030
Elektrický výkon	kW	30	65	200	600	1000
Tepelný výkon (60/80°C)	kW	65	122	280	840	1400
Elektrická účinnost	%	26	29	33	33	33
Celková účinnost	%	83	84	80	80	80
Minimální tlak plynu (přetlak)	bar	4	5,2	5,9	5,9	5,9
Výstupní teplota spalin (z mikroturbíny)	°C	275	309	280	280	280
Hlučnost (ve vzdálenosti 10 m)	dB(A)	65	65	65	65	65
NOx	ppm	< 9				
Napětí	V	400	400	400	400	400
Výstupní proud (maximální)	A	46	100	290	870	1450
Rozměry:						
Délka	mm	1510	2000	3700	9100	9100
Šířka	mm	770	770	1700	2400	2400
Výška	mm	1800	1900	2500	2900	2900
Hmotnost	kg	405	1000	2270	13000	17000

Firma TURBEC byla založena v roce 1998. Tato firma vznikla na základě spolupráce mezi firmou Volvo Aero a ABB. V současnosti se společnost TURBEC zabývá vývojem, výrobou a prodejem vlastní mikroturbíny T100. Tato mikroturbína byla uvedena do chodu v roce 2000 a následovala její sériová výroba. Existují dvě varianty této turbíny T100P a T100PH. T100P vyrábí pouze elektřinu, zatímco T100PH slouží k výrobě elektřiny i tepla. [6]

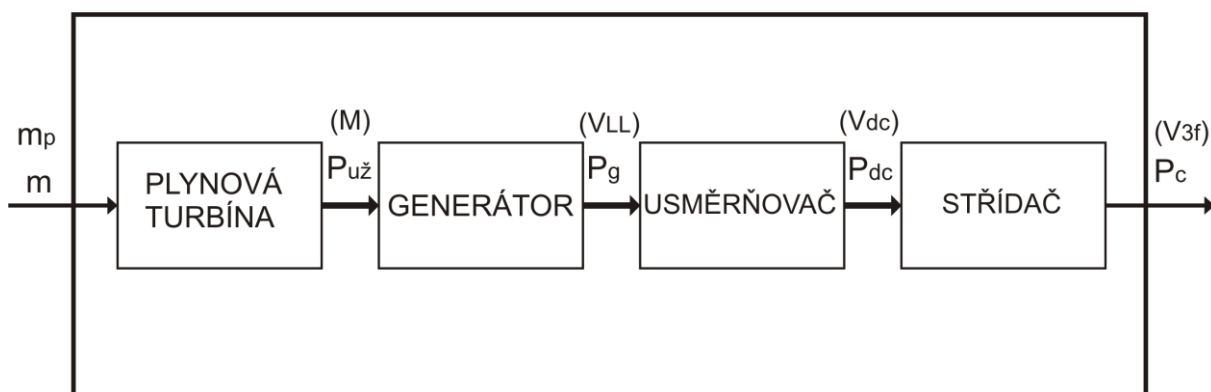
Firma INGERSOLD-RAND má již více než stoletou tradici v oblastech vytápění, klimatizací, chladicí techniky apod. a mimo jiné se zabývá i výrobou mikroturbín. Tato společnost vyrábí dva druhy mikroturbín. První má výkon 70 kWe a druhá 250 kWe. [6]

ELLIOT POWER SYSTÉM je americko-japonská společnost zabývající se různými odvětvími průmyslu, jako petrochemickým, olejářským a plynářským průmyslem, dále pak výrobou LNG, rafinací a výrobou elektrické energie. Další činností firmy je výroba zařízení vyrábějících elektrickou energii jak z obnovitelných zdrojů, tak i z primárních, včetně mikroturbíny. [6]

2 Matematický popis mikroturbíny

Existuje více možností jak matematicky popsat výrobu elektrické energie pomocí mikroturbíny. V této práci bude mikroturbína popsána z energetického hlediska, kde budou podstatné hmotnostní průtoky médií a jejich parametry. Bude zde popsána výroba pouze elektrické energie.

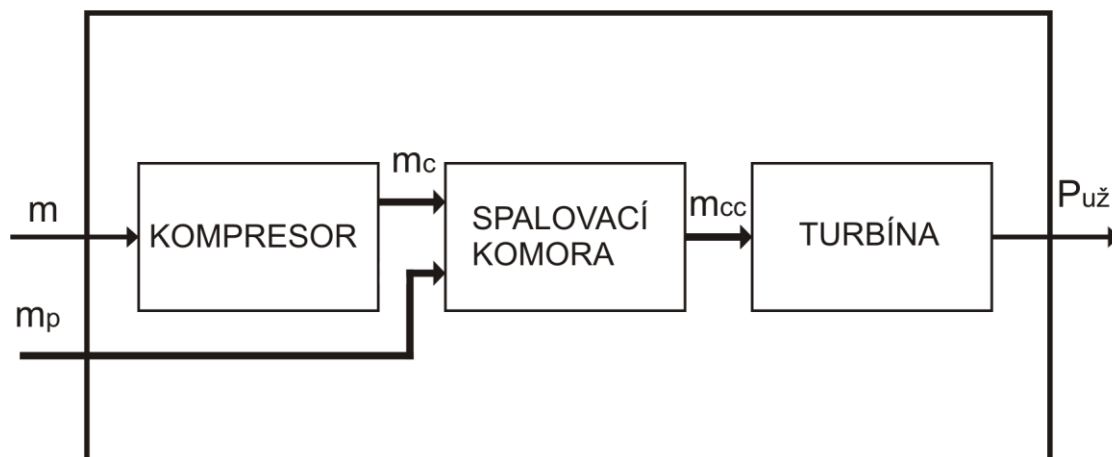
Mikroturbína se skládá, jak již bylo řečeno z plynové turbíny, generátoru a výkonové elektroniky pro úpravu elektrických parametrů. Elementární blokové schéma je vidět na *Obr. 2.1*. Pro mnou zvolený model je nejdůležitější součástí plynová turbína, ve které probíhá transformace energie obsažené v palivu na mechanickou práci a je tedy popsána podrobněji. Z turbíny vystupuje užitečný výkon ve formě mechanické práce (točivý moment na hřídeli). Mechanická práce je poté pomocí generátoru transformována na elektrickou energii, která je pomocí výkonové elektroniky upravena na požadované parametry.



Obr. 2.1 Blokové schéma mikroturbíny

2.1 Plynová turbína

Jak již bylo řečeno, plynová turbína se skládá z kompresoru, spalovací komory a turbíny (*Obr. 2.2*). Plynová turbína pracuje s Braytonovým oběhem a na jeho základě je vytvořen tento model. Braytonův oběh je podrobněji popsán v kapitole 1.2.2. Matematický popis plynové turbíny, která pohání mikroturbínu, se liší od popisu klasických plynových turbín jen v časových konstantách, které jsou u mikroturbíny kratší.



Obr. 2.2 Blokové schéma plynové turbíny

Kompresor

Do kompresoru vstupuje vzduch z okolí. Vztah mezi hmotnostním průtokem vstupního a výstupního vzduchu vypadá takto: [8]

$$m_c(t) = m(t - \tau_c) \quad (2.1)$$

m_c [kg/s] ... výsledný hmotnostní průtok vzduchu, m [kg/s] ... vstupní hmotnostní průtok vzduchu, τ_c [s] ... časová konstanta kompresoru

V kompresoru probíhá stlačení vstupního vzduchu. Tepelný výkon potřebný ke stlačení vstupního vzduchu je určen takto: [8]

$$P_{thc}(t) = 0,5 \cdot c_{p\ air} \cdot [m(t) + m_c(t)] \cdot [T_2(t) - T_1(t)] \quad (2.2)$$

P_{thc} [W] ... tepelná energie spotřebovaná kompresorem, T_2 [°C] ... teplota vzduchu vystupujícího z kompresoru, T_1 [°C] ... teplota vzduchu vstupujícího do kompresoru, $c_{p\ air}$ [J/(kg·°C)] ... průměrná měrná tepelná kapacita vstupního vzduchu

Mechanický výkon spotřebovaný kompresorem $P_k(t)$ souvisí se spotřebou tepla kompresoru takto: [8]

$$\tau_c \cdot \frac{d}{dt} P_k(t) = P_{thc}(t) - P_k(t) \quad (2.3)$$

P_{thc} [W] ... tepelná energie spotřebovaná kompresorem

Spalovací komora

Do spalovací komory vstupuje stlačený vzduch z kompresoru a palivo. Hmotnostní průtok paliva vsřikovaného do spalovací komory je úměrný hmotnostnímu průtoku stlačeného vzduchu z kompresoru takto: [8]

$$m_p(t) = q^{-1} \cdot m(t) \quad (2.4)$$

m_p [kg/s] ...hmotnostní průtok paliva, q [-] ...poměrné množství paliva, m [kg/s] ...vstupní hmotnostní průtok vzduchu

Ve spalovací komoře probíhá proces hoření směsi paliva a vzduchu. Hmotnostní průtok spalin na výstupu spalovací komory: [8]

$$m_{cc}(t) = m_c(t - \tau_{cc}) + m_p(t - \tau_{cc}) \quad (2.5)$$

m_{cc} [kg/s] ...hmotnostní průtok výfukových plynů ze spalovací komory, τ_{cc} [s] ...časová konstanta spalovací komory, m_c [kg/s] ...výsledný hmotnostní průtok vzduchu

