

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

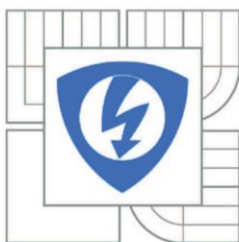
**KOGENERAČNÍ JEDNOTKY
PRO RD – HODNOCENÍ A SIMULACE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÁCLAV MARTYNEK

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Václav Martynek
Ročník: 2

ID: 118737
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Kogenerační jednotky pro RD – hodnocení a simulace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše současného stavu v oblasti kogeneračních jednotek.
2. Specifikace jednotlivých kogeneračních jednotek vhodných pro použití v rodinném domě.
3. Návrh a parametrizace systému chodu kogenerační jednotky v RD.
4. Simulace chodu kogenerační jednotky v závislosti na změně vstupních technických a ekonomických parametrů.
5. Simulace chodu kogenerační jednotky v návaznosti na změnu zákonných úprav, změnu tarifů, výkupních cen apod.
6. Zhodnocení a závěr práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Jan Macháček, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

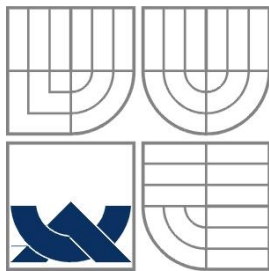
Bibliografická citace práce:

MARTYNEK, V. Kogenerační jednotky pro RD – hodnocení a simulace. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2013, 80 stran.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Macháčkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

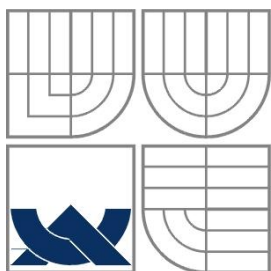
Kogenerační jednotky pro RD – hodnocení a simulace

Bc. Václav Martynek

vedoucí: Ing. Jan Macháček, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

The cogeneration units for family house – evaluation and simulation

by

Bc. Václav Martynek

Supervisor: Ing. Jan Macháček, Ph.D.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou kogeneračních jednotek malého výkonu používaných pro účely vytápění jednotlivých budov a krytí potřeby tepla menších průmyslových podniků.

Úvodní kapitoly jsou zaměřeny především na objasnění principu kombinované výroby elektrické a tepelné energie (KVET), uvedení základních výhod a důležitých ukazatelů KVET. V práci je uveden stručný přehled kogeneračních zařízení podle typu primární jednotky a přehled dostupných kogeneračních jednotek na trhu vhodných pro rodinné domy. V textu je uveden postup při instalaci a připojení kogenerační jednotky. Čtvrtá kapitola je věnována popisu základních tepelných procesů a možnosti sdílení tepla. V páté kapitole je popsán model tepelného okruhu a výpočet hospodárnosti provozu kogenerační jednotky. Tepelný okruh je tvořen kogenerační jednotkou a multivalentním zásobníkem pro topnou a teplou užitkovou vodu.

Cíl diplomové práce spočívá ve zpracování modelu tepelného okruhu kogenerační jednotky v simulačním programu a grafického uživatelského rozhraní, ve kterém lze jednoduchým způsobem vyhodnotit provoz kogenerační jednotky při změně vstupních parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA: akumulární zásobník; grafické uživatelské rozhraní; kogenerační jednotka; kombinovaná výroba; sdílení tepla; tepelné procesy; tepelný okruh; výroba tepelné energie

ABSTRACT

Master's thesis deals with cogeneration units of low power that are used for heating of buildings and to cover the heat demand of small industrial enterprises.

The introductory chapters are focusing on clarifying the principles of combined heat and power (CHP) as well as on the basic advantages and important indicators of CHP. The thesis presents a brief overview of cogeneration devices by type of primary units and also provides an overview of cogeneration units suitable for family houses that are currently available on the market. The text describes how to install and connect the cogeneration unit. The fourth chapter includes description of elemental thermal processes and possibility of heat transfer. The fifth chapter describes the thermal circuit model and calculation efficiency of a cogeneration unit. Thermal circuit consists of a cogeneration unit and a multivalent tank for hot water heating system and potable hot water system.

The object of master's thesis is to create a model of thermal circuit cogeneration units in a simulation program and a graphical user interface, that will allow a simple way to evaluate the operation of the cogeneration unit when changing the input parameters.

KEY WORDS:

combined production; cogeneration unit; graphical user interface; heat energy production; heat processes; heat transfer; storage tank; thermal circuit

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	14
2 VÝROBA ELEKTRICKÉ A TEPELNÉ ENERGIE	15
3 KOGENERACE	16
3.1 TEPLÁRENSKÝ MODUL A TEPLÁRENSKÝ SOUČINITEL.....	17
3.2 ROZDĚLENÍ A TYPY KOGENERAČNÍCH JEDNOTEK	18
3.2.1 PRIMÁRNÍ JEDNOTY S NEPŘÍMOU TRANSFORMACÍ	19
3.2.2 PRIMÁRNÍ JEDNOTY S PŘÍMOU TRANSFORMACÍ.....	19
3.3 POPIS KOGENERAČNÍCH ZAŘÍZENÍ PODLE TYPU PRIMÁRNÍ JEDNOTKY.....	20
3.3.1 PALIVOVÝ ČLÁNEK	20
3.3.2 PARNÍ TURBÍNA.....	23
3.3.3 ORGANICKÝ RANKINŮV CYKLUS.....	23
3.3.4 SPALOVACÍ TURBÍNA	24
3.3.5 MIKROTURBÍNY	24
3.3.6 STIRLINGŮV MOTOR.....	26
3.3.7 SPALOVACÍ MOTOR	27
3.4 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY PRO POUŽITÍ V RODINNÉM DOMĚ	30
3.4.1 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY FIRMY TEDOM ŘADA MICRO	30
3.4.2 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY FIRMY STIRLING ENERGY	31
3.4.3 KOGENERAČNÍ JEDNOTKA FIRMY VIESSMANN.....	33
3.5 POSTUP INSTALACE A PŘIPOJENÍ KOGENERAČNÍ JEDNOTKY	34
4 TEPELNÉ PROCESY A SDÍLENÍ TEPLA.....	39
4.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM.....	39
4.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM	40
4.3 SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM	40
4.4 TEPELNÝ TOK PROUDU KAPALINY	40
4.5 AKUMULACE TEPLA.....	40

5 SIMULAČNÍ MODEL KOGENERACNÍ JEDNOTKY	41
5.1 KOGENERACNÍ JEDNOTKA	44
5.2 MULTIVALENTNÍ AKUMULAČNÍ ZÁSOBNÍK	47
5.3 ÚSTŘEDNÍ TOPENÍ	54
5.4 ŘÍZENÍ KOGENERACNÍ JEDNOTKY	57
5.5 HOSPODÁRNOST KOGENERACE.....	58
5.6 GRAFICKÉ UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ.....	64
5.6.1 POPIS GRAFICKÉHO UŽIVATELSKÉHO ROZHRANÍ.....	64
5.6.2 NÁVOD NA POUŽÍVÁNÍ GRAFICKÉHO UŽIVATELSKÉHO ROZHRANÍ	66
5.6.3 SIMULOVANÉ PRŮBĚHY CHODU KOGENERACNÍ JEDNOTKY.....	70
6 ZÁVĚR.....	78
POUŽITÁ LITERATURA	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1: Vývoj výroba elektřiny v letech 1980 až 2010 [7]</i>	14
<i>Obr. 3.1: Porovnání účinnosti oddělené a kogenerační výroby [20]</i>	16
<i>Obr. 3.2: Přímý způsob transformace primární energie [11]</i>	20
<i>Obr. 3.3: Schéma KJ s palivovým článkem [15]</i>	22
<i>Obr. 3.4: Energetická bilance KJ s palivovým článkem [15]</i>	22
<i>Obr. 3.5: Schéma kogenerační jednotky s mikroturbínou [15]</i>	25
<i>Obr. 3.6: Kogenerační jednotka s mikroturbínou Capstone C65 (65kWe) [24]</i>	26
<i>Obr. 3.7: Schéma KJ se Stirlingovým motorem [15]</i>	26
<i>Obr. 3.8: Modifikace Stirlingova motoru [12]</i>	27
<i>Obr. 3.9: Zapojení spalovacích motorů - dodávka tepla ve formě teplé nebo horké vody [2]</i>	28
<i>Obr. 3.10: Toky energií u kogenerační jednotky se spalovacím motorem [5]</i>	29
<i>Obr. 3.11: Kogenerační jednotka se spalovacím motorem GE Jenbacher (250kWe) [9]</i>	29
<i>Obr. 3.12: Kogenerační jednotky Tedom řada Micro [8]</i>	30
<i>Obr. 3.13: Kogenerační jednotky firmy Stirling energy [23]</i>	32
<i>Obr. 3.14: Kogenerační jednotka Vitotwin 300-W [20]</i>	33
<i>Obr. 3.15: Schéma připojení kogenerační jednotky Vitotwin 300-W do sítě [20]</i>	35
<i>Obr. 3.16: Formulář A1 „Žádost o udělení licence pro podnikání v energetických odvětvích pro fyzické osoby“ [18]</i>	36
<i>Obr. 3.17: Rozhodnutí o udělení licence ERÚ</i>	37
<i>Obr. 3.18: Žádost o registraci oprávněné osoby [19]</i>	37
<i>Obr. 5.1: Tepelné schéma kogenerační jednotky</i>	42
<i>Obr. 5.2: Schéma tepelného okruhu kogenerační jednotky v programu Matlab Simulink</i>	43
<i>Obr. 5.3: Tepelné toky v kogenerační jednotce a kogenerační jednotka Vitotwin 300-W [20]</i>	44
<i>Obr. 5.4: Tepelný model kogenerační jednotky</i>	46
<i>Obr. 5.5: Multivalentní akumulční zásobník Vitocell 340-M [22]</i>	47
<i>Obr. 5.6: Tepelné toky v akumulčním zásobníku</i>	47
<i>Obr. 5.7: Tepelný model elementu akumulční nádrže</i>	49
<i>Obr. 5.8: Tepelný model elementu ohřevu TUV</i>	50
<i>Obr. 5.9: Tepelné toky v regulaci TUV</i>	51
<i>Obr. 5.10: Trojcestný ventil Esbe řada VRG 131 [13] a servopohon Belimo HT 24-SR-T [14]</i>	51
<i>Obr. 5.11: Tepelný model regulace TUV</i>	52
<i>Obr. 5.12: Odezva směšovacího ventilu na jednotkový skok</i>	53

<i>Obr. 5.13: Tepelný model průtoku TUV a detail průběhu průtoku TUV</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5.14: Tepelné toky v systému ÚT</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5.15: Tepelný model ústředního topení.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 5.16: Tepelné toky v regulaci ÚT.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 5.17: Tepelný model regulace ÚT.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 5.18: Schéma modelu řídicí jednotky KJ Vitotwin 300-W</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 5.19: Hlavní obrazovka grafického uživatelského rozhraní v Matlab GUI.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 5.20: Hlavní menu grafického uživatelského rozhraní</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 5.21: Vstupní parametry pro simulaci a výpočet úspory nákladů za energie.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 5.22: Panel nastavení časových plánů odběru TUV a vytápění</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 5.23: Postup při spouštění a ukládání simulovaných průběhů</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 5.24: Výsledky výpočtu úspory provozu kogenerační jednotky v grafickém uživ. rozhraní ..</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 5.25: Okno s možností vykreslení vybraného typu grafu</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 5.26: Tepelný okruh zimního provozu v grafickém uživatelském rozhraní.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 5.27: Tepelný okruh letního provozu v grafickém uživatelském rozhraní</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 5.28: Průběh spouštění kogenerační jednotky - zimní provoz</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 5.29: Časové plány systému ÚT a odběru TUV – zimní provoz</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 5.30: Průběh vyrobeného tepla a elektřiny kogenerační jednotkou – zimní provoz.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 5.31: Průběh rozložení teploty vody v akumulární nádrži – zimní provoz</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 5.32: Průběh teploty TUV – zimní provoz</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 5.33: Průběh teplot topné a vratné vody v systému ÚT – zimní provoz.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 5.34: Průběh tepla dodaného do systému ÚT a TUV – zimní provoz.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 5.35: Průběh spouštění kogenerační jednotky - letní provoz.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 5.36: Časový plán odběru TUV – letní provoz</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 5.37: Průběh vyrobeného tepla a elektřiny kogenerační jednotkou – letní provoz</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 5.38: Průběh rozložení teploty vody v akumulární nádrži – letní provoz.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 5.39: Průběh teploty TUV – letní provoz</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 5.40: Průběh tepla spotřebovaného na ohřev TUV – letní provoz</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 5.41: Kumulativní úspora nákladů během 20 let</i>	<i>77</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1: Přehled charakteristických vlastností základních druhů kogeneračních jednotek [15]</i>	19
<i>Tab. 3.2: Přehled typů palivových článků a jejich vlastností [15]</i>	21
<i>Tab. 3.3: Parametry kogeneračních jednotek Tedom řada Micro [8]</i>	31
<i>Tab. 3.4: Parametry kogeneračních jednotek firmy Stirling energy [23]</i>	32
<i>Tab. 3.5: Parametry kogenerační jednotky Vitotwin 300-W [20]</i>	33
<i>Tab. 3.6: Základní sazba ročního zeleného bonusu na elektřinu pro výrobu KVET s instalovaným výkonem do 5MW (včetně) [16]</i>	34
<i>Tab. 5.1: Nastavené časové plány odběru TUV a systému ÚT</i>	41
<i>Tab. 5.2: Parametry stávajícího kotle instalovaného v rodinném domě</i>	58
<i>Tab. 5.3: Spotřeba energií za rok v rodinném domě</i>	58
<i>Tab. 5.4: Vstupní parametry kogenerační jednotky pro výpočet úspor energií</i>	59
<i>Tab. 5.5: Předpokládané ceny energií</i>	59
<i>Tab. 5.6: Zelený bonus [16]</i>	59
<i>Tab. 5.7: Roční bilance výroby a spotřeba paliva kogenerační jednotky</i>	61
<i>Tab. 5.8: Náklady na energie RD se stávajícím kotlem</i>	61
<i>Tab. 5.9: Náklady na energie RD s kogenerační jednotkou</i>	63
<i>Tab. 5.10: Úspora nákladů na energie RD s kogenerační jednotkou</i>	64