Turbína

Do turbíny vstupují spaliny ze spalovací komory. Vztah mezi hmotnostním průtokem vstupních a výstupních spalin vypadá takto: [8]

$$m_t(t) = m_{cc}(t - \tau_t) \quad (2.6)$$

m_t [kg/s] ...hmotnostní průtok turbínou, τ_t [s] ...časová konstanta turbíny, m_{cc} [kg/s] ...hmotnostní průtok výfukových plynů opouštějících spalovací komoru

Tepelná energie generovaná turbínou: [8]

$$P_{tht}(t) = 0,5 \cdot c_{p_{exh}} \cdot [m_t(t) + m_{cc}(t)] \cdot [T_4(t) - T_6(t)] \quad (2.7)$$

P_{tht} [W] ...tepelná energie generovaná turbínou, T_4 [°C] ...výstupní teplota spalin ze spalovací komory, T_6 [°C] ...výstupní teplota spalin z turbíny, $c_{p_{exh}}$ [J/(kg·°C)] ...průměrná měrná tepelná kapacita výfukového plynu

Turbína generuje mechanický výkon $P_t(t)$: [8]

$$\tau_t \cdot \frac{d}{dt} P_t(t) = P_{tht}(t) - P_t(t) \quad (2.8)$$

P_t [W] ...výkon turbíny, P_{tht} [W] ...tepelná energie generovaná turbínou

Užitečný mechanický výkon generovaný mikroturbínou $P_{už}(t)$ je rozdíl mechanického výkonu generovaného turbínou a výkonu spotřebovaného kompresorem: [8]

$$P_{už}(t) = P_t(t) - P_k(t) \quad (2.9)$$

$P_t [W]$...výkon turbíny, $P_k [W]$...výkon spotřebovaný kompresorem

2.2 Generátor

V generátoru probíhá transformace mechanické práce na elektrickou energii. V případě mikroturbíny se jedná o synchronní stroj s permanentními magnety. Tento stroj může být matematicky popsán například Parkovo transformací. Následující rovnice, které vycházejí z Parkovy transformace, se používají pro modelování synchronního stroje s permanentními magnety:

Pro napětí v ose d platí: [9]

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - L_q \cdot p \cdot \omega_r \cdot i_q \quad (2.10)$$

$R_s [\Omega]$...odpor statorového vinutí, $i_q [A]$...proud v ose q, $i_d [A]$...proud v ose d, $L_q [H]$...indukčnost v ose q, $L_d [H]$...indukčnost v ose d, $p [-]$...počet pólů, $\omega_r [rad/s]$...úhlová rychlost rotoru

Pro napětí v ose q platí: [9]

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + L_d \cdot p \cdot \omega_r \cdot i_d + \lambda \cdot p \cdot \omega_r \quad (2.11)$$

$R_s [\Omega]$...odpor statorového vinutí, $i_q [A]$...proud v ose q, $i_d [A]$...proud v ose d, $L_q [H]$...indukčnost v ose q, $L_d [H]$...indukčnost v ose d, $p [-]$...počet pólů, $\omega_r [rad/s]$...úhlová rychlost rotoru, $\lambda [Wb]$...magnetický tok propojující rotor a stator

Točivý moment generátoru: [9]

$$T_e = 1.5 \cdot p \cdot [\lambda \cdot i_d + (L_q - L_d) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (2.12)$$

$i_q [A]$...proud v ose q, $i_d [A]$...proud v ose d, $L_q [H]$...indukčnost v ose q, $L_d [H]$...indukčnost v ose d, $p [-]$...počet pólů, $\omega_r [rad/s]$...úhlová rychlost rotoru, $\lambda [Wb]$...magnetický tok propojující rotor a stator

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T_e - T_{shaft}) \quad (2.13)$$

J [kg.m²] ...kombinovaný setrvačný moment rotoru a zátěže, T_{shaft} [N.m] ...točivý moment hřídele, T_e [N.m] ...točivý moment generátoru

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (2.14)$$

ω_r [rad/s] ...úhlová rychlost rotoru, θ_r [rad] ...úhlové natočení rotoru

Pro tuto práci, kde jde zejména o popsání mikroturbíny z energetického hlediska a zajímá nás pouze výstupní výkon generátoru, je tento popis zbytečně složitý. Bude tedy postačující generátor popsat pouze jeho účinností, kterou se vynásobí výkon z plynové turbíny.

2.3 Výkonová elektronika

Výkonová elektronika mikroturbíny obsahuje usměrňovač a střídač. Matematický popis může být opět provedený několika způsoby. Do usměrňovače vstupuje elektrický proud o vysoké frekvenci, který je následně usměrněn. Usměrněný proud je následně rozstřídan ve střídači. Popis procesu usměrnění a rozstřídání závisí na typu použitého měniče. Matematický popis tohoto děje je velmi složitý. Pro tuto práci bude postačující popsat parametry na vstupu a výstupu usměrňovače a střídače. Pro model mikroturbíny v další části práce bude podobně jako u generátoru postačovat popsat usměrňovač a střídač pouze jejich účinností.

Usměrňovač

Vstupní parametry vstupující do střídače pro jednu fázi lze popsat takto:

$$\begin{aligned} U_{LL} &= U_{LLm} \cdot \cos(\omega_{LL} \cdot t) \\ I_{LL} &= I_{LLm} \cdot \cos(\omega_{LL} \cdot t) \end{aligned} \quad (2.15)$$

U_{LLm} [V] ...maximální hodnota napětí generátoru, I_{LLm} [V] ...maximální hodnota proudu generátoru, ω_{LL} [rad/s] ...úhlová frekvence napětí a proudu generátoru

Vstupní výkon:

$$P_g = 3 \cdot \frac{U_{LLm}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{LLm}}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi_2 \quad (2.16)$$

φ_2 [rad] ...fázový posun mezi napětí a proudem generátoru

Výstupní výkon z usměrňovače:

$$P_{dc} = U_{dc} \cdot I_{dc} \quad (2.17)$$

$U_{dc} [V]$...usměrněné napětí, $I_{dc}[A]$...usměrněný proud

Střídač

Výstupní parametry ze střídače pro jednu fázi:

$$U_a = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.18)$$

$$I_a = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$U_m [V]$... maximální hodnota výstupního napětí ze střídače, $I_m [A]$...maximální hodnota výstupního proudu ze střídače, $\omega [rad/s]$...úhlová frekvence výstupního napětí a proudu ze střídače

Pro výstupní výkon ze střídače platí:

$$P_c = 3 \cdot \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi \quad (2.19)$$

$\varphi [rad]$...fázový posun mezi napětí a proudem vystupujících ze střídače

3 Model mikroturbíny v programu SWING

Model mikroturbíny je vytvořen v programu SWING. V tomto softwaru jsou vytvořeny například trenažéry pro výcvik operátorů elektráren ve školicím středisku VSE a.s. v Chomutově.

3.1 Popis programu SWING

SWING je software pro tvorbu multimediálních aplikací pro využití v komerčních oblastech, v oblastech odborné přípravy a v technických oborech v podobě simulátorů a trenažérů. Je to produkt francouzské společnosti CORYS, která se zabývá vývojem simulátorů pro dopravu a energetiku. Společnost byla založena v roce 1989 a nyní má více než 230 zaměstnanců. SWING umožňuje tvorbu aplikací v objektově orientovaném prostředí a nevyžaduje hlubší znalosti programování. Na spuštění výsledné aplikace není nutné mít editor SWING nainstalovaný na počítači. [12], [13]



Obr. 3.1 Logo programu SWING [12]

Editor SWING se skládá ze tří částí, aby nejlépe vyhovoval potřebám uživatelů. Tyto části jsou SWING multimedia, SWING training a SWING engineering. SWING multimedia umožňuje vytvořit animovanou interaktivní podporu pro prodejní nástroje, interaktivní prezentace a specializované terminály. SWING training poskytuje tvorbu řešení podpory školení a výukových programů. SWING engineering umožňuje prezentovat daný průmyslový projekt, rozvíjet technickou výuku a podporuje integraci multimédií a numerické simulace v různých oblastech. [12]

Aplikace vytvořená v editoru SWING se skládá z jednotlivých stránek. Tyto stránky mohou obsahovat rozhraní nebo výpočetní objekt. Objekty a stránky jsou základní subjekty v rámci SWINGu. Princip fungování spočívá v přiřazení objektů k sobě a propojení stránek pomocí navigačních prvků. Každý objekt odpovídá základní funkci a sdružení několika objektů umožňuje jejich komunikaci. [12]

SWING obsahuje čtyři druhy editorů pro modelování daných problémů. Pomocí těchto editorů je možné vytvořit modely velmi rychle a jasně, aniž by bylo třeba napsat jediný řádek

kódu. Jednoduše lze z knihovny vybrat grafické objekty s proměnnými parametry a jejich propojením vytvořit obvod. Každý editor obvodu je navržen tak, aby usnadnil design a řešení fyzikálních nebo matematických jevů, které jsou pro něj specifické. [12]

Electrix

Tento editor je určen pro simulaci elektrických napájecích systémů a točivých elektrických strojů. Umožňuje studium vlastností elektrického napájecího systému od výrobních generátorů až po jednotlivé spotřebitele. Lze modelovat v oblasti střídavých i stejnosměrných proudů. Mezi prvky, které Electrix obsahuje, patří transformátory, generátory, prvky charakterizující vedení a podobně. Electrix je možné propojit s ostatními editory (Controlix a Hydraulix) pro vytvoření výsledného systému. [12], [13]

Hydraulix

Tento editor je určen pro simulaci obvodů s kapalinami a plyny. Hydraulix obsahuje prvky typu turbína, potrubí, ventily a podobně. Hydraulix je možné propojit s ostatními editory (Electrix a Controlix) pro vytvoření výsledného systému. [12], [13]

Controlix

Controlix je sekvenční modelovací nástroj pro výpočet vztahů mezi proměnnými a mezi objekty. Poskytuje grafické programování obvodů integrujících analogové, logické, multimediální a automatizační funkce. Controlix je určen hlavně pro řízení, ale umožňuje i modelování jakéhokoliv typu matematické nebo fyzikální rovnice. Je velmi efektivní pro simulaci kontroly a řízení v souvislosti se systémy Electrix a Hydraulix. [12], [13]

Sequence manager

Jedná se o nástroj pro grafický popis fungování automatického logického obvodu. Skládá se z jednotlivých fází, přechodů a orientovaných odkazů. Fáze a přechody jsou propojeny orientovanými odkazy, které musí být orientovány pouze v jednom směru. Sequence manager vám tak umožňuje provádět operace zahrnující otevírání stránky, navigaci mezi stránkami nebo výměnu pásma proměnných. [12], [13]

3.2 Vlastní model

Cílem modelu je simulovat energetické chování mikroturbíny. Model by měl simulovat výrobu pouze elektrické energie. Na vstupu do mikroturbíny je hmotnostní průtok vzduchu a

hmotnostní průtok paliva. Na výstupu je generovaný elektrický výkon. Další funkcí modelu je chování při náhlém snížení požadovaného výkonu, tj. při přechodu do ostrovního provozu.

Při tvorbě modelu jsem vycházel z matematického popisu z kapitoly 2. Pro ladění modelu a ověření jeho správné funkčnosti jsou použity některé hodnoty z [8], které odpovídají mikroturbíně CAPSTONE C60. Tyto hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 3.1*.

Tab. 3.1 Vlastnosti Mikroturbíny CAPSTONE C60 [8]

Poměr vzduchu a paliva	93,1
Teplota vzduchu na vstupu do kompresoru	28,6 °C
Teplota vzduchu na výstupu z kompresoru	201,9 °C
Teplota na výstupu ze spalovací komory	922,9 °C
Teplota na výstupu z turbíny	634,9 °C
Účinnost generátoru	90,6 %
Účinnost výkonové elektroniky	94,5 %

Základní koncepce každého modelu vytvořeného v programu SWING je vytvoření nového projektu, který se skládá z jednotlivých stran (page). Model, jeho ovládání a grafická podoba mohou být vytvořeny v rámci jedné nebo více stran. Na tuto stranu se vkládají editory obvodů, grafické animace, zobrazování veličin, spouštěcí tlačítka a podobné objekty. Model mikroturbíny je vytvořen v rámci jedné strany.


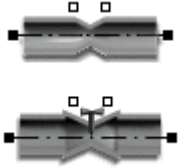


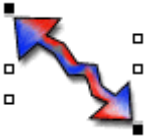


Při tvorbě modelu mikroturbíny se ukázalo jako vhodné si model rozdělit na model plynové turbíny a na model elektrické části. Model plynové turbíny zahrnuje samotnou spalovací turbínu, na jejímž vstupu je hmotnostní průtok paliva a vzduchu a na výstupu je točivý moment na hřídeli. Tato část je zhotovena v editoru Hydraulix. Elektrická část zahrnuje generátor a výkonovou elektroniku. Vstup do této části modelu je točivý moment a výstupem je již elektrický výkon. Namodelování této části v editoru Electrix se ukázalo příliš složité, protože nastavení prvků modelujících generátor a další prvky vyžaduje podrobný popis jejich vlastností a rozbor těchto vlastností není předmětem této práce. Elektrická část je proto namodelována v editoru Controlix. Obě části jsou poté propojeny pomocí editoru Controlix, kde je namodelováno i jednoduché řízení přechodu mikroturbíny do ostrovního provozu.

Další část modelu obsahuje grafické rozhraní, kde jsou zobrazeny vstupní, provozní a výstupní veličiny modelu a jednoduché ovládání celého systému. Pro názornost je zde zobrazen schématický náčrt mikroturbíny.

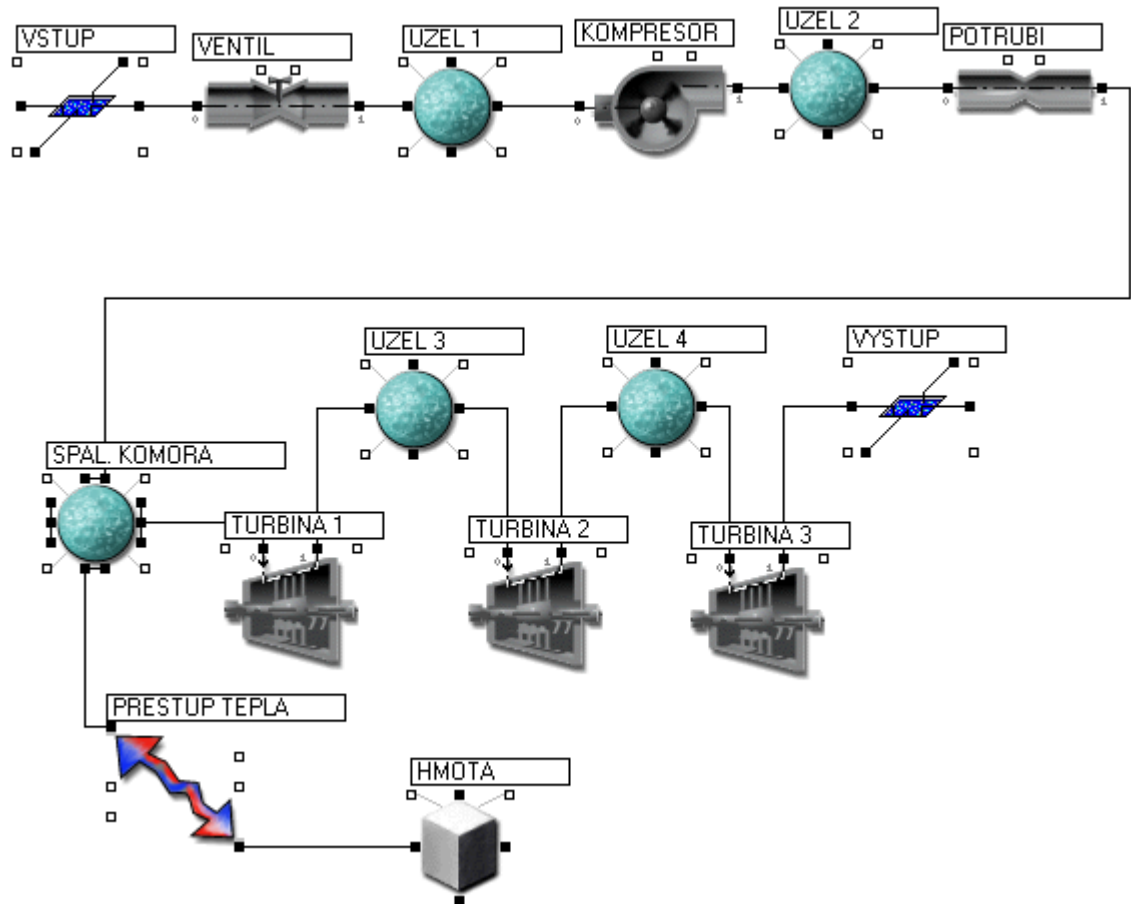
3.2.1 Model plynové turbíny

Tato část modelu je vytvořena v editoru Hydraulix a některé pomocné výpočty v editoru Controlix. V Tab. 3.2 jsou uvedeny použité prvky z Hydraulixu a popis jejich funkce.