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
A	Práce	[J]
AN	Akumulační nádrž	-
DS	Distribuční síť	-
E	Množství elektrické energie	[J] , [kWh]
$ERÚ$	Energetický regulační úřad	-
KJ	Kogenerační jednotka	-
$KVET$	Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla	-
P	Elektrický výkon	[W _e]
P	Tepelný výkon	[W _t]
PJ	Primární jednotka	-
Q	Množství tepelné energie	[J]
S	Velikost teplosměnné plochy	[m ²]
T	Teplota	[K]
TUV	Teplá užitková voda	-
U	Vnitřní energie	[J]
$ÚT$	Ústřední topení	-
V	Objem látky	[m ³]
c	Měrná tepelná kapacita	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
e	Teplárenský modul	[1]
k	Střední hodnota součinitele průchodu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
k_s	Součinitel přestupu tepla rovinnou stěnou	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
m	Hmotnost	[kg]
q	Hmotnostní průtok	[kg·s ⁻¹]
t	Čas	[s]
Φ	Tepelný výkon	[W _t]
α	Teplárenský součinitel	[1]
α	Součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
δ	Tloušťka	[m]
η	Účinnost	[%]
λ	Měrná tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ρ	Hustota látky	[kg·m ⁻³]
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta sálání	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]
ϑ	Teplota	[°C]

1 ÚVOD

Elektrická energie je v současné době pro chod naší společnosti nepostradatelná. Její výroba neustále roste (viz. Obr. 1.1). Veškerá naše činnost probíhá na jejím základě nebo alespoň za jejího přispění. Proto ji také považujeme za samozřejmost. Elektrická energie je vyráběna v různých typech elektráren (uhelné, jaderné, vodní, větrné a další). Jako palivo se v elektrárnách využívá většinou neobnovitelných zdrojů energie, které jsou reprezentovány především fosilními palivy. Zásoby fosilních paliv (černé a hnědé uhlí, zemní plyn a další) jsou omezené, proto je kladen důraz na jejich efektivní využití. [1]

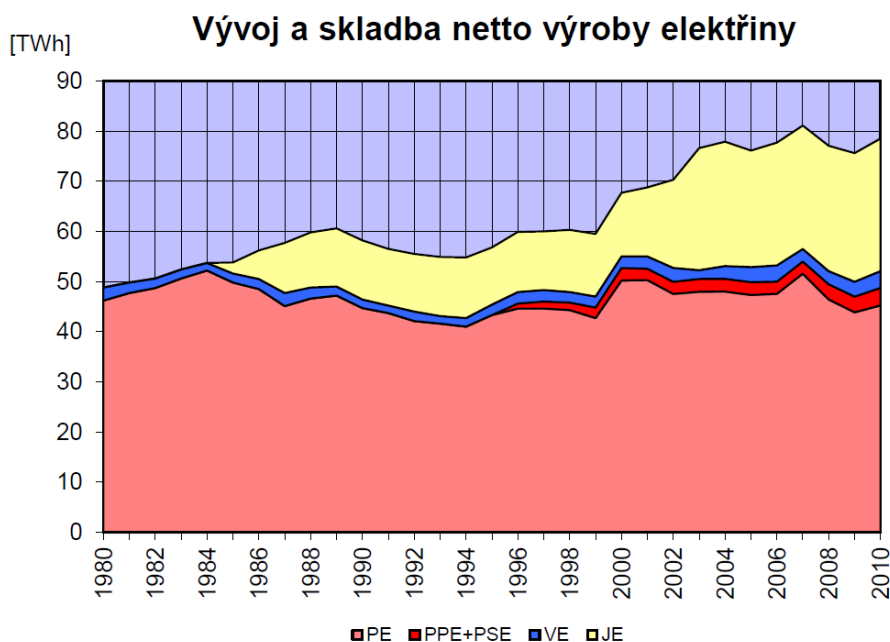
Tato práce se zabývá kogenerací, jednou z možností výroby elektrické a tepelné energie, kde se využívá tzv. odpadní teplo, které je u klasických typů elektráren (kondenzační elektrárny) odváděno do okolí bez jakéhokoli dalšího využití. Tento způsob kombinované výroby elektrické a tepelné energie dosahuje vysoké celkové účinnosti, kdy je využito asi 90% energie obsažené v palivu na výrobu elektrické energie a tepla. Výhoda kogenerace spočívá nejen v úspoře paliva, ale také ve výrazném snížení velikosti škodlivých emisí. Kombinované výrobní elektrické energie a tepla neboli teplárny jsou velice účinným řešením centralizovaného zásobování teplem. Výkon tepláren se pohybuje v řádech stovek MW_e. V poslední době nachází uplatnění kogenerační jednotky s výkonem od 0,001 do 2 MW_e, používané pro účely vytápění jednotlivých budov a krytí potřeby tepla menších průmyslových podniků. [1]

Cílem této práce bude popis nejvhodnějších typů kogeneračních zařízení především pro rodinné domy. Uvedení základních vlastností, výhod a nevýhod jejich použití v kogeneraci.

V další části budou uvedeny základní způsoby sdílení tepla a zpracován přehled základních tepelných procesů při modelování dynamických soustav.

Hlavní cíle této práce spočívají ve zpracování:

- 1) simulačního modelu tepelného okruhu kogenerační jednotky Vitotwin 300-W se Stirlingovým motorem v programu Matlab Simulink,
- 2) grafického uživatelského rozhraní v programu Matlab GUI.



Obr. 1.1: Vývoj výroba elektřiny v letech 1980 až 2010 [7]

2 VÝROBA ELEKTRICKÉ A TEPELNÉ ENERGIE

Elektrická energie je považována za nejušlechtilější formu energie. Elektrickou energii můžeme přenášet na poměrně velké vzdálenosti a dále všestranně využívat. Například ji můžeme přeměňovat na jiné formy energie (tepelnou, mechanickou, apod.). Další specifickou vlastností elektrické energie je neskladnost, proto je prakticky spotřebována v okamžiku, kdy byla vyrobena. Výrobu elektrické energie musíme v každé chvíli přizpůsobit její spotřebě. [6]

Výroba elektrické energie se převážně provádí v kondenzačních elektrárnách přeměnou chemicky utajené tepelné energie uvolněné z primárních energetických zdrojů na mechanickou energii parní turbíny, jenž pohání generátor. Tento proces je na první pohled jednoduchý, ale může být uskutečněn ve složitých a drahých zařízeních jen s určitou účinností. Kondenzační elektrárny, které se podílí na světové výrobě elektrické energie kolem 80%, dosahují celkové účinnosti okolo 30%. Zbývajících asi 70% uvolněné energie z uhlí je odvedeno do chladících věží a zde se odvádí do okolí elektrárny. V paroplynové elektrárně, která je kombinací spalovací turbíny a parního oběhu s kondenzační turbínou, účinnost dosahuje hodnoty od 50 do 55%. [2]

Tepelná energie je méně hodnotnou energií, její použití je omezené a přeměna na jiný druh energie technicky obtížná. V porovnání s výrobou elektrické energie je výroba tepelné energie z primárních energetických zdrojů jednoduchá a levná, zejména v teplotně nízkopotenciální podobě teplé vody. Plynové kotle na ohřev teplé užitkové vody dosahují účinnosti 90% a vyšší. Především z ekonomických důvodů je investory preferován tento způsob zabezpečení potřeby tepla. [2]

Množství jakékoli energie udává měrová jednotka Joule (J). V soustavě SI patří Joule mezi odvozené jednotky, jehož rozměr je $[\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}]$. Pro vyjádření množství tepelné energie (tepla) používáme jednotku Joule (J) nebo jeho násobky kJ, MJ, GJ a pro vyjádření množství elektrické energie se používají odvozené jednotky kilowatthodiny (kWh), popřípadě MWh. Ve vzorci 2.1 je uveden přepočet mezi jednotkou kWh a J. Pro označení používáme symbol Q pro sdělené teplo a symbol E pro elektrickou energii. Elektrický a mechanický výkon (tok energie za jednotku času) se značí symbolem P a tepelný tok za jednotku času se značí Φ . Pro vyjádření toku energie za jednotku času (výkonu) se v obou případech používá jednotka Watt (W) nebo její násobky kW, MW. Protože se jedná o rozdílné druhy energií, značí se jednotky elektrického výkonu kW_e a jednotky tepelného výkonu kW_t . [2]

$$1\text{kWh} = 1000 \cdot 3600 \text{ J} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

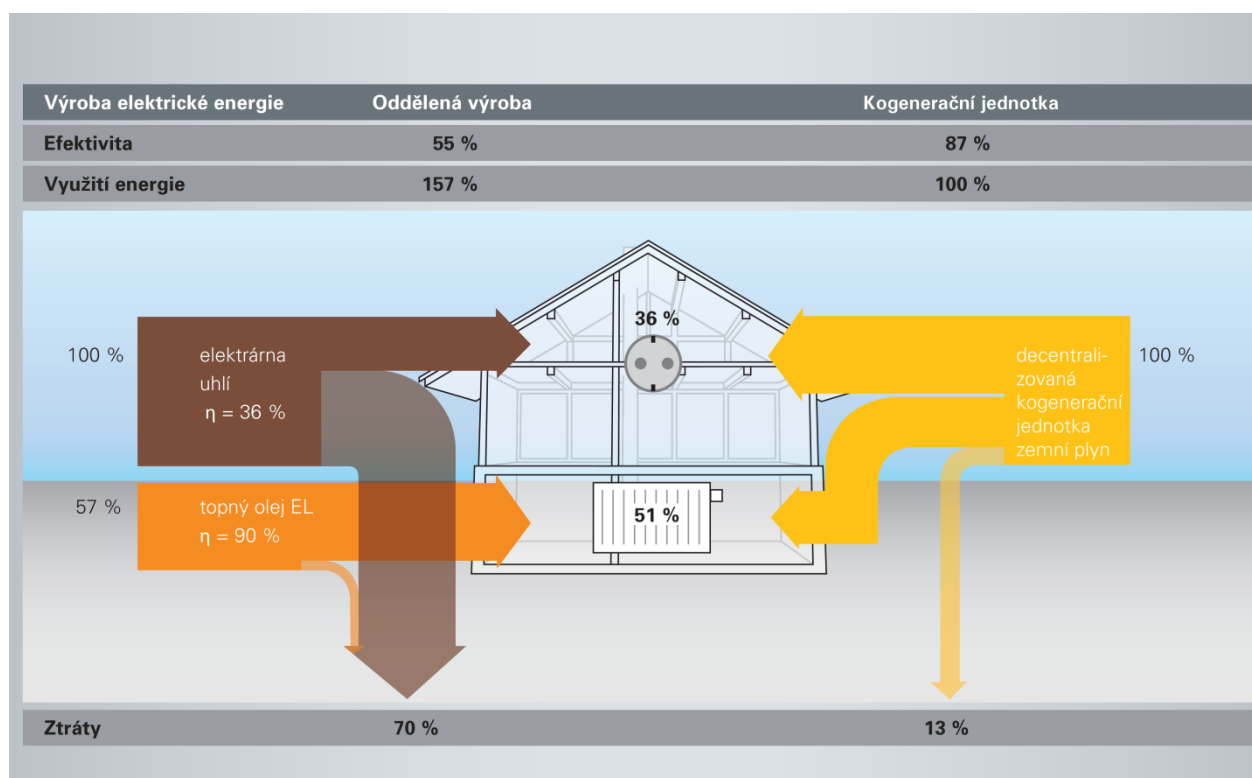
2.1

3 KOGENERACE

Pojem kogenerace je u nás známý jako teplárenská výroba. Kogenerace znamená kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla (KVET). Princip kogenerace spočívá v tom, že se využije vysokopotenciální tepelná energie k vykonání práce na výrobu elektrické energie a potom pracovní látka o nižší teplotě se využije na pokrytí potřeb tepla. [2]

Výhoda použití kogenerační výroby spočívá ve snížení spotřeby primárních energetických zdrojů (PEZ) ve srovnání s oddělenou výrobou elektrické energie a tepla. S tím souvisí také snížení škodlivých emisí, které vznikají při spalování PEZ. Celková účinnost při kogenerační výrobě je vysoká a dosahuje hodnot mezi 80 – 90 %. Na Obr. 3.1 je znázorněna úspora paliva a porovnání účinnosti oddělené a kogenerační výroby. [1]

Použití kogeneračních jednotek malého výkonu jako decentralizovaného zdroje energie přináší výhodu v minimalizaci nákladů na rozvod tepelné energie. Teplo vyrobené v kogenerační jednotce je využito k vytápění budov, přípravě teplé užitkové vody nebo k přípravě technologického tepla. [1]



Obr. 3.1: Porovnání účinnosti oddělené a kogenerační výroby [20]

3.1 Teplárenský modul a teplárenský součinitel

Teplárenský modul a teplárenský součinitel jsou dva z důležitých ukazatelů kogeneračních zařízení. Teplárenský modul nám udává velikost úspory paliva a teplárenský součinitel, na který je kogenerační zařízení dimenzováno, aby bylo dosaženo jeho maximálního využití. [1]

Pro výrobu elektrické energie E v kondenzační elektrárně při účinnosti η_{el} je potřeba množství energie v palivu Q_{el} podle vztahu 3.1. [2]

$$Q_{el} = \frac{E}{\eta_{el}} \quad 3.1$$

Pro výrobu tepelné energie Q ve výtopně při účinnosti $\eta_{výt}$ je potřeba množství energie v palivu $Q_{výt}$ podle vztahu 3.2. [2]

$$Q_{výt} = \frac{Q}{\eta_{výt}} \quad 3.2$$

Při kombinované výrobě elektrické energie E a tepla Q je potřeba množství energie v palivu Q_{kj} podle vztahu 3.3, kde η_{kj} je účinnost kogenerační jednotky. [2]

$$Q_{kj} = \frac{E + Q}{\eta_{kj}} \quad 3.3$$

Pomocí vztahů 3.1, 3.2 a 3.3 můžeme vypočítat úsporu tepla z paliva Q_u při kombinované výrobě elektrické energie a tepla. [2]

$$Q_u = \frac{E}{\eta_{el}} + \frac{Q}{\eta_{výt}} - \frac{E + Q}{\eta_{kj}} \quad 3.4$$

Zavedeme-li předpoklad, že účinnost výtopny a kogenerační jednotky je rovna ($\eta_{výt} = \eta_{kj}$), tak vztah 3.4 můžeme upravit do tvaru 3.5. [2]

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{E}{Q} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) \quad 3.5$$

Ve vztahu 3.5 je podíl vyrobené elektrické energie a tepla v kogenerační jednotce, který je velmi důležitým ukazatelem kogeneračního zařízení. Pro tento parametr je udáván termín teplárenský modul nebo také modul teplárenské výroby elektřiny a je značen symbolem e . Jeho velikost závisí na typu a provedení kogenerační jednotky. [2]

$$e = \frac{E}{Q} \quad 3.6$$

Relativní úspora tepla vztažená k jednotce tepla dodaného kogenerační jednotkou je vyjádřena ve vztahu 3.7, z čehož vyplývá, že úspora tepla z primárních energetických zdrojů je přímo úměrná teplárenskému modulu. Toto platí, jen pokud je účinnost výtopny rovna kogenerační jednotce. [2]

$$\frac{Q_u}{Q} = e \cdot \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) \quad 3.7$$

Při dimenzování kogenerační jednotky se hledí především na potřebu tepla. Kvůli co nejlepšímu ekonomickému využití kogenerační jednotky je požadováno, aby byla co nejdéle v chodu. Klademe důraz na co největší roční dobu využití jmenovitého výkonu jednotky. Proto se kogenerační zařízení dimenzuje jen na část maximální potřeby tepla. Definuje se další důležitý ukazatel, tzv. teplotní součinitel, což je podíl tepla dodávaného kogenerační jednotkou Q a maximální spotřeby tepla Q_{max} a značí se symbolem α . [2]

$$\alpha = \frac{Q}{Q_{max}} \quad 3.8$$

Teplotní součinitel se volí menší než 1, kvůli optimálnímu využití kogenerační jednotky.