Tab. 3.2 Použité bloky z Hydraulix [12]

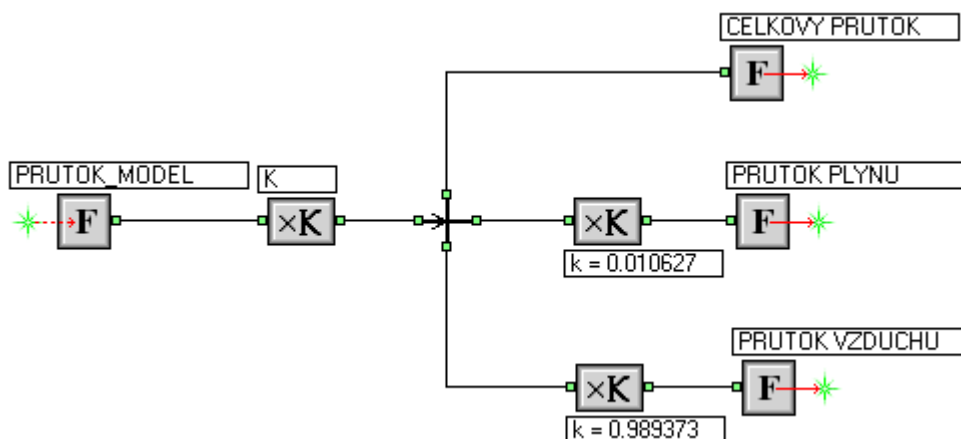
Značka	Název	Popis funkce
	Two-phased homogenous nodes	Standardní homogenní uzel používaný v obvodech s tekutinami v kapalném, plynném nebo dvoufázovém skupenství
	Pipes and valves	Model ventilu, nebo potrubí s tlakovou ztrátou.
	Centrifugal pump	Model odstředivého čerpadla, ventilátoru, popřípadě kompresoru.
	Steam turbine (critical)	Model parní turbíny.
	Heat exchange	Modelování tepelného toku mezi dvěma objekty o různých teplotách.
	Boundary conditions	Nastavení okrajových podmínek v obvodech s tekutinami.
	Solid mass	Model pevné hmoty s tepelnou setrvačností.

Model je díky jednoznačnosti a jednoduchosti postaven na základě hmotnostních průtoků. Základní schéma modelu plynové turbíny je vidět na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Model plynové turbíny v Hydraulix

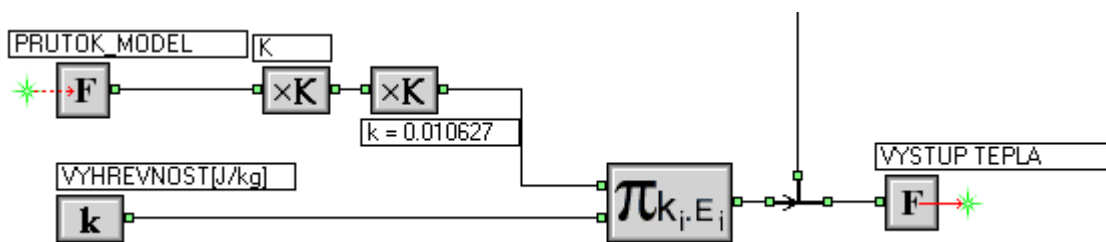
Při tvorbě modelu se muselo sáhnout k některým zjednodušením. První zjednodušení představuje namodelování celkového hmotnostního průtoku do turbíny místo odděleného hmotnostního průtoku vzduchu a paliva, jako je tomu ve skutečnosti. Toto zjednodušení bylo provedeno z toho důvodu, že SWING počítá hmotnostní průtok z rozdílu tlaků a model s oddělenými hmotnostními průtoky se ukázal jako velmi nestabilní a obtížně nastavitelný. Výpočet hmotnostního průtoku vzduchu a paliva z celkového hmotnostního průtoku byl proveden vedlejším výpočtem v Controlixu. Tento výpočet je vidět na Obr. 3.3. Výpočet vychází z poměru hmotnostního průtoku vzduchu k hmotnostnímu průtoku paliva 93,1 : 1.



Obr. 3.3 Výpočet hmotnostních průtoků v Controlix

Model začíná vstupem hmotnostního průtoku do mikroturbíny. Vstup je realizován pomocí bloku Boundary condition, kde se nastavují vstupní parametry. Dalším prvkem modelu je ventil, kterým je regulován hmotností průtok. Model pokračuje blokem Two-phased homogenous node, který je zde nutný jen jako uzel pro propojení. Dále se zde nachází blok Centrifugal pump, který simuluje kompresor. Následuje uzel pro propojení a po něm model potrubí. Dalším blokem ve schématu je opět Two-phased homogenous nodes, ale zde již představuje spalovací komoru. Touto cestou je přiveden celkový hmotnostní průtok. Teplo, které zde vzniká, je přivedeno externím výpočtem. Tento výpočet navazuje na předchozí výpočet hmotnostních průtoků. Z hmotnostního průtoku paliva a jeho výhřevnosti je vypočten vzniklý tepelný výkon. Tento výpočet je vidět na Obr. 3.4. Tento tepelný výkon je přiveden do uzlu představujícího spalovací komoru. Z tohoto uzlu je již vstup do turbíny. Turbína je rozdělena na 3 části, aby lépe odpovídala realitě. Tyto 3 turbíny jsou propojeny pomocí uzlů. Výstup z turbíny je točivý moment na hřídeli. SWING bohužel neumožňuje propojení turbíny a kompresoru, takže pro získání výsledného momentu z plynové turbíny bylo nutné provést externí výpočet, kde se od momentu z turbíny odečte moment potřebný pro chod kompresoru. Toto zjednodušení vnáší do modelu další nepřesnosti, protože potřebný výkon kompresoru se mění se zatížením mikroturbíny. Potřebný výkon kompresoru byl stanoven podle [8] na 51 % z výkonu turbíny. Do uzlu Spalovací komory je ještě připojen prvek Heat exchage, na který navazuje prvek Solid mass. Tyto dva prvky modelují ohřívání spalovací komory. Na výstupu z turbíny je blok Boundary condition, který určuje parametry okolní atmosféry.

Jako palivo v modelu byl zvolen zemní plyn. U zemního plynu byl uvažován stoprocentní podíl metanu a výhřevnost byla stanovena na 50 MJ/kg. Dále bylo uvažováno dokonalé spalování. Atmosférický tlak byl stanoven na hodnotu 101325 Pa.



Obr. 3.4 Výpočet tepla v Controlix

Další krok v realizaci modelu představovalo naladění sestaveného modelu. Tato část modelu se ukázala jako velmi obtížná, protože každý prvek v modelu obsahuje několik parametrů, které ovlivňují jeho vlastnosti. Jednalo se o hydraulickou konduktivitu ventilu a potrubí, nastavení kompresoru a turbíny. Většina těchto parametrů byla nastavena experimentálně, protože tyto parametry nejsou dostupné a většinou ani měřitelné. Při práci s turbínou bylo zjištěno, že program SWING obsahuje v knihovně prvků pouze parní turbínu, která má některé vlastnosti odlišné oproti plynové turbíně. Tato parní turbína očekává, že má na svém vstupu páru, která má jiné vlastnosti oproti spalínám. Tento problém se ukázal jako velmi zásadní a do jisté míry ovlivňuje výsledky modelu. Při řešení tohoto problému bylo nutné vycházet z faktu, že parametry na vstupu do turbíny určují entalpii tohoto média pomocí *i-s* diagramu vodní páry. Turbína poté z této entalpie a entalpie na výstupu vypočítá moment na hřídeli. V tomto modelu jsou však pracovním médiem spaliny. Bylo tedy nutné z daných parametrů určit entalpii přehřáté páry a pak ze stejných parametrů entalpii spalin. Poměr mezi těmito entalpiemi stanovil koeficient, kterým je nutné přepočítat buď výstupní moment z turbíny, nebo hmotnostní průtok, který je potřebný pro daný výkon. Při zjišťování entalpie spalin jsem uvažoval, že vlastnosti spalin přibližně odpovídají vlastnostem vzduchu o stejných parametrech. Toto zjednodušení bylo nutné vzít v úvahu z toho důvodu, že získat *i-s* diagram spalin je prakticky nemožné. V tomto případě jsem zvolil přepočítání hmotnostního průtoku. Přepočítání tímto koeficientem *K* je vidět na Obr. 3.3. Výpočet vyjadřuje rovnice (3.1).
















$$K = \frac{i_v}{i_p} \quad (3.1)$$

i_v [kJ/kg] ...entalpie vzduchu, i_p [kJ/kg] ...entalpie vodní páry

3.2.2 Model elektrické části

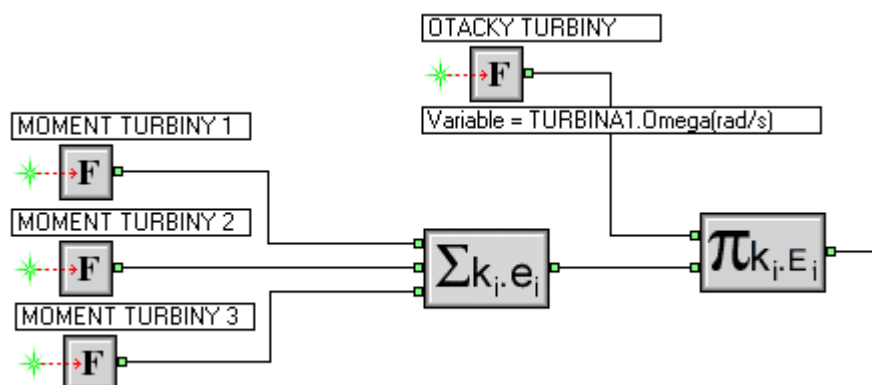
Elektrická část modelu je vytvořena v editoru Controlix. V Tab. 3.3 jsou uvedeny použité prvky a popis jejich funkce. Popis této části modelu je rozdělen podle jednotlivých funkcí, které zajišťují.