3.2 Rozdělení a typy kogeneračních jednotek

Základní části každého kogeneračního zdroje jsou: primární jednotka (tepelný motor, palivový článěk), elektrický alternátor (měnič), kotel nebo výměník tepla, řídicí a kontrolní systém.

Kogenerační jednotky můžeme dělit podle:

- Typu primární jednoty
- Použitého paliva
- Maximálního dosažitelného výkonu

Primární jednotka (PJ) je nejdůležitější částí kogeneračního zařízení, kde dochází k přeměně energie uložené v palivu na ušlechtlejší formu energie (elektrickou a mechanickou) a uvolněné zbytkové teplo, které je možno dál využívat. PJ lze dělit podle způsobu transformace na:

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 1) PJ s přímou transformací | – Palivové články |
| 2) PJ s nepřímou transformací | |
| a) s vnějším spalováním | – Parní turbíny |
| | – Organický Rankinův cyklus |
| | – Spalovací turbíny |
| | – Mikroturbíny |
| | – Stirlingův motor |
| b) s vnitřním spalováním | – Spalovací motory |

Pro kogenerační jednotky mohou být použity různé druhy paliv. Bioplyn, zemní plyn a olej se používá u kogeneračních jednotek malého výkonu. Teplárny s parními turbínami mohou spalovat v kotli libovolná paliva zahrnující plyn, mazut, uhlí, biomasu a další. Jejich kotle jsou přizpůsobeny k tomu, aby mohly spalovat i kombinovaná paliva.

Podle maximálního dosažitelného výkonu se kogenerační jednotky dělí [10]:

- Mikro-kogenerace do výkonu 50kW_e
- Mini-kogenerace do výkonu 500kW_e
- Kogenerace malého výkonu do 1MW_e
- Kogenerace středního výkonu do 50MW_e
- Kogenerace velkého výkonu nad 50MW_e

V Tab. 3.1 jsou uvedeny základní vlastnosti kogeneračních jednotek, podle typu pohonné jednotky.

Tab. 3.1: Přehled charakteristických vlastností základních druhů kogeneračních jednotek [15]

Typ primární jednotky	Elektrický výkon	Pohotovost	Elektrická účinnost		Celková účinnost	Modul teplotní výroby
			0,5 $P_{e,n}$	$P_{e,n}$		
	[MW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]
Palivové články	0,04 - 50	90 - 92	37 - 45	37 - 45	85 - 90	0,8 - 1,0
Parní turbína	0,5 - 100	90 - 95	12 - 28	14 - 35	60 - 85	0,1 - 0,5
ORC	0,3 - 1,8	90 - 94	15 - 20	15 - 20	65 - 85	0,1 - 0,3
Spalovací turbína	0,1 - 100	90 - 95	18 - 30	25 - 40	60 - 80	0,5 - 0,8
Mikroturbína	0,025 - 0,25	90 - 95	20 - 30	30 - 40	65 - 85	0,6 - 0,85
Stirlingův motor	0,001 - 1,5	85 - 90	34 - 49	35 - 50	60 - 80	1,2 - 1,7
Vznětový motor	0,07 - 50	80 - 90	32 - 40	35 - 45	60 - 85	0,8 - 1,4
Zážehový motor	0,015 - 2	80 - 85	25 - 35	27 - 40	60 - 80	0,5 - 0,7

3.2.1 Primární jednoty s nepřímou transformací

V těchto PJ dochází k uvolnění tepelné energie z paliva v tepelném zdroji (spalovací komora). Zisk technické práce je dosažen pravotočivým tepelným oběhem pomocí pracovní látky, která obíhá mezi tepelným zdrojem a tepelným motorem. Tepelné motory se podle druhu pracovní látky mohou dělit na parní (typickou látkou je voda a její plynná fáze), plynové (vzdušina) nebo s jinou pracovní látkou. Pracovní látka je do tepelného oběhu dodávána neustále nová (otevřený tepelný oběh) nebo obíhá opakovaně (uzavřený tepelný oběh). [15]

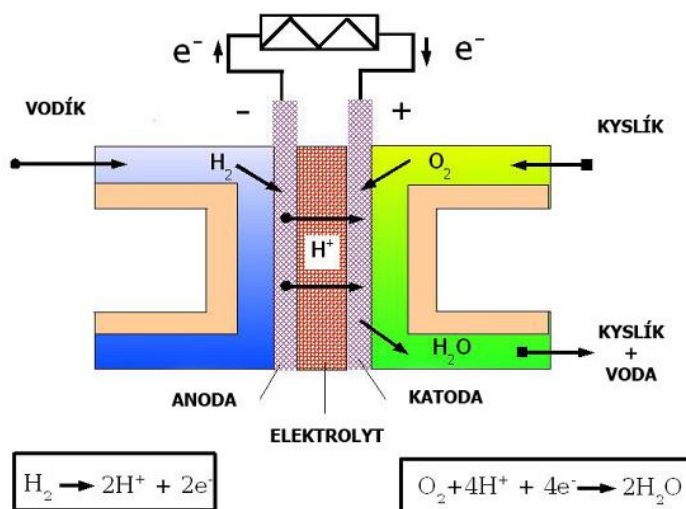
Tepelné motory lze rozdělit podle umístění spalovacího prostoru na:

- Vnitřní (spalovací komora je součástí tepelného motoru)
- Vnější (tepelný zdroj je samostatnou součástí)

Elektrická účinnost PJ s nepřímou transformací závisí na tepelné účinnosti tepelného motoru a na účinnosti transformace mechanické energie na elektrickou.

3.2.2 Primární jednoty s přímou transformací

Přímá přeměna chemické energie paliva na elektrickou je založena na technologii palivových článků. Princip palivových článků spočívá v obrácené elektrolýze vody. Palivový článek se skládá ze dvou elektrod, které jsou odděleny membránou nebo elektrolytem. Na zápornou elektrodu je přiváděno palivo (H_2), kde oxiduje a jeho atomy se zbavují elektronů (často za přispění katalyzátoru). Uvolněné elektrony představují elektrický proud vedený vnějším obvodem ke kladné elektrodě. Na kladnou elektrodu působí oksylichovadlo (O_2) a naopak probíhá redukce, kdy atomy oksylichovadla volné elektrony přijímají za současné reakce s kladnými ionty, které ke kladné elektrodě pronikají elektrolytem. Náboj na elektrodách vytvoří potenciálový rozdíl mezi elektrodami (viz. Obr. 3.2). [15]



Obr. 3.2: Přímý způsob transformace primární energie [11]

Každý vodíkový článek může vyprodukovat maximální teoretické napětí $U_{teo} = 1,187 \text{ V}$. Energetický zisk je pak úměrný elektrickému proudu, tekoucímu určitý čas mezi anodou a katodou. Pak se ideální velikost elektrického výkonu palivového článku vyjádří vztahem [15]:

$$P_i = U_{teo} \cdot I \quad 3.9$$

Ve skutečných palivových článcích vznikají ztráty, které snižují generované napětí. Ztráty jsou způsobeny tím, že elektrony tečou přes vnější okruh, ionty přes elektrolyt a chemické látky přes anodu a katodu. Tyto procesy mají přirozený odpor, což způsobuje vznik ztrát. Hodnota provozního napětí pro skutečné články je typicky mezi 0,5 – 0,6 V při zatížení a 1,1 V při stavu naprázdno. Ztráty vznikají také v zařízeních potřebných pro provoz článků (např. ventilátory). Elektrická účinnost PJ s přímou transformací závisí na účinnosti palivových článků a pomocných zařízeních. [15]

3.3 Popis kogeneračních zařízení podle typu primární jednotky

3.3.1 Palivový článek

Palivové články lze třídit podle:

- Použitého elektrolytu [15]:
 - Alkalické články (AFC)
 - Články s tuhými polymery (PEMFC)
 - Články s kyselinou fosforečnou (PAFC)
 - Články s roztavenými uhličitany (MCFC)
 - Články s tuhými oxidy (SOFC)
- Typu iontové vodivosti [15]:
 - Kationtová – způsobuje ji průchod protonů přes elektrolyt, tyto články vytváří vodu na katodě.
 - Aniontová – způsobuje ji průchod aniontů přes elektrolyt, u těchto článků vzniká voda na anodě.
- Pracovní teploty [15]:
 - Studené – pracují při teplotě blízké okolí (do 200°C) a k vytvoření reakce potřebují katalyzátor.

- Teplé – pracují při teplotách do 1000°C.

V současné době je stále vyvíjena přímá přeměna energie obsažené v palivových článcích. Předpokládá se brzké široké komerční využití jako stacionární primární jednotky, ale také v dopravě. Palivové články jsou ekologicky čisté, tiché a vysoce účinné.

Kogenerační jednotky s různými typy palivových článků mají tři společné části:

- Palivový článek
- Palivový procesor (reformátor)
- Zařízení pro úpravu elektrického proudu (střídač)

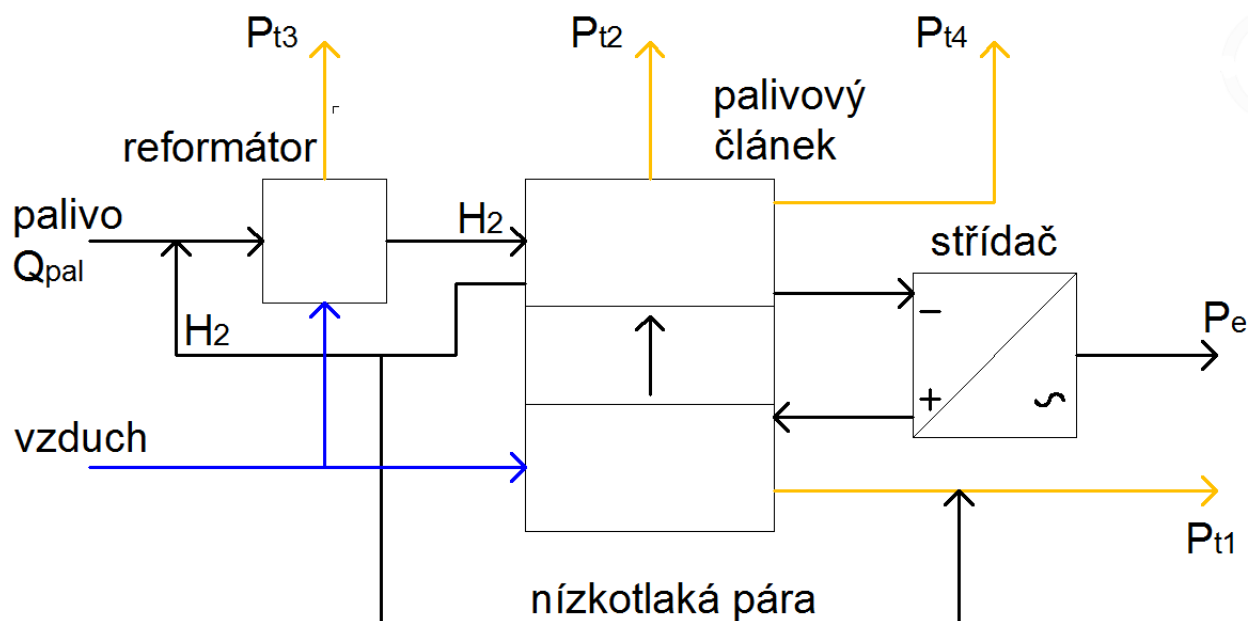
Typ palivového článku určuje možnosti uplatnění kogeneračního zařízení. Pro dosažení požadovaného výkonu jsou palivové články spojovány do bloků. V jedné jednotce je obsaženo až několik tisíc palivových článků o ploše 0,1 – 1 m². V Tab. 3.2 je uveden přehled palivových článků a jejich vlastností. [15]

Palivový procesor (reformátor) má za účel přeměnu vstupního paliva na vodíkové palivo, použitelné pro palivový článek. Vodík není běžně dostupný jako komerční palivo, z tohoto důvodu je potřeba ho pro kogenerační jednotku přímo vyrábět z jiných dostupných paliv. Pro reformování paliva je možno využívat následující tři typy: parní, oxidační nebo autotermický (kombinovaný). Jednotlivé postupy se od sebe liší zdrojem kyslíku, který se používá pro navázání uhlíku obsaženého v uhlovodíkových palivech. Mohou být použita kapalná nebo plynná paliva. V případě použití tuhých paliv je nutné provést jejich zplyňování. Přímou do palivového článku je palivo dodáváno v plynném skupenství. Nejpoužívanější typy paliv jsou zkapalněný plyn (LPG), zemní plyn, bioplyn, průmyslové plynné odpady, etanol a další. [15]

Střídač slouží k transformaci stejnosměrného proudu na střídavý.

Tab. 3.2: Přehled typů palivových článků a jejich vlastností [15]

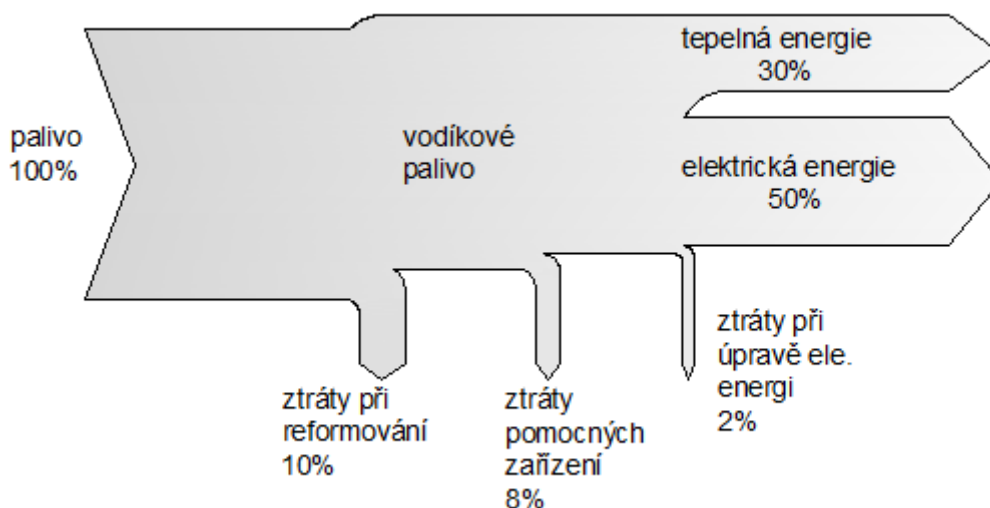
Článek	Typ	Elektrolyt	Pracovní teplota	Palivo	Elektrická účinnost	Možnost použití	Výkonová rozmezí
	-	-	[°C]	-	[%]	-	[kW _e]
AFC	alkalický	30% KOH	60 - 80	velmi čistý vodík	60	kosmický průmysl	do 20
PEMFC	membránový	polymer	70 - 90	vodík, zemní plyn, metanol	40 - 50	motorová vozidla, KJ	do 250
PAFC	membránový	kyselina fosforečná	170 - 200	vodík, zemní plyn, speciální plyn	40 - 45	KJ	50 - stovky kW _e
MCFC	rozemleté karbonáty	alkalické uhličitany	650	vodík, zemní plyn, speciální plyn	55 - 60	KJ, elektrárny	jednotky MW _e
SOFC	oxido - keramický	ytrium stabilizované zirkoniem	900 - 1000	vodík, zemní plyn, speciální plyn	60 - 70	KJ, elektrárny	jednotky MW _e



Obr. 3.3: Schéma KJ s palivovým článkem [15]

Samotný palivový článek se pohybuje ve výkonovém rozmezí od 2 – 100 kW_e, což umožňuje dobrou výkonovou flexibilitu. Výkonová flexibilita umožňuje použití palivových článků pro mikrovýrobu do rodinných domů nebo bytových jednotek, tak i pro centralizovanou výrobu. Palivové jednotky vhodné pro kogeneraci se v současnosti pohybují v rozmezí od 5 kW_e – 2 MW_e, v závislosti na typu palivového článku. Elektrická účinnost palivového článku se pohybuje od 30 – 50%. [15]

Tepelnou energii lze u palivových článků využít z chlazení článku, reformátoru paliva, katody a anody. Teplo může být využito především pro vytápění, pro ohřev užitkové vody nebo na výrobu páry o nízkých parametrech. [15]



Obr. 3.4: Energetická bilance KJ s palivovým článkem [15]

Výhody použití palivových článků v kogeneraci [15]:

- Nízké emise a nízký hluk
- Vysoká účinnost v celém pásmu zatížení
- Výkonová flexibilita, modulární jednotky
- Velké množství využitelných paliv (podmínkou je úprava na čistý vodík)

Nevýhody použití palivových článků v kogeneraci [15]:

- Velké investiční náklady
- Dlouhá startovací doba
- Korozivní účinky při použití tekutých elektrolytů

3.3.2 Parní turbína

Kogenerace s parními turbínami je určena především pro velké odběry tepla. Tepelný oběh využívaný kogenerační jednotkou s parní turbínou se nazývá Clausiův - Rankinův oběh. Rozlišujeme dva typy parních turbín a jejich zapojení:

- Parní turbína protitlaková
- Parní turbína kondenzační s odběrem páry pro dodávku tepla spotřebiteli

Výhody použití parních turbín v kogeneraci [2]:

- Může být použito libovolné palivo
- Vysoká celková účinnost
- Velká životnost
- Rozsah dosažitelných výkonů (1 až 250 MW_e)
- Libovolná forma dodávaného tepla
- Může být pokryto více požadavků na parametry dodávaného tepla

Nevýhody použití parních turbín v kogeneraci [2]:

- Velké investiční náklady
- Malý poměr elektrického a tepelného výkonu
- Pomalé najíždění a změna výkonu
- Obtížná realizace automatizace provozu

3.3.3 Organický Rankinův cyklus

Princip těchto kogeneračních jednotek je založený na Clausiův - Rankinově cyklu, kde je namísto vody použité médium (organické sloučeniny), které se odpařuje při nižších teplotách a tlacích. Nejčastěji používaná média jsou fluid uhlovodíky, toluen nebo silikonové látky. [15]

Cyklus je schopný využívat energii s relativně nízkou teplotou a je vhodný pro paliva, u kterých je nízká teplota spalování (biopaliva, sluneční energie, geotermální energie, odpadní teplo). Především spalování biomasy s využitím organického Rankinova cyklu je jednou z perspektivních možností jejího využití. [15]

Výkonový rozsah se pohybuje od 200 do 1500 kW_e. Elektrická účinnost je nízká a pohybuje se od 15 do 20%. Dodávka tepelné energie je možná pouze ve formě nízkopotenciálního tepla. Jsou tedy vhodné především pro dodávku tepla lokálních teplárenských sítí. [15]

3.3.4 Spalovací turbína

Spalovací turbíny se řadí mezi nejpoužívanější typ primární jednotky kogeneračních systémů. Pracují s Braytonovým tepelným oběhem, kde pracovní látkou je vzduch. Rozlišujeme dva základní okruhy spalovacích turbín. Spalovací turbínu s okruhem otevřeným a okruhem uzavřeným. U uzavřeného okruhu nedochází k přímému styku pracovní látky a spalín. [15]

Používají se tyto dva typy spalovacích turbín:

- Spalovací turbíny průmyslového typu
- Spalovací turbíny odvozené z leteckých proudových motorů

Princip práce spalovacích turbín spočívá v tom, že kompresorem nasátý vzduch se vhání společně s palivem pod určitým tlakem do spalovací komory. Tato vzniklá směs je ve spalovací komoře spalována za konstantního tlaku a dále je vedena do spalovací turbíny, kde expanduje a koná práci. Tepelná účinnost oběhu se spalovací turbínou je tím větší, čím je vyšší teplota spalín na výstupu ze spalovací komory (pohybuje se v rozmezí od 900°C až 1250°C). [2]

Elektrická účinnost kogeneračních zařízení se spalovací turbínou dosahuje 25 až 48% a celková účinnost může dosáhnout až 90%, záleží na provedení a typu spalovací turbíny. Jednotkový výkon se pohybuje v rozmezí od 500 kW_e do 250 MW_e [2]

Výhody použití spalovacích turbín v kogeneraci [2]:

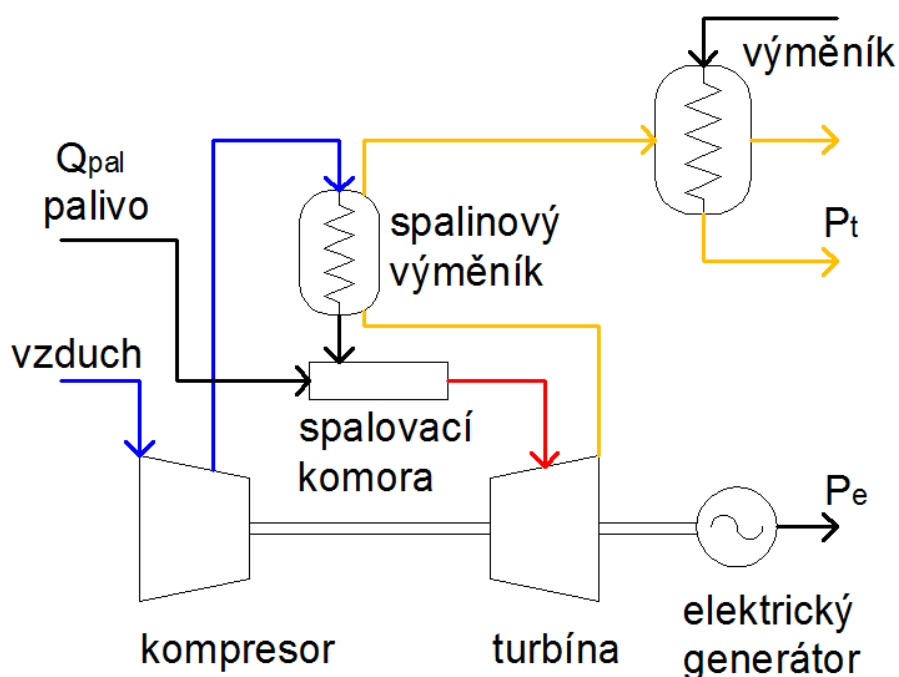
- Rychlé najíždění a změna výkonu
- Možnost každodenního odstavování
- Dodávka tepla ve všech požadovaných formách
- Relativně nízké investiční náklady (kompaktnost provedení a malé požadavky na zastavěnou plochu)
- Malé požadavky na chladicí vodu
- Možnost automatizace provozu až k bezobslužnému provozu

Nevýhody použití spalovacích turbín v kogeneraci [2]:

- Potřeba kvalitního a čistého paliva
- Při spalování plynu je potřeba zajistit jeho vysoký tlak
- Vysoká hlučnost
- Při nízkých zatíženích horší účinnost
- Nižší účinnost v porovnání se spalovacími motory

3.3.5 Mikroturbíny

Mikroturbíny jsou uvedeny na trh teprve nedávno. Jedná se o spalovací turbíny malého výkonu, které pracují při vysokých otáčkách okolo 100 000 otáček za minutu. Z tohoto důvodu musí být použit vysokofrekvenční generátor, který následně upraví parametry elektrické energie. Pokud na jednom hřídeli je kompresor o vysokých otáčkách a na druhém turbína s generátorem (tzv. dvouhřídelové uspořádání), tak odpadá úprava elektrického proudu, ale je zde použito více rotačních částí. Pro zvýšení účinnosti je použit spalínový výměník (rekuperátor) pro předeřhřev spalovacího vzduchu, ale dojde ke snížení teploty využitelné při dodávce tepla. Teplota spalín na výstupu mikroturbíny je v rozmezí 220°C až 320°C. Dodávka tepla je uskutečněna ve formě horké nebo teplé vody. [15]



Obr. 3.5: Schéma kogenerační jednotky s mikroturbínou [15]

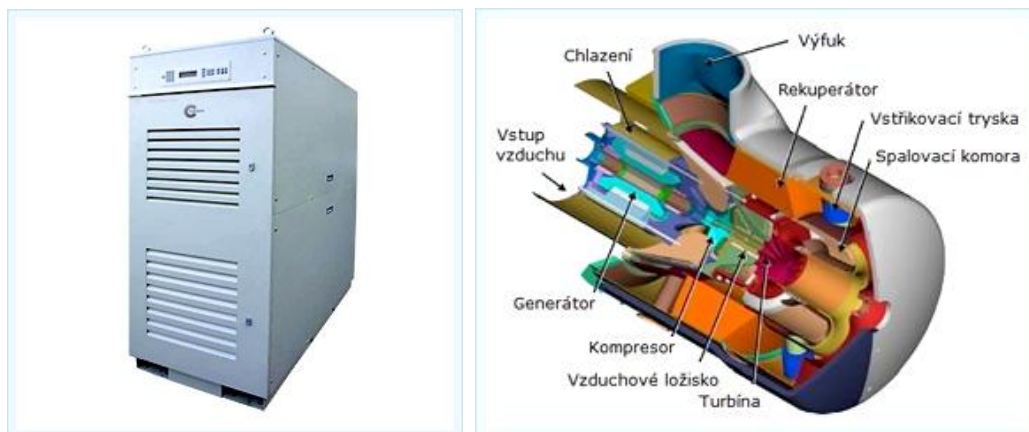
V poslední době se vyvíjejí mikroturbíny, které jsou v rozmezí výkonů od 30 kW_e do 350 kW_e. Z důvodu nižších jmenovitých výkonů mikroturbín se elektrická účinnost pohybuje mezi 20 – 30 %. Celková účinnost kogenerační jednotky dosahuje 65 – 80 %. Jako palivo se používá především zemní plyn, ale také benzín nebo nafta. Mikroturbíny jsou vhodné pro použití v bytové nebo komunální sféře jako decentralizované zdroje pro pokrývání potřeby elektrické energie a tepla. Kogenerační jednotky s mikroturbínami dosahují relativně malých rozměrů a jejich skříně mají protihlukové provedení a tepelnou izolaci. [15]

Výhody použití mikroturbín v kogeneraci [15]:

- Vysoká spolehlivost
- Jednoduchá instalace
- Nízké náklady na údržbu
- Malá hmotnost, malé rozměry
- Přijatelná výška hluku
- Přijatelná kvalita energií

Nevýhody použití mikroturbín v kogeneraci [15]:

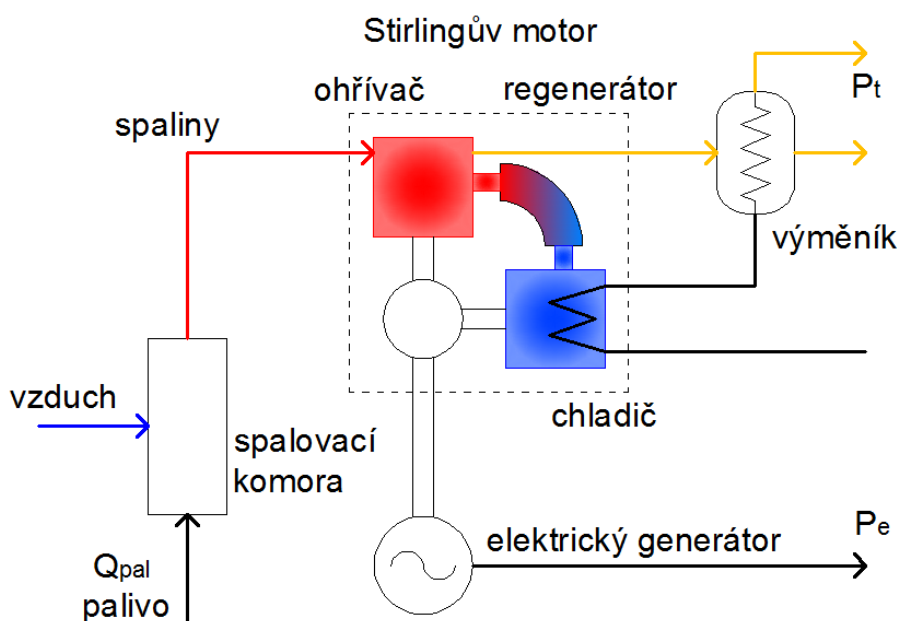
- Vysoké investiční náklady



Obr. 3.6: Kogenerační jednotka s mikroturbinou Capstone C65 (65kWe) [24]