Tab. 3.3 Použité bloky z Controlix [12]

Značka	Název	Popis funkce
	Real input/output	Vstup/výstup reálných proměnných z ostatních simulačních objektů
	Integer input/output	Vstup/výstup celočíselných proměnných z ostatních simulačních objektů
	Real constant	Definuje reálné číslo.
	Sum of two reals	Součet reálných čísel s nebo bez multiplikačních koeficientů
	Multiplication of two reals	Součin reálných čísel s nebo bez multiplikačních koeficientů
	PID controller on difference	PID regulátor na bázi rozdílu regulované veličiny.
	Ramp generator	Generování signálu rampy, tj. náběh signálu na logický povel.
	Real input selector	Provedení výběru mezi 2 signály pomocí logického výběru proměnné.
	Upper comparator	Porovnání dvou reálných proměnných.
	Multiplication by a constant	Vynásobení hodnoty proměnné konstantou.
	Scaling	Vytvoření měřítka signálu.
	Connections	Rozdělení informace do více směrů.
	Position controller of valve opening	Ovládání otevření ventilu umístěného v Hydraulixu.
	Real / double converter	Převod reálné proměnné na proměnnou typu double.
	Subtraction	Vytvoří rozdíl mezi dvěma reálnými proměnnými.

Výpočet výkonu

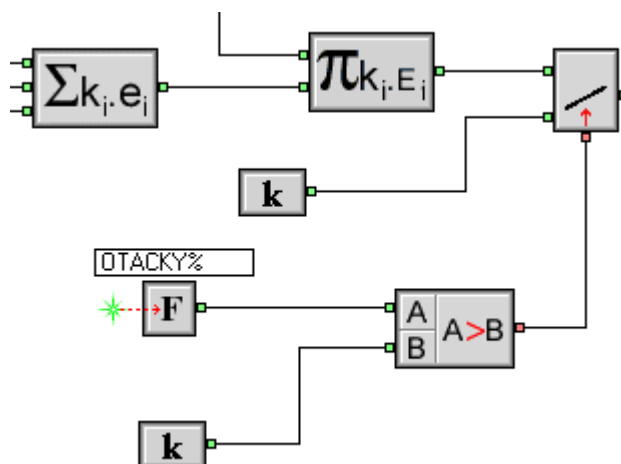
První část modelu elektrické části počítá výkon generátoru. Do této části vstupuje točivý moment z hřídele turbíny. Nejprve jsou sečteny točivé momenty z jednotlivých částí turbíny. Výsledný točivý moment je vynásoben otáčkami turbíny. Výsledek tohoto součinu je ještě přenásoben účinností generátoru a výsledek je již elektrický výkon generátoru. Tento výpočet je vidět na *Obr. 3.5*.



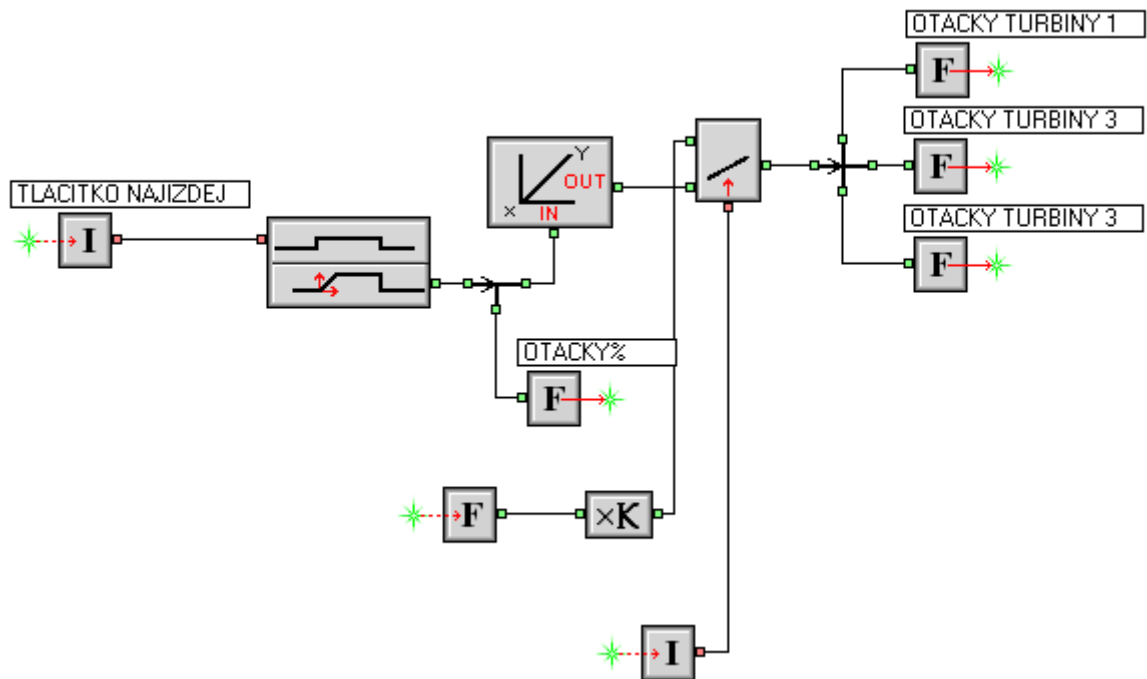
Obr. 3.5 Výpočet výkonu v Controlix

Najíždění na jmenovitý výkon

Tato část modeluje najíždění turbíny na jmenovitý výkon. Funkce spočívá v tom, že na povel od tlačítka se začnou zvyšovat otáčky turbíny a od nastavené hodnoty otáček začne turbína produkovat výkon. Povel od tlačítka aktivuje blok Ramp generator, který vytvoří signál rostoucí od 0 do 100% po zadaný čas. Tento signál je následně pomocí bloku Scaling převeden na otáčky. Otáčky jsou zadávány přímo do turbíny. Po najetí na jmenovité otáčky jsou otáčky dále řízeny pomocí jiného principu. Provedení je vidět na *Obr. 3.7*. Porovnání otáček s nastavenou hodnotou otáček je vidět na *Obr. 3.6*.



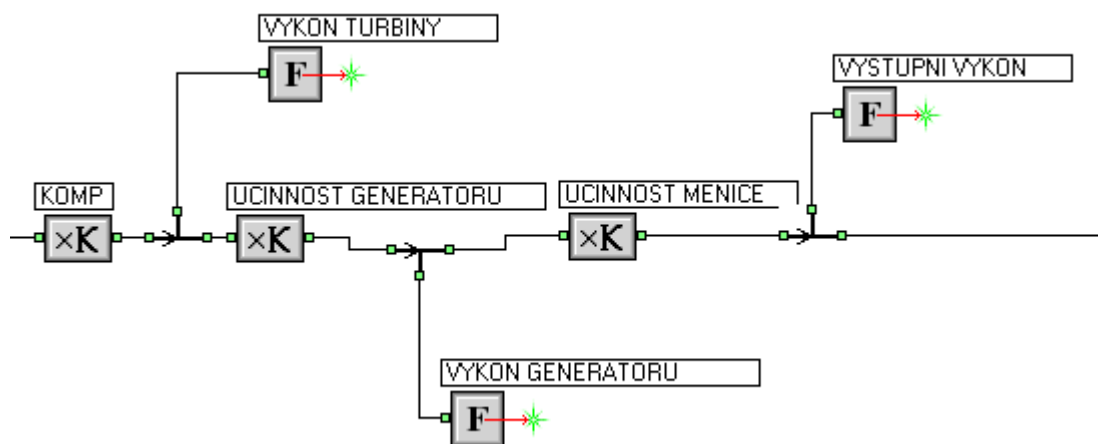
Obr. 3.6 Porovnání otáček v Controlix



Obr. 3.7 Simulace najždění v Controlix

Generátor a výkonová elektronika

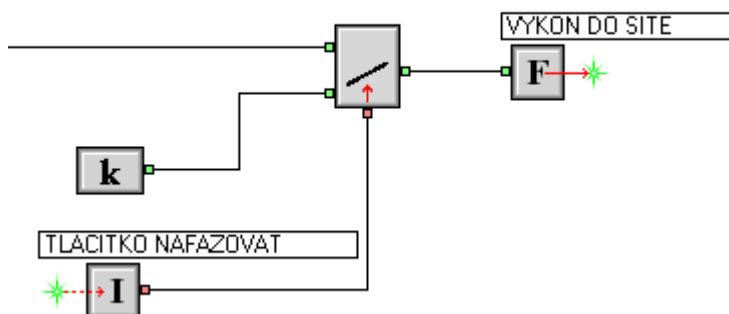
Vzhledem k charakteru celého modelu jsou generátor a výkonová elektronika definovány pouze účinností, takže ve výsledku pouze sníží celkový výkon celého systému. Realizace v Controlix je provedena pronásobením konstantou, která obsahuje hodnotu účinnosti. Je zde zadána účinnost generátoru a účinnost usměrňovače se střídačem podle Tab. 3.1.