3.3.6 Stirlingův motor

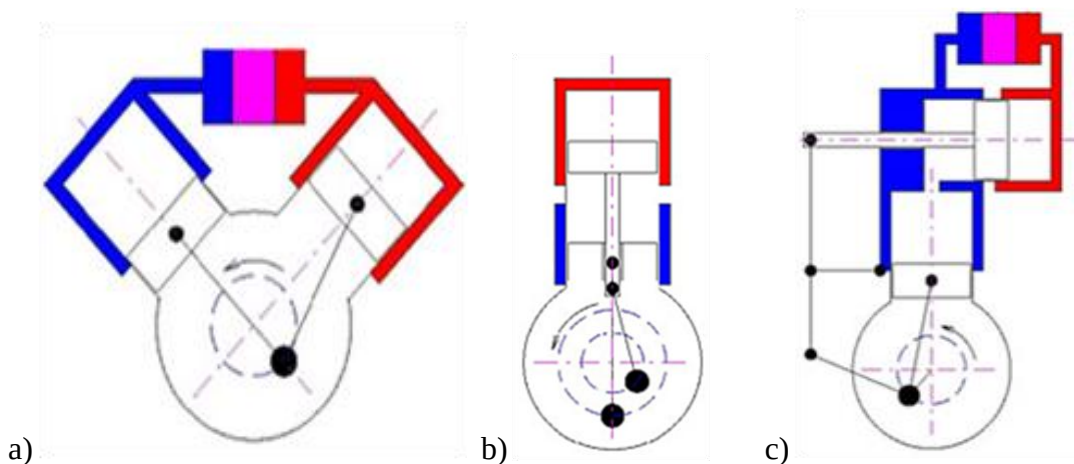
Stirlingův motor je pístový motor s vnějším spalováním. Princip Stirlingova motoru je založen na ohřevu a expanzi pracovní látky a využití tlakové difference k dosažení rotačního pohybu. Jako pracovní látka se nejčastěji používá helium, vzduch, dusík nebo CO_2 . Teplo je dodáváno do okruhu z vnějšího zdroje přes tepelný výměník (ohřívák). Teplo, které není přeměněno na technickou práci, je odvedeno chladicí vodou ve studeném výměníku (chladiči). Plyn se přenáší z horké zóny do chladiče a zpět pomocí regenerátoru. Tepelný oběh se blíží Carnotovu oběhu. [15]



Obr. 3.7: Schéma KJ se Stirlingovým motorem [15]

Stirlingův motor nemá explozivní spalování jako spalovací motory, a proto nemusí mít zapalovací zařízení, ventilový rozvod atd. Ke spalování dochází mimo válce a součásti motoru jsou tak chráněny proti kontaminaci spalinami, což vede k prodloužení životnosti a servisním intervalům. Z hlediska konstrukčního provedení se vyrábějí následující typy [15]:

- Alfa modifikace (viz. Obr. 3.8a)
- Beta modifikace (viz. Obr. 3.8b)
- Gama modifikace (viz. Obr. 3.8c)
- Jiné typy



Obr. 3.8: Modifikace Stirlingova motoru [12]

U modifikace alfa jsou dva pracovní písty v oddělených válcích, kde jeden válec se zahřívá a druhý se chladí. Tato modifikace je v praxi nejpoužívanější.

Modifikace beta má oba písty v jednom válci. Spodní část se zahřívá a horní se chladí.

Modifikace gama je v podstatě modifikace beta ve dvou válcích. Ohřívá se část přeháněcího válce, druhá část a pracovní válec se chladí.

Lze použít jakékoli palivo, ale z ekonomických důvodů je vhodné používat méně kvalitní paliva, především biomasu. Využívá se také teplo z technologických procesů nebo z jiného transformačního řetězce, pak odpadá spalování, které je nahrazeno přívodem tepelné energie. [15]

Malé jednotky se Stirlingovým motorem mohou mít hodnoty elektrického výkonu v rozmezí jednotek kW_e až 600 kW_e . Vyrábějí se i jednotky vyšších výkonů do $1,5 \text{ MW}_e$, které používají jako palivo biomasu. Tento typ primárních jednotek je vhodný pro použití v domácnostech nebo jako mobilní energetické zdroje. [15]

3.3.7 Spalovací motor

Pro kogenerační účely se používají pístové motory s vnitřním spalováním. Tyto motory jsou odvozeny od klasických spalovacích motorů vozidlových, trakčních nebo lodních. Jedná se o motor, kde se chemická energie vázaná v palivu přemění na mechanickou energii ve formě otáčivého pohybu hnacího hřídele. Spalovací motory dělíme podle způsobu zapálení směsi vzduchu a paliva ve válci:

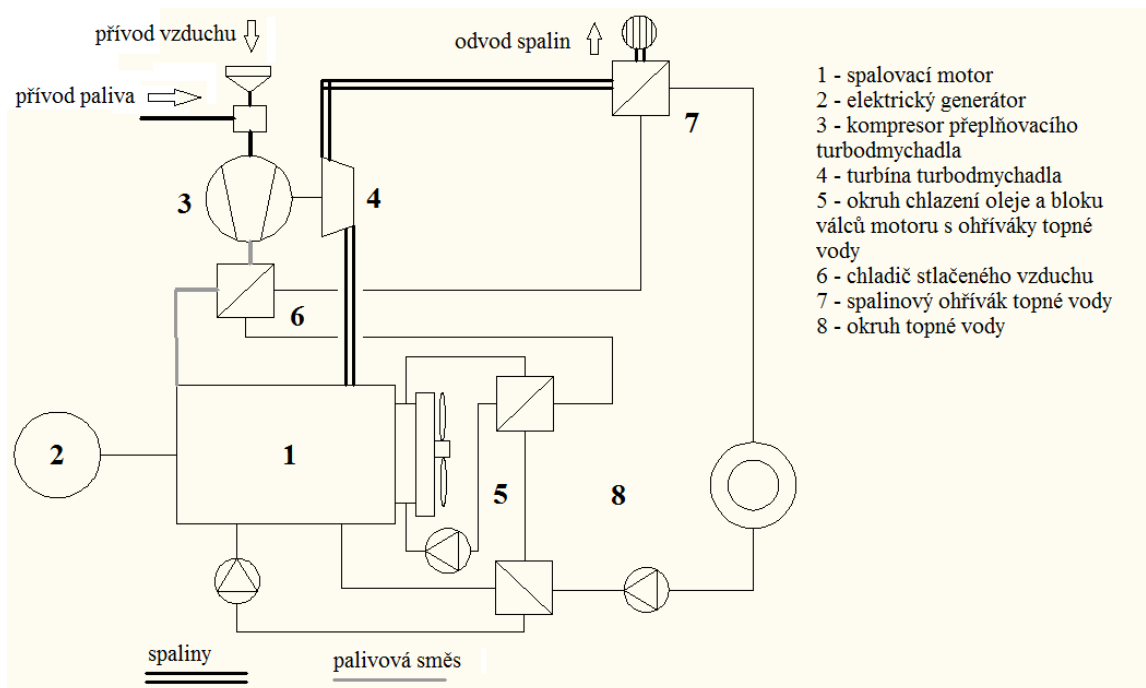
- Vznětové spalovací motory
- Zážehové spalovací motory

Vznětový motor, běžně nazývaný jako Dieselův motor, pracuje obvykle jako čtyřdobý spalovací motor nebo jako dvoudobý spalovací motor (lodní motor). U vznětových motorů dochází k zapálení paliva ve válci samovznícením při vstřiku do horkého stlačeného vzduchu. Účinnost na hřídeli těchto motorů se pohybuje v rozmezí 35 až 45% a může dosahovat výkonů až 25 MW . [2]

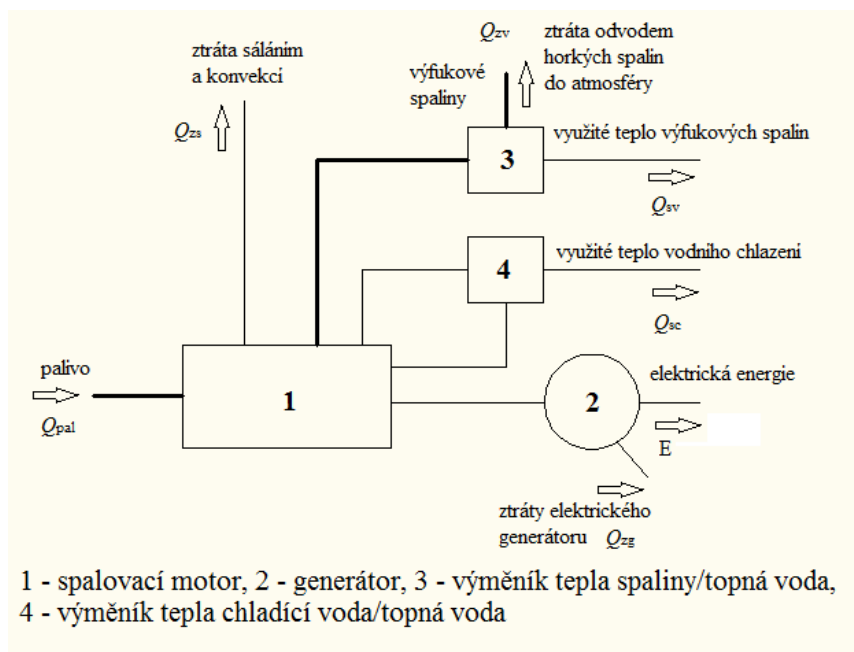
U zážehových motorů dochází k zapalování směsi paliva a vzduchu elektrickou jiskrou. Účinnost na hřídeli těchto motorů se pohybuje v rozmezí 27 až 43% a výkonové rozpětí je nižší než u vznětových motorů. [2]

Při použití spalovacích motorů pro kogeneraci je nutné provést rekonstrukci palivového systému a spalovacího prostoru, tato rekonstrukce lze provést jak u vznětových tak u zážehových motorů. Spalovací motory musí být provedeny ve speciálním uložení, které absorbuje vzniklé vibrace, protože při provozu vznikají nevyvážené síly. Dalším problémem je hluk (nizkofrekvenční složky), proto musí být motory provedeny s protihlukovou kapotou, především při instalaci kogenerační jednotky v obytných budovách a rodinných domech. Nevýhodou kogeneračních jednotek se spalovacími motory je vyšší požadavek na údržbu a s tím související častější odstavování z provozu, protože spalovací motory obsahují součásti s posuvným pohybem v oblasti vysokých teplot. Tyto součásti jsou opotřebovávány mnohem více než u strojů rotačních. [2]

Principem kogeneračních jednotek se spalovacími motory je využití odpadního tepla odvedeného z motoru, který pohání elektrický generátor. Jedná se o teplo chlazení motoru (blok válců a hlava motoru), chlazení mazacího oleje a o teplo výfukových plynů. Chlazení oleje je provedeno pomocí vodního chladicího okruhu, z něhož je teplo odváděno topnou vodou, jejíž teplota je v rozmezí 80 až 110°C. Výfukové spaliny s teplotou 400 až 540°C jsou odváděny do výměníku tepla spaliny/topná voda. Topnou vodu v tomto výměníku lze ohřát na teplotu vyšší 110°C nebo vyrábět páru. Nejvýhodnější využití odpadního tepla je ohřev topné vody na teplotu 90°C. Na Obr. 3.9 je uveden princip zapojení spalovacích motorů pro kogenerační účely, kde je dodávka tepla zajištěna ve formě teplé nebo horké vody. [2]



Obr. 3.9: Zapojení spalovacích motorů - dodávka tepla ve formě teplé nebo horké vody [2]



Obr. 3.10: Toky energií u kogenerační jednotky se spalovacím motorem [5]

Na Obr. 3.10 je uveden tok energií ve spalovacím motoru, na jehož základě jsou definovány účinnosti 3.10, 3.11 a 3.12 kogenerační jednotky se spalovacím motorem, které uvádí jejich dodavatelé. [5]

Elektrická účinnost η_{el} :

$$\eta_{el} = \frac{E}{Q_{pal}} \quad 3.10$$

Tepelná účinnost η_t :

$$\eta_t = \frac{Q_{sc} + Q_{sv}}{Q_{pal}} \quad 3.11$$

Celková tepelná účinnost η_{tc} :

$$\eta_{tc} = \frac{E + Q_{sc} + Q_{sv}}{Q_{pal}} \quad 3.12$$



Obr. 3.11: Kogenerační jednotka se spalovacím motorem GE Jenbacher (250kWe) [9]

3.4 Kogenerační jednotky pro použití v rodinném domě

V této kapitole budou vybrány a popsány kogenerační jednotky na českém trhu, které jsou vhodné pro použití v rodinném domě. Z výše uvedených primárních jednotek jsou v současné době dostupné především spalovací motory, Stirlingovy motory, případně mikroturbíny. Jednotky s palivovými články jsou v současnosti intenzivně vyvíjené a lze předpokládat, že v budoucnosti se stanou nejrozšířenějšími pro kogenerační jednotky.

3.4.1 Kogenerační jednotky firmy Tedom řada Micro

Jedná se o kogenerační jednotky se spalovacím motorem. V současné době jsou v nabídce dvě verze, a to Micro T7 (7 kW_e) a Micro T30 (30 kW_e). Výrobce udává, že celková účinnost jednotek je vyšší než 95%. Jako palivo může být zemní plyn, LPG nebo bioplyn (pouze verze Micro T30). Motor pracuje v ideálních podmínkách při konstantních otáčkách 1500 min⁻¹, což umožňuje dlouhou životnost stroje. Kogenerační jednotka je uzavřená v těsné protihlukové kapotě, což zajišťuje tichý chod i v blízkosti, a také snižuje tepelné ztráty sálavého tepla z motoru. Kapota je snadno demontovatelná a tím je zajištěn bezproblémový přístup ke všem komponentům v případě servisu jednotky. Provedení „vše v jednom“ poskytuje snadné zapojení do tepelného systému budovy a kompaktní rozměr umožní instalaci jednotky do stísněných prostorů, které nemusí být ventilovány. Jednotlivé parametry kogeneračních jednotek řady Micro jsou uvedeny v Tab. 3.3.