Obr. 3.8 Realizace generátoru a výkonové elektroniky v Controlix

Fázování

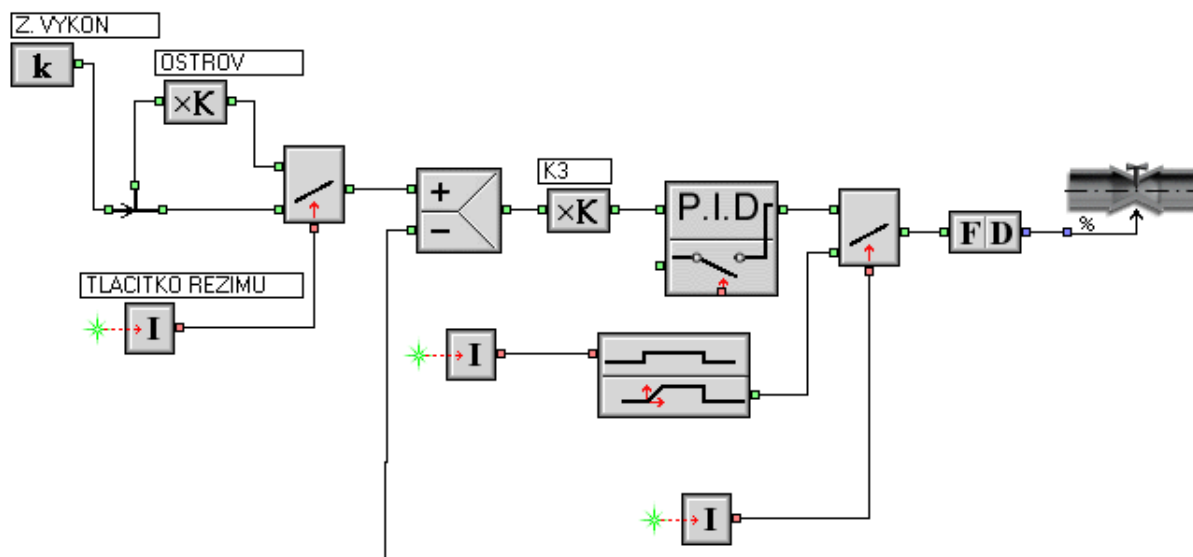
Fázování je řešeno pouze povelem od tlačítka. Při stisknutí tohoto tlačítka již mikroturbína dodává výkon do sítě. Vstup povelu od tlačítka je realizován blokem Real input selector. Bez aktivace tlačítkem je výkon dodávaný do sítě roven nule.



Obr. 3.9 Simulace přifázování k síti v Controllix

Přechod do ostrovního provozu

Tato část modelu realizuje přechod provozování mikroturbíny ze sítě do ostrovního provozu. V tomto modelu se v podstatě jedná pouze o požadavek na náhlou změnu elektrického výkonu mikroturbíny. Změna výkonu se provede změnou hmotnostního průtoku paliva. Tato operace je v modelu řešena pomocí PID regulátoru. Nejprve je nutné vytvořit rozdíl mezi žádanou a skutečnou hodnotou pomocí bloku Subtraction. Tento rozdíl je poté přiveden na vstup PID regulátoru. Výstup z regulátoru, tj. akční veličina, je procentní otevření ventilu. Vzhledem k předchozímu zjednodušení hmotnostního průtoku je regulován celkový hmotnostní průtok oproti regulaci hmotnostního průtoku paliva ve skutečnosti. Přepnutí požadovaného stavu je realizováno tlačítkem. Zapojení je vidět na Obr. 3.10. Na obrázku je také vidět blok Ramp generator, který realizuje otevírání ventilu při najíždění.







Obr. 3.10 Zapojení regulátoru pro přechod do ostrovního režimu

3.2.3 Grafická část a ovládání modelu

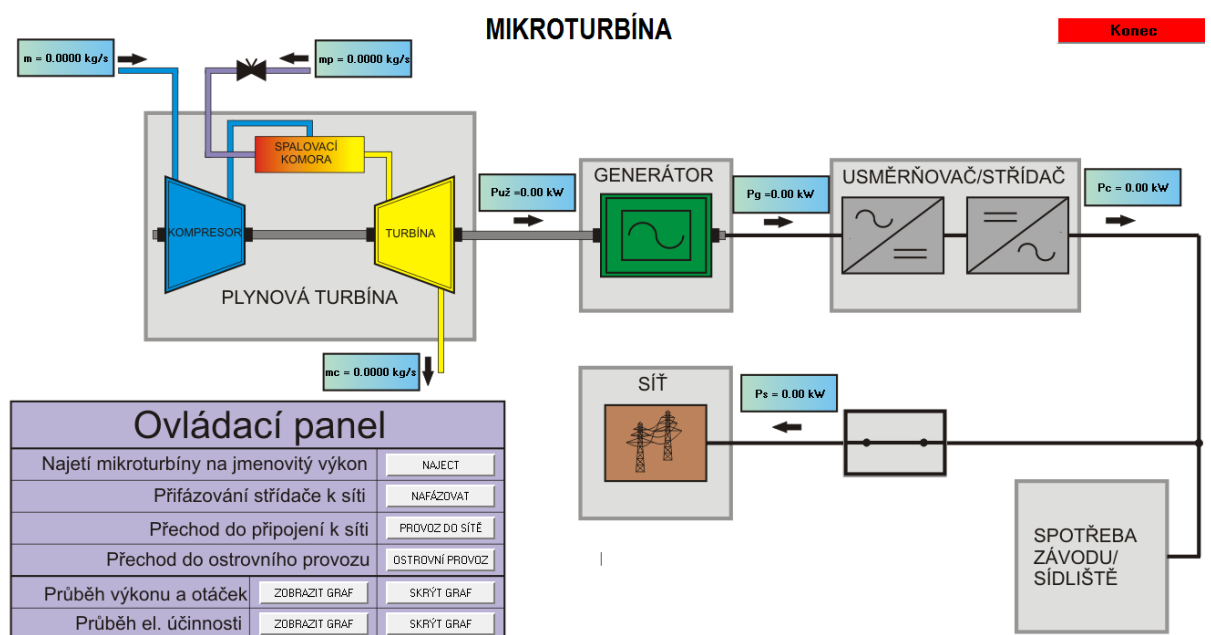
Tato část modelu zahrnuje grafické rozhraní modelu. Pozadí pro tuto část je vytvořeno externě v grafickém editoru a vloženo na stranu. Pro ovládání modelu, zobrazení veličin a grafů jsou použity objekty z prostředí SWING. Výčet těchto prvků a jejich funkce je uvedena v Tab. 3.4.

Tab. 3.4 Objekty použité v grafickém rozhraní [12]

Značka	Název	Popis funkce
	Variable display	Zobrazení hodnoty proměnné.
	Text	Zobrazení textu na pozadí s různými vlastnostmi.
	Curve $y = f$ (Time)	Vykreslování křivek typu $y = f(t)$ do jednoho grafu
	Trigger	Komunikace mezi objekty v grafické vrstvě. Aktivuje jiné objekty automaticky nebo na stisknutí tlačítka.

Každý model musí obsahovat objekt Trigger, který po nastavení automaticky aktivuje editory pro modelování obvodů, grafy a další objekty. Tento Trigger není ve výsledné aplikaci viditelný. Další objekt umístěný na stránce je Variable display. Pomocí tohoto objektu jsou v modelu zobrazeny hodnoty hmotnostních průtoků a výkonů. Časový průběh

elektrického výkonu otáček je zobrazen pomocí Curve $y = f(\text{Time})$. Tento objekt je zobrazen až po aktivaci Triggerem nastaveným jako tlačítko. V modelu je tento Trigger zobrazen jako tlačítko s názvem „ZOBRAZIT GRAF“. Pro skrytí grafu je zde další Trigger s názvem „SKRÝT GRAF“. Stejným způsobem je vytvořen graf pro časový průběh elektrické účinnosti mikroturbíny. Model obsahuje další Triggery pro zahájení najíždění, fázování a přepínání mezi ostrovním provozem a provozem do sítě. U těchto Triggerů po se po aktivaci tlačítkem přepíše hodnota proměnné do stavu 0 nebo 1. Tato proměnná je vstupem do bloků v Controlix, které podle změny hodnoty proměnné vykonají určitou funkci. V pravém horním rohu je umístěno tlačítko pro konec aplikace. Grafická podoba modelu je vidět na *Obr. 3.11*.