Tyto kogenerační jednotky jsou vhodné především pro komfortní rodinné domy, ubytovny, penziony, hotely, kryté plavecké bazény a další. Pro menší rodinné domy nebo byty nejsou tyto kogenerační jednotky ekonomicky příliš výhodné.



Obr. 3.12: Kogenerační jednotky Tedom řada Micro [8]

Tab. 3.3: Parametry kogeneračních jednotek Tedom řada Micro [8]

Rozměry a hmotnosti						
Typ jednotky	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	Provozní hmotnost [kg]	
Micro T7	1 300	700	1 380	1 120	645	
Micro T30	1 650	780	1 750	1 345	1 100	

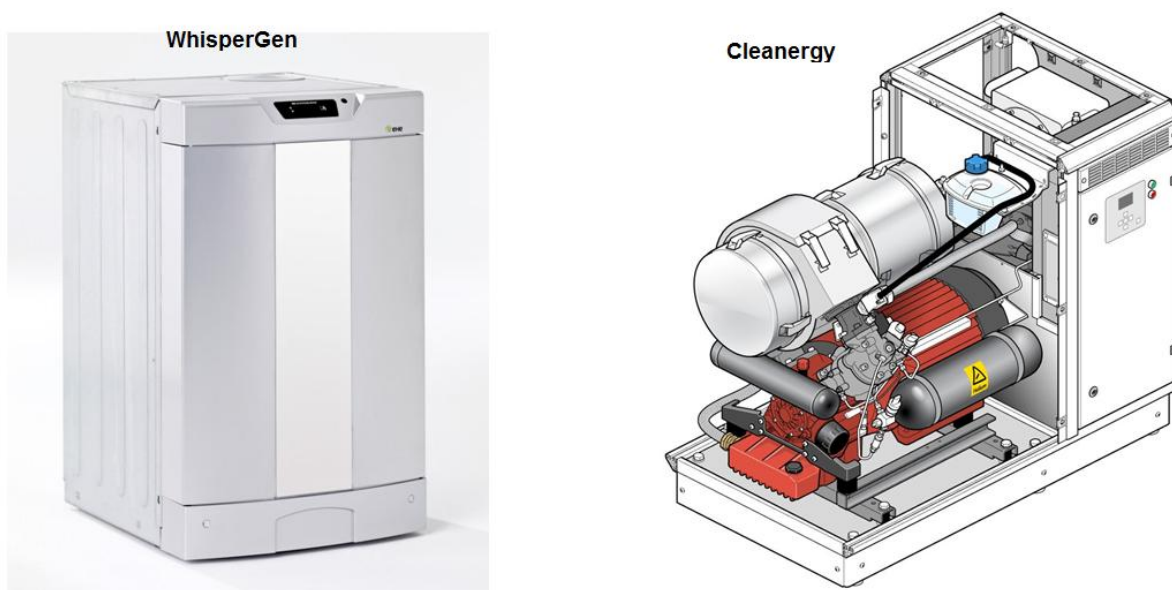
Technické údaje						
Typ jednotky	Elektrický výkon	Tepelný výkon	Elektrická účinnost	Tepelná účinnost	Celková účinnost	Spotřeba plynu
	[kW _e]	[kW _t]	[%]	[%]	[%]	[m ³ /h]
Palivo: Zemní plyn						
Micro T7	7	18	26,0	66,7	92,7	2,85
Micro T30	30	62	31,2	64,3	95,5	10,2
Palivo: LPG						
Micro T7	7	18	26,0	66,7	92,6	2,12
Micro T30	30	66	29,2	64,6	93,8	8,1
Palivo: Bioplyn						
Micro T30	21	43,5	30,5	63,0	93,5	10,6
Micro T30*	28	58	29,8	62,0	91,8	14,5

* Provoz na stechiometrickou směs.

3.4.2 Kogenerační jednotky firmy Stirling energy

Firma dodává mikrokogenerační jednotky na bázi Stirlingova motoru pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. K dispozici jsou jednotky ve dvou výkonových variantách, a to WhisperGen (1 kW_e) a Cleanergy (9 kW_e). Jednotky dosahují kompaktních rozměrů, tichého chodu a nízkých vibrací. Mohou využívat jako palivo zemní plyn, bioplyn nebo LPG. Životnost jednotek je výrobcem odhadována na 15 - 20 let a v případě použití akumulární nádoby se životnost prodlužuje. Možnou nevýhodou může být velký pokles elektrické účinnosti při nízkém výkonu, proto není vhodné použití jednotky se Stirlingovým motorem při částečném zatížení.

Mikrokogenerační jednotka WhisperGen je určena k výrobě elektřiny a tepla v rodinných domech, bytech, kancelářích a menších provozovnách a jednotka Cleanergy je určená pro výrobu v bytových domech, administrativních budovách, ubytovacích zařízeních, nemocnicích, obchodních prostorách i průmyslových objektech.



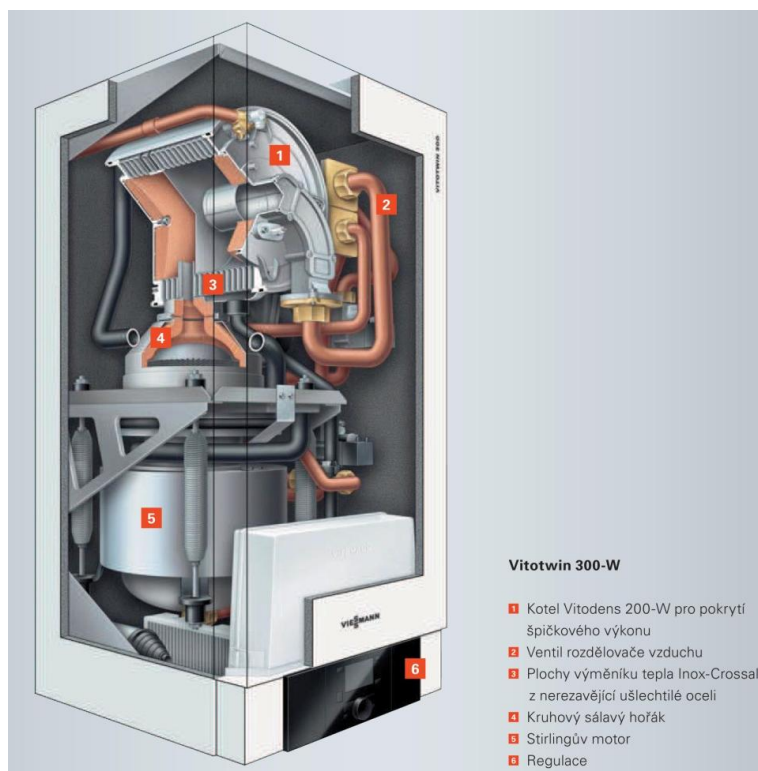
Obr. 3.13: Kogenerační jednotky firmy Stirling energy [23]

Tab. 3.4: Parametry kogeneračních jednotek firmy Stirling energy [23]

Technické údaje			
Jednotka:	WhisperGen		Cleanergy
Obecné	Motor - 4 válcový dvojčinný Stirlingův cyklus		Motor - 2 válce, 90°, V Stirlingův motor, Alfa modifikace
	Hlavní a pomocný hořák		
	Generátor - 230 V, 50 Hz, 1 fáze		Generátor - 400 V, 50 Hz, 3 fáze
Elektrický výkon	1 kW _e		2 - 9 kW _e
Tepelný výkon	Minimum	5,5 kW _t	8 - 26 kW _t
	Maximum	12 kW _t	
Elektrická účinnost	11%		25%
Tepelná účinnost	96%		70%
Celková účinnost	107%		92 - 96 % dle paliva
Druh paliva	Zemní plyn		Zemní plyn, LPG, bioplyn
Spotřeba paliva	1,55 Nm ³ /h		3 - 7 Nm ³ /h

3.4.3 Kogenerační jednotka firmy Viessmann

Firma dodává mikrokogenerační jednotku Vitotwin 300-W s lineárním Stirlingovým motorem a integrovaným kondenzačním plynovým kotlem pro pokrytí špičkových zatížení. Jedná se o bezúdržbový Stirlingův motor s tichým provozem a v kombinaci s akumulacním zásobníkem je optimalizován na dlouhé doby chodu. Kogenerační jednotka Vitotwin 300-W dosahuje elektrického výkonu 1 kW_e a tepelný výkon až 26 kW_t. Vitotwin 300-W je ideální při modernizaci topení rodinných domů. U objektů s potřebou tepla vyšší než 36 kW_t je vhodný také jako zařízení pro základní zatížení.



Obr. 3.14: Kogenerační jednotka Vitotwin 300-W [20]

Tab. 3.5: Parametry kogenerační jednotky Vitotwin 300-W [20]

Technické údaje		
Jednotka:	Vitotwin 300-W	
Obecné	Motor - lineární Stirlingův motor	
	Kondenzační kotel Vitodens 200-W	
	Generátor - 230 V, 50 Hz, 1 fáze	
Elektrický výkon	1 kW _e	
Tepelný výkon	Minimum	3,6 kW _t
	Maximum	26 kW _t
Elektrická účinnost	15%	
Tepelná účinnost	96%	
Druh paliva	Zemní plyn	
Spotřeba paliva	2,71 Nm ³ /h	

3.5 Postup instalace a připojení kogenerační jednotky

Kogenerační jednotka musí být vhodně zvolena vzhledem ke spotřebám tepla a elektřiny v odběrném místě, aby bylo dosaženo ekonomické návratnosti investice. Obecně platí, že ekonomický přínos kogenerační jednotky roste s vlastní spotřebou vyrobené elektřiny a tepelnou energií. Vyrobena elektrická energie se odvíjí od spotřeby tepla v daném objektu.

Výroba elektřiny v kombinovaných výrobnách elektřiny a tepla s výjimkou výroben využívajících obnovitelné zdroje nebo degazační a důlní plyn je podporována dle platného cenového rozhodnutí ERÚ 4/2012 pro rok 2013 zeleným bonusem podle provozních hodin viz. Tab. 3.6.

Tab. 3.6: Základní sazba ročního zeleného bonusu na elektřinu pro výrobu KVET s instalovaným výkonem do 5MW (včetně) [16]

	Druh podporovaného zdroje (výrobný)	Instalovaný výkon výrobný [kW]		Provozní hodiny [h/rok]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
		od	do (včetně)		
ř./sl.	a	d	e	h	k
700	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla s výjimkou výrobný využívající obnovitelné zdroje nebo degazační a důlní plyn	0	200	3 000	2 010
701		0	200	4 400	1 540
702		0	200	8 400	670
703		200	1 000	3 000	1 590
704		200	1 000	4 400	1 190
705		200	1 000	8 400	590
706		1 000	5 000	3 000	1 220
707		1 000	5 000	4 400	890
708		1 000	5 000	8 400	500
709	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla využívající obnovitelné zdroje energie nebo degazační a důlní plyn	0	5 000	8 400	45
710	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla společně spalující obnovitelné zdroje s neobnovitelnými zdroji a/nebo s druhotnými zdroji nebo neobnovitelné zdroje s druhotnými zdroji v procesu společného spalování	0	5 000	8 400	45

Při vlastní spotřebě elektrické energie z kogenerační jednotky se získá 0,65 až 2,01 Kč/kWh. Zelený bonus a ušetří se cca 4,5 Kč/kWh za nákup elektrické energie od lokálního distributora, takže v konečném výsledku je při vlastní spotřebě elektrické energie získáno cca 5,15 – 6,51 Kč/kWh.

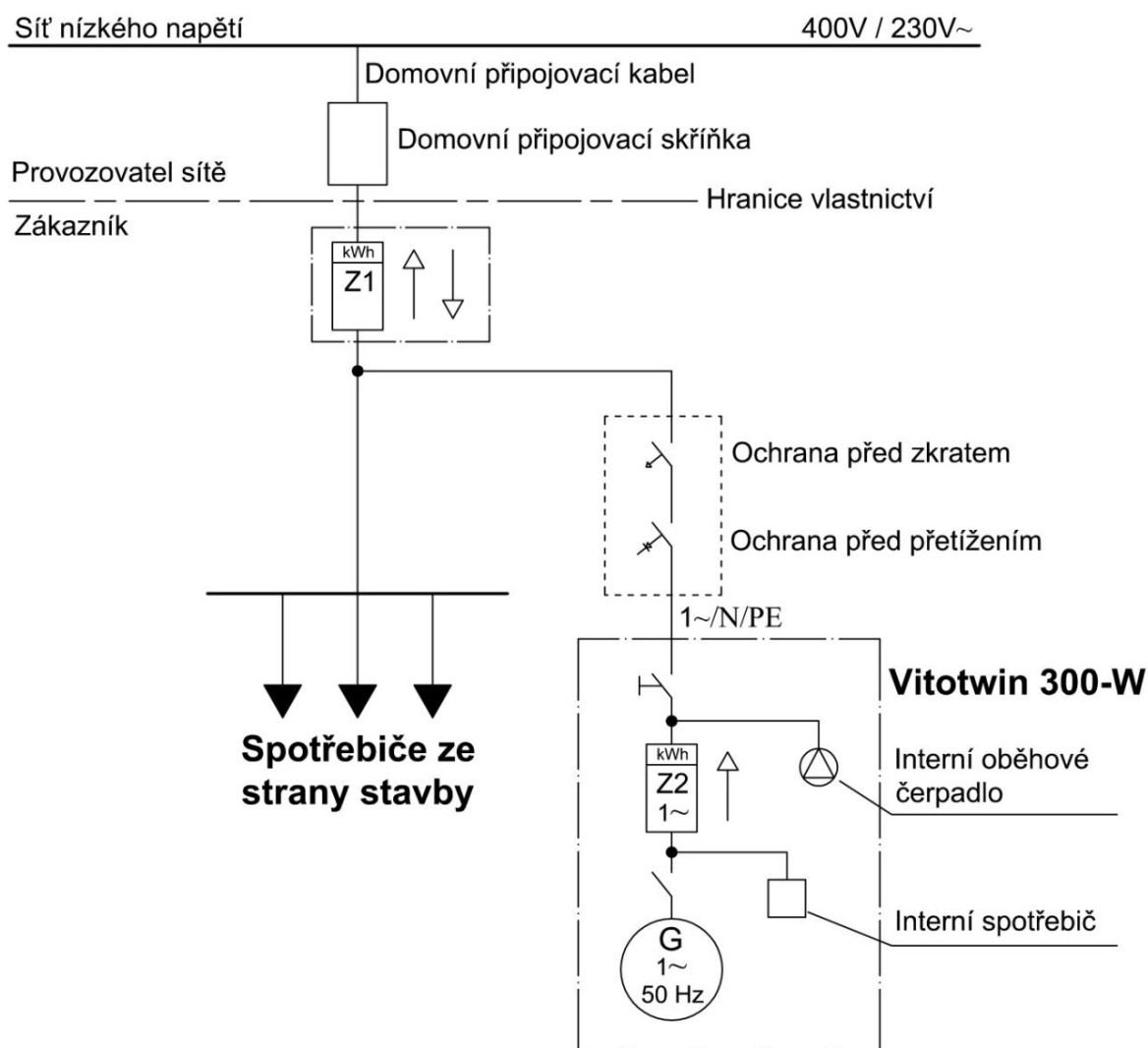
Pokud nedojde ke spotřebování elektrické energie v daném objektu, kterou vyrobí kogenerační jednotka, tak se získá Zelený bonus 0,65 až 2,01 Kč/kWh za výrobu elektrické energie a nespotřebovaný přebytek dodaný do distribuční sítě je prodán za smlouvenou tržní cenu cca 0,64 Kč/kWh, takže v konečném výsledku za nespotřebovaný přebytek, který je dodán do sítě, se získá cca 1,31 – 2,65 Kč/kWh.