Obr. 3.11 Grafická podoba modelu

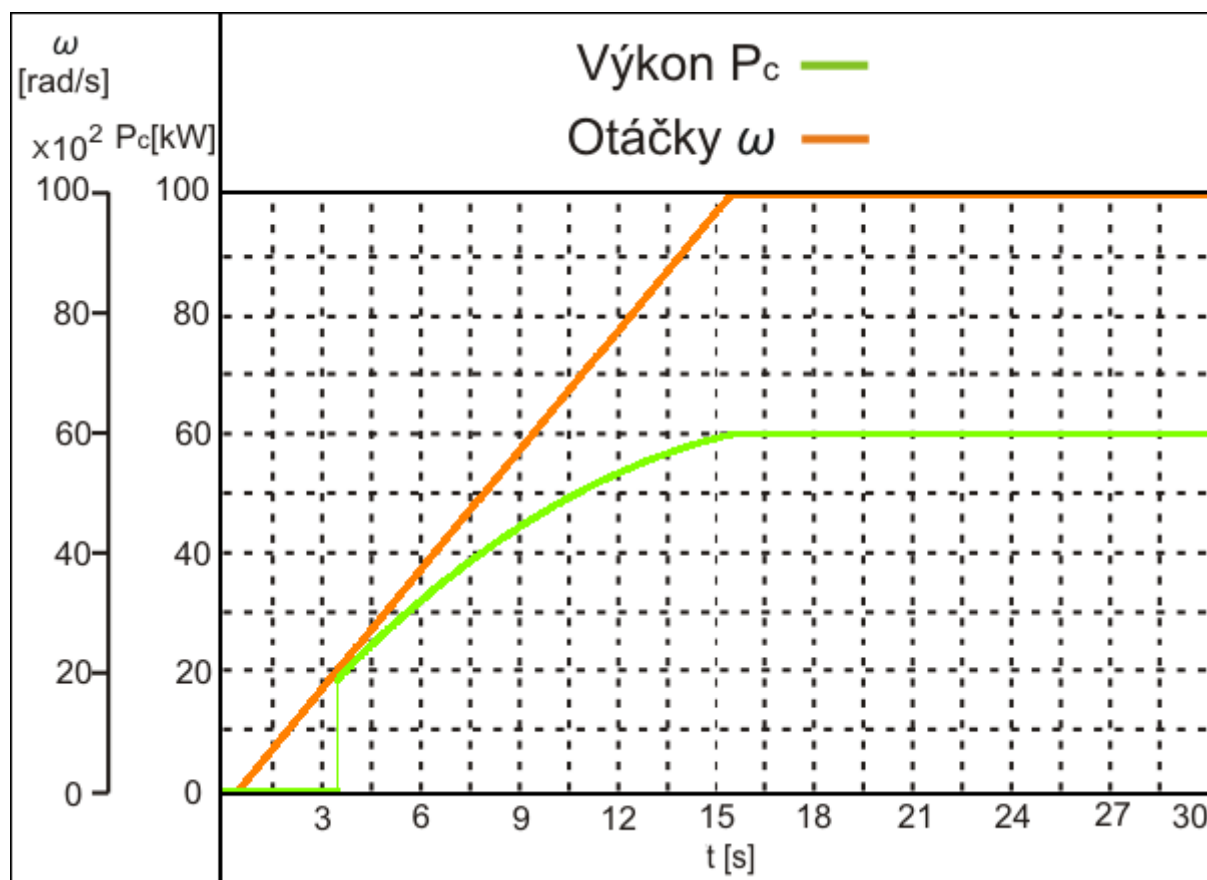
3.3 Výsledky modelu

Hlavní výstup z modelu je výkon mikroturbíny. Na grafu lze pozorovat, jak se mění výkon a otáčky při najíždění mikroturbíny a při jejím přechodu z provozu do sítě do ostrovního provozu. Na dalších grafech je možné pozorovat změnu elektrické účinnosti mikroturbíny. Z *Obr. 3.13* je vidět, že při snížení výkonu se podstatně zhorší účinnost mikroturbíny. Hodnoty hmotnostních průtoků, výkonů a elektrické účinnosti jsou vidět v *Tab. 3.5*. Hodnota požadovaného výkonu při ostrovním provozu je stanovena na 40% jmenovitého výkonu.

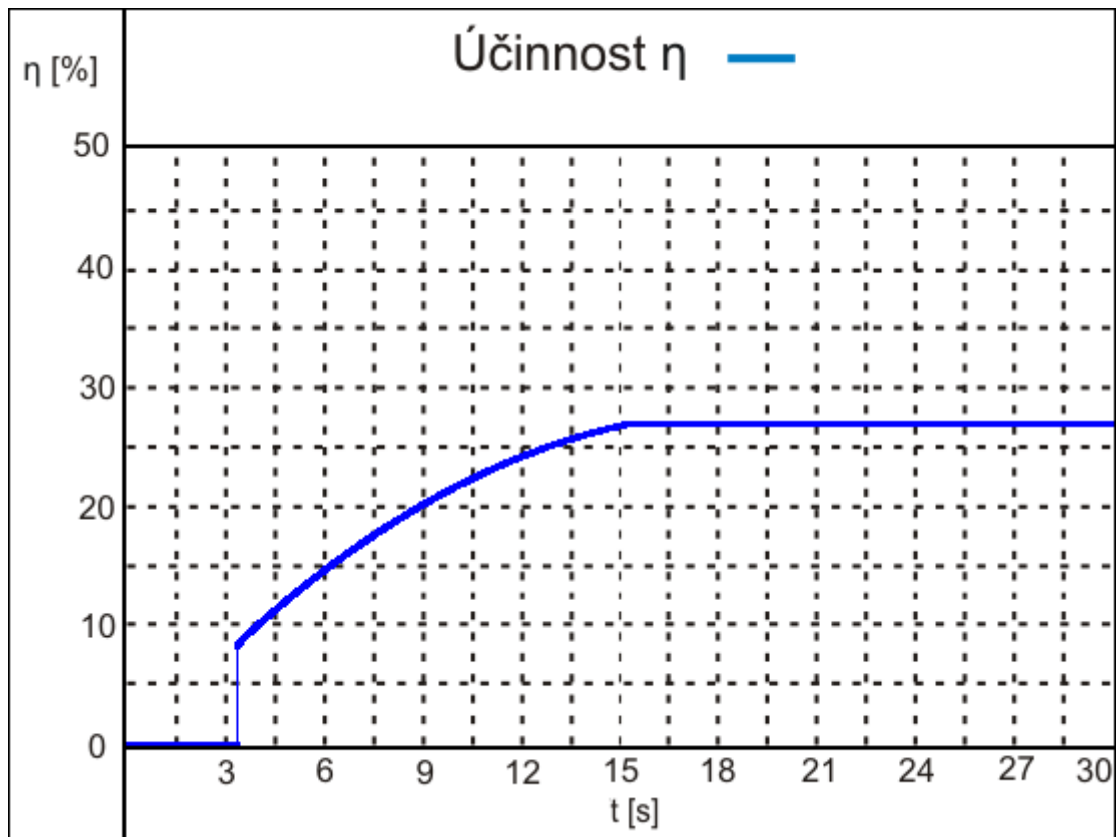
Tab. 3.5 Výstupy z modelu

	Jmenovitý stav	Ostrovní provoz
Hmotnostní průtok vzduchu	0,4128 kg/s	0,2943 kg/s
Hmotnostní průtok paliva	0,0044 kg/s	0,0032 kg/s
Hmotnostní průtok spalin	0,4172 kg/s	0,2975 kg/s
Elektrický výkon	59,80 kW	23,91 kW
Elektrická účinnost	27,0 %	15,1%

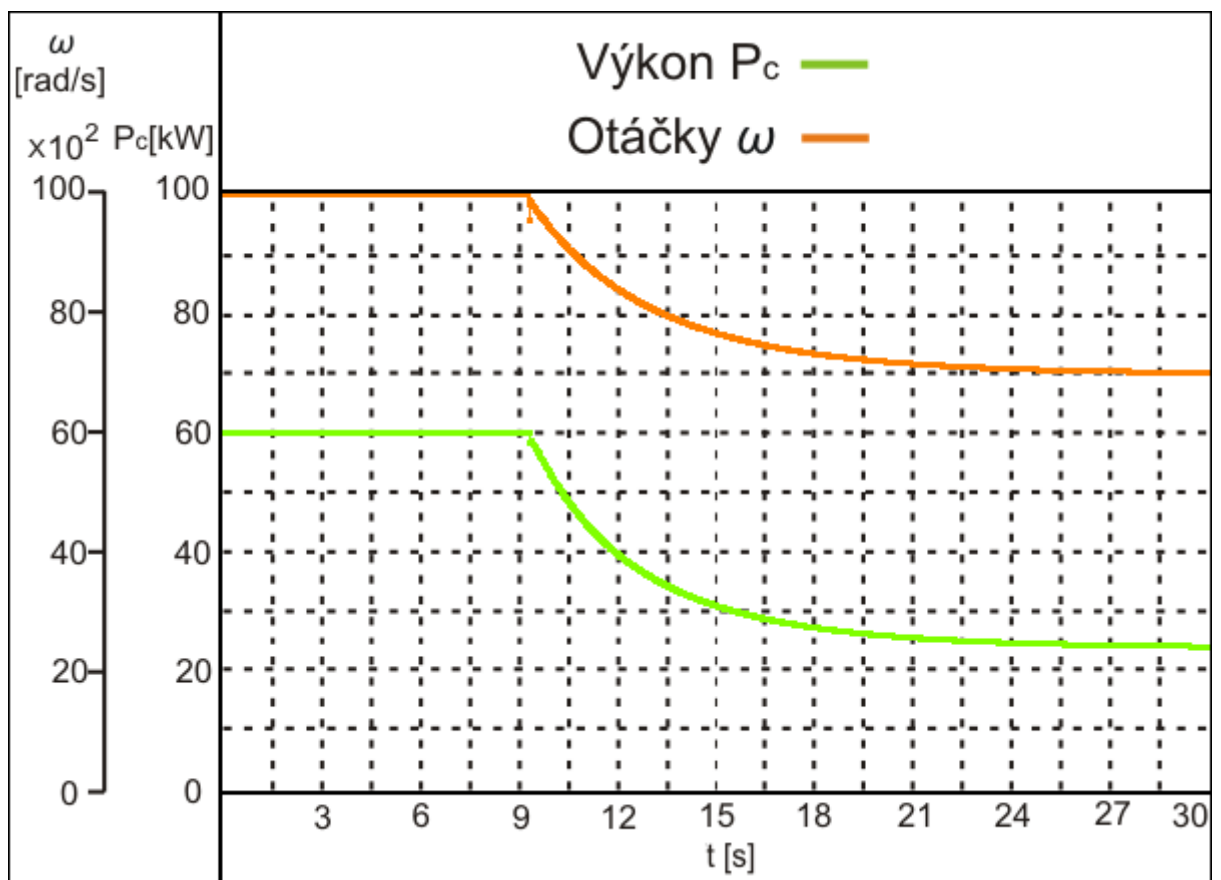
Hodnota výsledného výkonu a hmotnostního průtoku při jmenovitém stavu přibližně odpovídají hodnotám z [8]. Bohužel další hodnoty a průběhy veličin nelze ověřit, kvůli chybějícím hodnotám z reálného provozu, které se nepodařilo sehnat.