Nejefektivněji tedy vychází, když je co nejvíce vyrobené elektrické energie využito pro vlastní spotřebu.

Dále bude uvedena posloupnost kroků, které musí být provedeny pro úspěšné připojení kogenerační jednotky:

1) Připojení jednotky do sítě

U příslušného distributora elektřiny (např. EON, ČEZ, PRE) je potřeba zažádat o připojení zdroje k distribuční soustavě. Společně s žádostí musí být předložen projekt na zapojení kogenerační jednotky („jednopolové schéma zapojení“) a doklad o vlastnictví pozemku. Pokud bude žádosti vyhověno, bude s distributorem elektřiny uzavřena smlouva o připojení k distribuční soustavě. Náležitosti Smlouvy o připojení k distribuční soustavě definuje zákon č. 458/2000 Sb. a vyhláška Energetického regulačního úřadu č. 51/2006 Sb. [17]



Obr. 3.15: Schéma připojení kogenerační jednotky Vitotwin 300-W do sítě [20]

2) Stavební povolení

Kogenerační jednotku lze instalovat na základě stavebního povolení. Součástí žádosti o stavební povolení je zpravidla projekt na instalaci KJ a případně projekt na vyvedení elektrického výkonu. Pro malé kogenerační jednotky umístěné v plynových kotelnách se nemusí vyřizovat ani stavební povolení, ani ohlášení stavby, neboť se nebude měnit topné médium. [17]

3) Licence

Pro výrobu elektřiny z kogenerace je potřeba vyřídít licenci na výrobu elektřiny. Tuto licenci vydává Energetický regulační úřad. Žádost o vydání licence je ke stažení z internetových stránek ERÚ: www.eru.cz. [17]

K získání licence je potřeba [17]:

- formulář A1/A2 „Žádost o udělení licence pro podnikání v energetických odvětvích pro fyzické/právní osoby“
- správní poplatek ve výši 1000,-Kč
- doklad o identifikačním čísle – výpis z obchodního, obdobného rejstříku (ne starší 3 měsíců), případně kopii živnostenského listu, nebo žádost o přidělení IČ (u fyzických osob)
- formulář „Seznam jednotlivých provozoven“ pro výrobu elektřiny
- katastrální mapa ve vhodném měřítku se zákresem umístění provozovny
- doklad o majetku KJ – faktura o zaplacení KJ – 1× kopie
- technická specifikace KJ nebo osvědčení o jakosti a kompletnosti výrobku – 1× kopie
- Čestné prohlášení o technické způsobilosti zařízení – 1× originál (musí podepsat statutární orgán)
- zpráva o revizi plynového zařízení – 1× originál, příp. úředně ověřená kopie
- zpráva o revizi elektrického zařízení (vyvedení el. výkonu, revize KJ) – 1× originál, příp. úředně ověřená kopie (výkony v revizi musí souhlasit se žádostí)
- CE prohlášení o shodě

Příloha č. 1 k vyhlášce č. 426/2006 Sb.

01. Identifikační číslo (bylo-li přiděleno)

02. Číslo žádosti (vypíší ERÚ)

03. Rodné číslo/datum narození (bylo-li přiděleno ŘČ)

kopie
podle zákona
č. 634/2004 Sb.
zpráva o jakosti, postřih
celkové výše
správního poplatku
nepravidluje 5.000 Kč)

razítko ERÚ

A1

ŽÁDOST O UDĚLENÍ
licence pro podnikání v energetických odvětvích
pro fyzické osoby

Niže podepsaná osoba žada podle § 7 zákona č. 459/2000 Sb., o podnikání podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů, o udělení licence pro podnikání v energetických odvětvích:

ŽADATEL:

04. Titul před jménem 05. Příjmení

06. Jméno 07. Titul za jménem 08. Státní občanství

09. Obchodní firma, je-li žadatel zapsán v obchodním/živnostenském/jiném rejstříku

10. Místo trvalého pobytu fyzické osoby

a) ulice b) č. popisné c) č. orientační

d) část obce

e) obec f) PSČ

g) okres h) kraj

i) státní

11. Místo podnikání (v souladu se zázpisem v obchodním/živnostenském/jiném rejstříku, je-li žadatel zapsán)

a) ulice b) č. popisné c) č. orientační

d) část obce

e) obec f) PSČ

g) okres h) kraj

i) státní

12. Adresa pro doručování (vypíší v případě, že adresa pro doručování se liší od adresy místa trvalého pobytu fyzické osoby – bod 10)

a) ulice b) č. popisné c) č. orientační

d) část obce

e) obec f) PSČ

g) okres h) kraj

i) státní

13. Kontaktní údaje žadatele o licenci – fyzické osoby

a) telefon b) fax c) mobilní telefon

d) e-mail

14. Předmět podnikání (soubor licence)

☐ výroba elektřiny ☐ distribuce elektřiny ☐ přenos elektřiny ☐ obchod s elektřinou ☐ činnosti operátora trhu

☐ výroba plynu ☐ distribuce plynu ☐ přeprava plynu ☐ obchod s plynem ☐ uskladňování plynu

☐ výroba tepelné energie ☐ rozvod tepelné energie

15. Datum zahájení činnosti (stanoví se den vzniku oprávnění k licencované činnosti nebo den pořízení)

den měsíc rok

16. Datum, na kterém je o licenci žádáno (nejpozději 22 let nebo 5 let na obchod s elektřinou, na obchod s plynem)

Žadatel, příp. jiná osoba oprávněná jednat jménem žadatele

Jméno Příjmení

Datum

Podpis

Obr. 3.16: Formulář A1 „Žádost o udělení licence pro podnikání v energetických odvětvích pro fyzické osoby“ [18]



Obr. 3.17: Rozhodnutí o udělení licence ERÚ

4) Osvědčení o původu elektřiny a tepla

Osvědčením se prokazuje, že energie byla vyrobena v kombinované výrobě. Osvědčení vydává Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR (MPO) a je nutné pro vyplácení podpory KVET od územně příslušného distributora. [17]

5) Registrace u operátora trhu s elektřinou

Jako výrobce elektřiny je potřeba se zaregistrovat u Operátora trhu s elektřinou, čímž se staneme registrovaným účastníkem trhu (RÚT). K registraci je potřeba číslo přidělené licence, postup registrace je uveden na internetových stránkách Operátora trhu s elektřinou www.ote-cr.cz. [17]

OTE

Formulář C

Přidělené registrační číslo osoby - ID USER (vyplní OTE)

Pole s modrým podkladem jsou povinná.

Žádost o registraci oprávněné osoby smluvního partnera OTE/ uživatele CS OTE

- tato žádost je určena pro registraci osoby, která bude mít aktivní přístup do CS OTE prostřednictvím přístupových prvků (certifikáty), včetně automatické komunikace

1. Identifikace osoby

a) Titul před jménem _____ b) Příjmení/název pro Automatickou komunikaci _____

c) Jméno/Server _____ d) Titul za jménem _____

e) Telefon _____ f) Mobilní telefon _____

g) E-mail _____

2. Účastník trhu

a) Jméno firmy _____

b) Přidělené registrační číslo účastníka (ID RÚT) _____

3. Oblast komunikace a přístupu do systému CS OTE

Dle zvolené smlouvy budou registrované osobě nastaveny příslušné činnosti v CS OTE.

Elektřina ZÁPIS/ČTENÍ

a) Smlouva o zúčtování odchylek ☐

b) Smlouva o přístupu na organizovaný krátkodobý trh s elektřinou ☐

OTE

c) Smlouva o přístup do CS OTE ☐

d) Smlouva o předávání údajů ☐

e) Smlouva o zúčtování regulační energie ☐

f) Smlouva o přístup na vyrovnávací trh s regulační energií ☐

Plyn ZÁPIS/ČTENÍ

a) Smlouva o zúčtování odchylek ☐

b) Smlouva o přístupu do CS OTE ☐

c) Smlouva o předávání údajů ☐

d) Smlouva o předávání dat nezbytných pro zúčtování odchylek ☐

Poznámky:
Do pole ZÁPIS/ČTENÍ vyplňte Z pro požadované přístupové právo čtení a zápisu nebo C pro požadované přístupové právo jen pro čtení.

Datum podání žádosti: _____

Podpis registrované osoby _____ Jméno a podpis statutárního zástupce (případně oprávněné osoby) _____ Ověřovací razítko _____

Doplňující informace

Vyvěstivky použitých zkratk:

OTE – Operátor trhu s elektřinou a plynem
ID RÚT – registrační číslo účastníka trhu
CS OTE – centrální systém OTE
UID/ID USER – registrační číslo smluvního partnera OTE / uživatele CS OTE oprávněné přistupovat do CS OTE

Obr. 3.18: Žádost o registraci oprávněné osoby [19]

6) Instalace elektroměru

Pro měření množství vyrobené elektřiny je potřeba mít nainstalován elektroměr, který odpovídá vyhlášce č. 326/2005, a to i v případě, že vyráběna elektřina bude jen pro vlastní spotřebu. [17]

7) Smlouva na výkup silové elektřiny

V případě dodávky elektřiny do sítě je nutno uzavřít smlouvu s registrovaným obchodníkem (např. EON, ČEZ, PRE a další), který přebytečnou elektřinu z výroby vykoupí za sjednanou cenu. [17]

8) Smlouva na úhradu příspěvku

Právo na příspěvek za elektřinu KVET (kombinované výroby elektřiny a tepla) má vysoce účinná kogenerace podle zákona 458/2000 Sb. a držitelé osvědčení od MPO. Kogenerace musí plnit kritéria vysoce účinné kogenerace podle vyhlášky MPO č. 344/2009. Pokud provozovatel splňuje všechna kritéria, má právo na příspěvek na elektřinu z vysoce účinné KVET dle cenového rozhodnutí ERÚ. Nezbytným předpokladem je také instalace „příspěvkového“ elektroměru, tj. elektroměru, který měří vyrobenou elektrickou energii na svorkách generátoru (tj. včetně vlastní spotřeby KJ). Provozovatel musí být držitelem licence na výrobu elektřiny. [17]

9) Výkaznictví

Provozovatel kogenerační jednotky je povinen podle velikosti výroby vést tyto měsíční, čtvrtletní či roční výkazy [17]:

- měsíční výkaz o výrobě elektřiny ze zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla (vzor v Příloze č. 6 Vyhlášky 344/2009)
- měsíční výkaz o spotřebě elektřiny výrobce (ke stažení u příslušných distribučních společností)
- výkazy pro Energetický regulační úřad
- Měsíční výkaz o dodávkách elektřiny, tepla, energetických plynů a o palivech užitých na produkci elektřiny a tepla a další výkazy týkající se energetiky pro Ministerstvo průmyslu a obchodu
- Výkaz pro Český statistický úřad

4 TEPELNÉ PROCESY A SDÍLENÍ TEPLA

Při modelování tepelných soustav vycházíme ze zákonů termomechaniky. Termodynamika je část termomechaniky, která se zabývá přeměnou tepelné energie v jiné druhy energií, sdílením tepla a změnou vlastností látek vlivem přivedeného nebo odvedeného tepla.

Teplo Q je druh energie a množství přivedeného nebo odvedeného tepla látky o hmotnosti m a rozdílu tepla ΔT je určeno rovnicí:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad 4.1$$

Kde měrná tepelná kapacita c udává množství tepla, které je nutno přivést látce o hmotnosti 1 kg aby se ohřála o 1 K (1°C). Rozměr měrné tepelné kapacity je $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$. Velikost měrné tepelné kapacity není konstantní, ale je mírně závislá na teplotě látky. [3]

První zákon termodynamiky popisuje princip sdílení tepla a je zvláštním případem zákona zachování energie pro uzavřenou termomechanickou soustavu, kdy nedochází k výměně hmotnosti s okolím. Podle prvního zákona termodynamiky je možné změnu vnitřní energie ΔU termodynamické soustavy provést přivedením (odvedením) tepla Q nebo vykonáním práce A . Matematický zápis prvního zákona termodynamiky je [3]:

$$Q = \Delta U + A \quad 4.2$$

Druhý zákon termodynamiky udává, jakým směrem probíhají tepelné děje v termodynamické soustavě. Podle druhého zákona termodynamiky teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa o teplotě nižší na těleso o teplotě vyšší. [3]

Rozlišujeme tři způsoby sdílení tepla [4]:

1. Vedením (kondukcí), při němž se teplo šíří pouze v důsledku tepelného pohybu částic hmoty (molekul, atomů a volných elektronů).
2. Prouděním (konvekcí), při němž se teplo šíří účinkem tepelné vodivosti a bezprostředního směřování molárních částí prostředí z jedné oblasti prostoru do druhé (například nastává v pohybujících se kapalinách nebo plynech).
3. Sáláním (radiací), při němž se teplo přenáší z jednoho tělesa na druhé účinkem elektromagnetického vlnění mezilehlým prostředím, jímž může tepelné záření procházet. Může se šířit vakuem na rozdíl od předcházejících způsobů sdílení tepla.