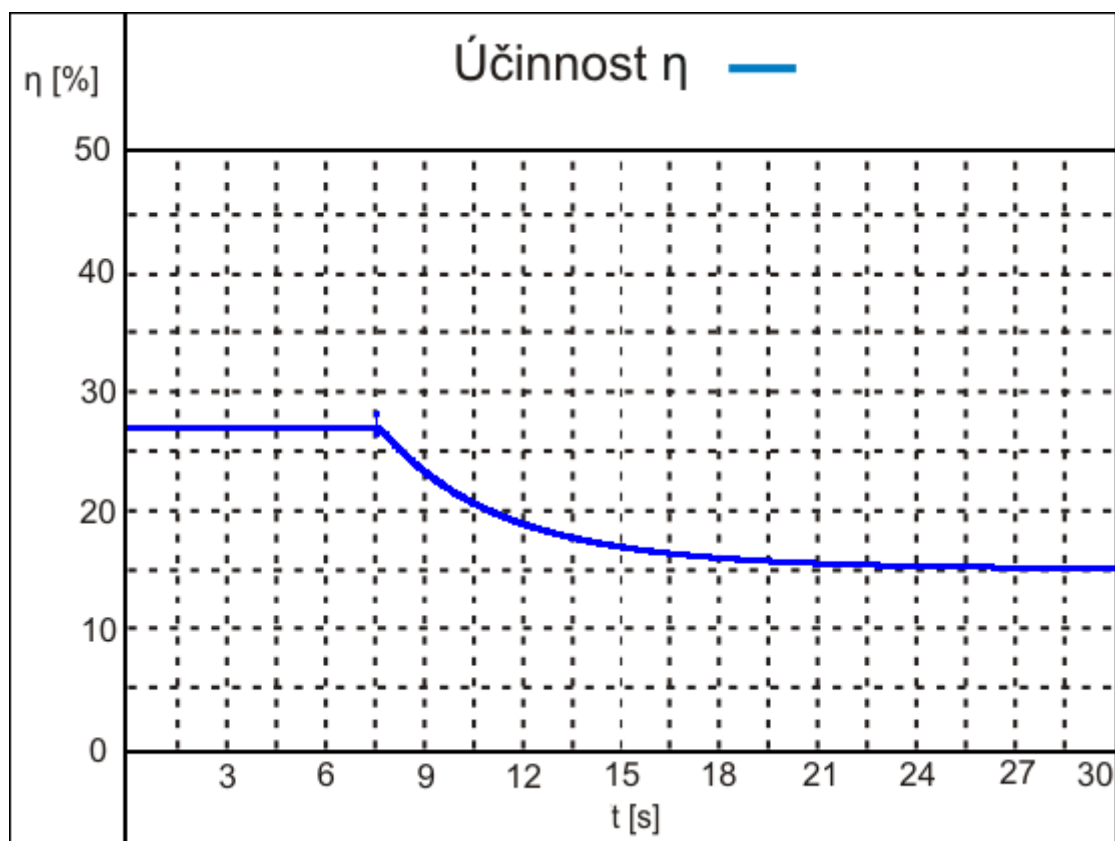
Obr. 3.12 Průběh výkonu a otáček při najíždění



Obr. 3.13 Změna elektrické účinnosti při najíždění



Obr. 3.14 Průběh výkonu a otáček při přechodu do ostrovního provozu



Obr. 3.15 Změna elektrické účinnosti při přechodu do ostrovního provozu

Závěr

Mikroturbína představuje jeden z nejnovějších distribuovaných zdrojů elektrické energie. Popis jejího principu, konstrukce a vlastností je obsažen v první části práce. Mezi největší výhody mikrotubíny patří její schopnost najet na jmenovitý výkon v rychlém čase, minimální požadavky na údržbu a nízké hodnoty emisí. Jako největší nevýhoda se může jevit její vysoká cena. V posledních letech stoupá počet mikroturbín provozovaných v ČR. Nejvýznamnější celosvětový výrobce mikroturbín je společnost CAPSTONE.

Matematický popis mikroturbíny je uveden v kapitole 2. Je zde popsána hlavní část mikroturbíny, tedy plynová turbína o malém výkonu a vysoké rychlosti. Popis vysokofrekvenčního generátoru a výkonové elektroniky je zde uveden pouze okrajově.

Model mikroturbíny byl zhotoven v programu SWING. Základ při tvorbě modelu je matematický popis mikroturbíny z kapitoly 2. Při tvorbě modelu se ukázalo, že program SWING není příliš vhodný pro model mikroturbíny. Program SWING je situován spíše pro modely systémů, které používají jako pracovní médium vodní páru. Mikroturbína je však poháněna plynovou turbínou, jejíž pracovní médium je většinou plynné palivo. I přes tento fakt byl s jistými zjednodušeními a doplňujícími výpočty zhotoven model plynové turbíny. Při vytvoření modelu generátoru a výkonové elektroniky se dále ukázalo, že pro správnou funkci těchto zařízení požaduje SWING mnoho parametrů, které nebylo v mých silách zjistit. Tyto prvky byly tedy nahrazeny jenom jejich účinnostmi. Výsledný model při porovnání s jiným modelem z literatury v některých parametrech odpovídal. Nicméně, plné ověření funkce modelu mikroturbíny a hlavně jeho chování při přechodu do ostrovního režimu nebylo ověřeno, kvůli chybějícím hodnotám z reálného provozu, které se nepodařilo získat. Pro další postup práce by bylo nutné získat podrobné parametry reálné mikroturbíny a její provozní charakteristiky pro porovnání s modelem. Pomocí těchto parametrů by bylo možné elektrickou část modelu nasimulovat v editoru Electrix. Bohužel ani tyto parametry by nevyřešili problémy s realizací modelu plynové turbíny. Proto si myslím, že pro další postup v modelování mikroturbín by bylo vhodné zvolit jiný software.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ŠUROVSKÝ, Jan. *Mikroturbína*. Vyd. 1. Praha: Instalace, 2003, 220 s.
- [2] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 287 s. ISBN 80-7300-118-7.
- [3] DVORSKÝ, Emil. Přednášky z předmětu E1. ZČU, FEL.
- [4] [Http://www.mikroturbiny.com](http://www.mikroturbiny.com) [online]. [cit. 2015-04-30].
- [5] BEČVÁŘ, Josef. *Tepelné turbíny*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968, 544 s. Řada strojírenské literatury.
- [6] [Http://www.mikroturbina.cz](http://www.mikroturbina.cz) [online]. [cit. 2015-04-30].
- [7] GOLDSTEIN, Larry, Bruce HEDMAN, Dave KNOWLES, Steven FREEDMAN, Richard WOODS a Tom SCHWEIZER. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations*. 2003.
- [8] KISH, Gregory.J. a Peter.W. LEHN. IEEE. *A Micro-turbine Model for System Studies Incorporating Validated Thermodynamic Data*. 2011.
- [9] NOROOZIAN, R., M. ABEDI, G.B. GHAREHPETIAN a S.H. HOSSEINI. ICREPQ'09. *Modelling and Simulation of Microturbine Generation System for on-grid and off-grid Operation Modes*. 2009.
- [10] OFUALAGBA, Godswill. IJSER. *The Modeling and Simulation of a Microturbine Generation System*. 2012.
- [11] [Http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/20.php](http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/20.php) [online]. [cit. 2015-04-30].
- [12] SWING editor online help, version 4.0
- [13] SWING editor user guide

- [14] [Http://www.vensys.de/energy-en/technologie/generator-pm-technologie.php](http://www.vensys.de/energy-en/technologie/generator-pm-technologie.php) [online]. [cit. 2015-04-30].
- [15] DVORSKÝ, Emil. Přednášky z předmětu MR. ZČU, FEL.