4.1 Sdílení tepla vedením

Základem teorie vedení tepla je Fourierův zákon:

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad}T \quad 4.3$$

Kde Φ je tepelný tok [W], λ je měrná tepelná vodivost $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, S je plocha kolmá ke směru tepelného toku $[\text{m}^2]$ a $-\text{grad}T$ je teplotní gradient $[\text{K} \cdot \text{m}^{-1}]$, který je záporný, jelikož teplota ve směru toku klesá. [3]

Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou neproměnného průřezu S a tloušťkou δ je popsáno rovnicí:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad 4.4$$

4.2 Sdílení tepla prouděním

Teplo se sdílí pohybem makroskopických částic látky a to pouze u kapalin a plynů. V praxi se nejčastěji vyskytuje přestup tepla ze stěny do tekutiny nebo naopak. Tepelný tok lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi = \alpha \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad 4.5$$

Kde α je součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], S je plocha kolmá ke směru tepelného toku [m^2]. Pokud má kapalina teplotu T_1 a přiléhající stěna teplotu T_2 pak výše uvedený vztah udává množství tepla, které projde z kapaliny do stěny za jednotku času. [3]

Prostup tepla stěnou složenou z přiléhajících vrstev, které jsou omývány z obou stran kapalinou, lze popsat vztahem:

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi = k_s \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad 4.6$$

Kde T_1 a T_2 jsou teploty teplejší a chladnější kapaliny a k_s je součinitel prostupu tepla rovinou stěnou, který se dá vyjádřit vztahem:

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad 4.7$$

Kde α_1 a α_2 jsou součinitelé přestupu tepla teplejší a chladnější strany stěny, δ_i je tloušťka i -té vrstvy stěny a λ_i je měrná tepelná vodivost i -té vrstvy stěny. [3]

4.3 Sdílení tepla sáláním

Velikost energie za jednotku času, která je tělesem vyzářena do okolí, lze vyjádřit vzorcem:

$$\Phi = \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad 4.8$$

Kde T je absolutní teplota tělesa [K], S je plocha tělesa [m^2] a σ je Stefan-Boltzmanova konstanta sálání [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]. [3]

4.4 Tepelný tok proudu kapaliny

Tepelný tok proudu kapaliny lze vyjádřit vztahem:

$$\Phi = c \cdot q \cdot T \quad 4.9$$

Kde c je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], q je hmotnostní průtok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$] a T je absolutní teplota tělesa [K]. [3]

4.5 Akumulace tepla

Akumulace tepla probíhá ve všech tělesech podle vztahu:

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi = \rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad 4.10$$

Kde ρ je hustota látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] a V je objem látky [m^3], ve které se akumuluje teplo, c je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] a t je čas. Veličina Φ představuje velikost akumulovaného tepla za jednotku času. [3]

Cílem této kapitoly bude popis tepelného okruhu kogenerační jednotky, popis jednotlivých bloků v simulačním programu Matlab Simulink a uvedení postupu užívání grafické nadstavby v programu Matlab GUI.

Schéma tepelného okruhu (viz. Obr. 5.1) je složeno z kogenerační jednotky Vitotwin 300-W, z multivalentního akumulárního zásobníku topné vody Vitocell 340-M (750l), a na něj napojeného ústředního topení (ÚT). Akumulační zásobník slouží také jako zásobníkový ohříváč teplé užitkové vody (TUV). Směšovací ventily topné vody a užitkové vody mají za úkol udržovat požadovanou teplotu a zvýšit efektivitu využití tepelné energie.

Kogenerační jednotka dosahuje tepelného výkonu až 26kW_t a elektrického výkonu 1kW_e. Provoz kogenerační jednotky bude záviset na časových plánech, kdy lze očekávat požadavek na teplo pro ohřev TUV a ústřední topení. V Tab. 5.1 je uveden příklad nastavených časových plánů požadavku topné vody do systému ÚT a požadavku TUV. Podrobný popis s uvedením parametrů, na kterých spouštění kogenerační jednotky závisí, je uveden v kapitole 5.4 Řízení kogenerační jednotky.

Teplota a průtok topné vody z kogenerační jednotky charakterizují tepelný tok z ní vystupující. Ten je veden do akumulačního zásobníku, který společně s regulací umožňuje dlouhé doby chodu Stirlingova motoru, aby bylo možné co nejvyšší pokrytí potřeby elektrické energie. Na akumulační nádrž je napojeno ústřední vytápění, na kterém je očekávaný teplotní spád okolo 55°C/40°C. V simulaci je možné nastavit směšování topné vody ústředního topení na požadovanou teplotu, případně směšování vypnout. Teplo dodané do systému vytápění bude měřeno. V akumulačním zásobníku bude topná voda předávat teplo užitkové vodě. V simulaci je možné nastavit směšování teplé užitkové vody na požadovanou teplotu, případně směšování vypnout. Teplo potřebné pro ohřev TUV bude měřeno.

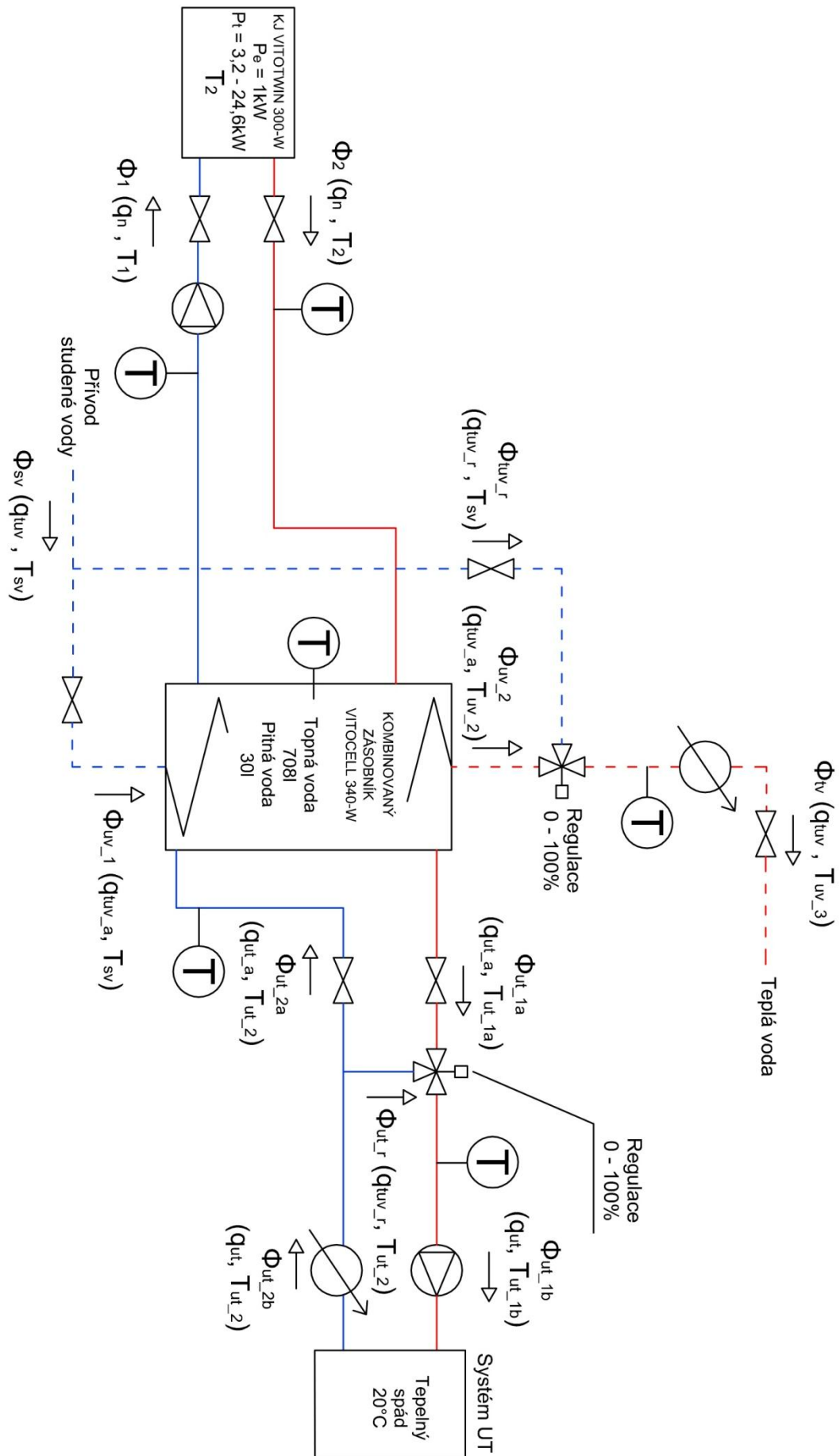
Schéma tepelného okruhu kogenerační jednotky v programu Matlab Simulink je znázorněno na Obr. 5.2. Délka simulace je nastavena na 86400s, což odpovídá 1 dni.

Simulace bude provedena pro následující provoz:

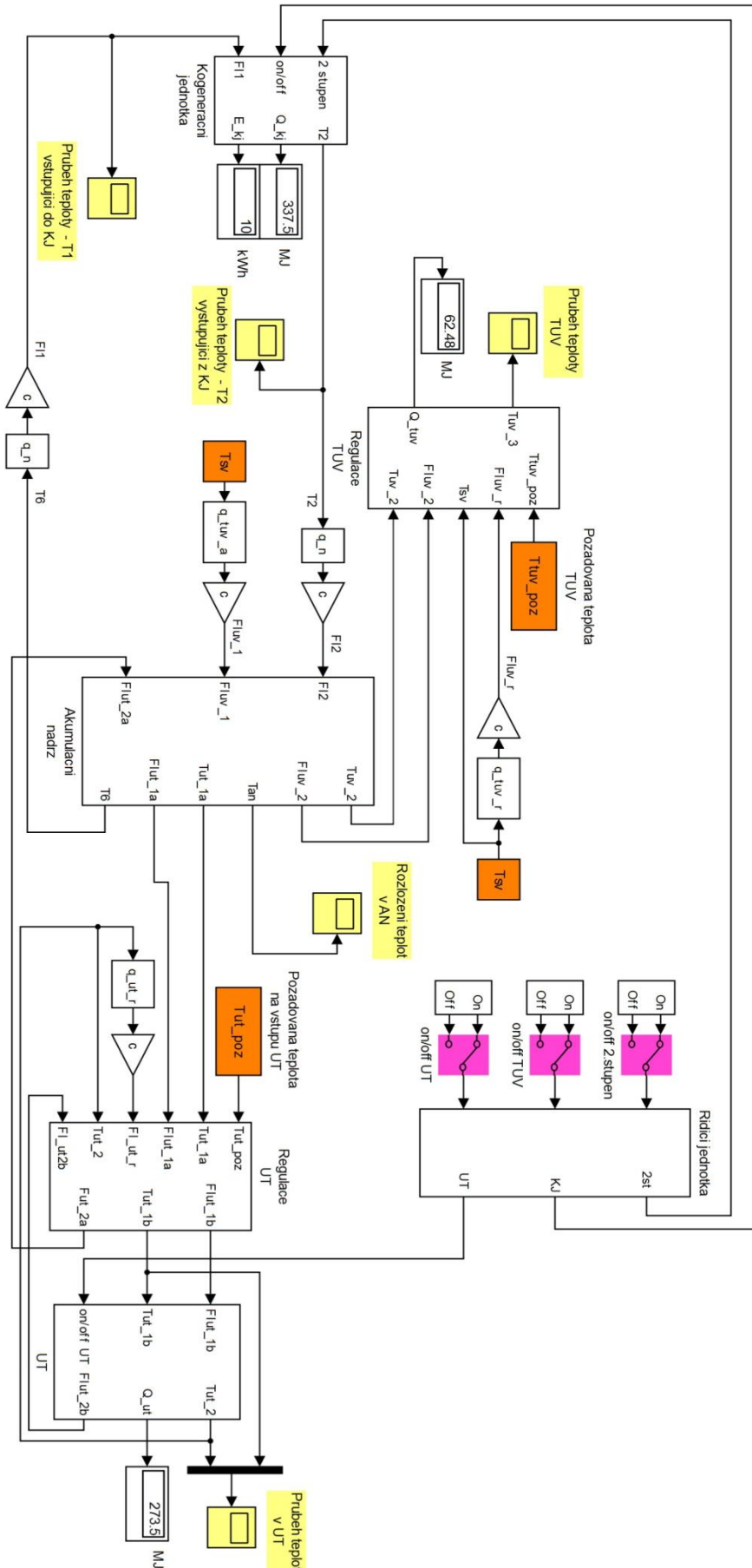
- 1) **Zimní provoz:** ohřev TUV – zapnut, systém vytápění – zapnut
- 2) **Letní provoz:** ohřev TUV – zapnut, systém vytápění – vypnut

Tab. 5.1: Nastavené časové plány odběru TUV a systému ÚT

[illegible]



Obr. 5.1: Tepelné schéma kogenerační jednotky

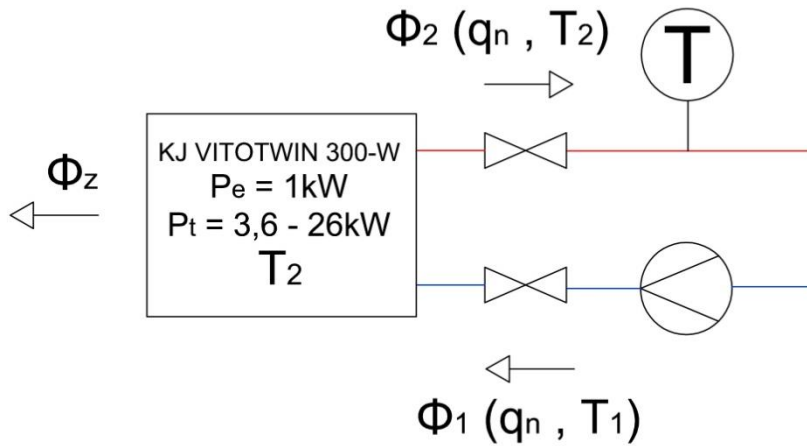


Obr. 5.2: Schéma tepelného okruhu kogenerační jednotky v programu Matlab Simulink

5.1 Kogenerační jednotka

Zjednodušující předpoklady:

- Teplota v celém objemu kogenerační jednotky je stejná (dokonalé míchání).
- Tepelný výkon kogenerační jednotky se mění skokově (zapnuto $P_t^{SM} = 5,7kW_t$ - Stirlingův motor, $P_t^{kot} = 10kW_t$ - kondenzační kotel, vypnuto $P_t^{vyp} = 0kW_t$).
- Elektrický výkon kogenerační jednotky se mění skokově (zapnuto $P_e = 1kW_e$, vypnuto $P_e = 0kW_e$).
- Neuvažujeme tepelnou kapacitu stěny kogenerační jednotky.



Obr. 5.3: Tepelné toky v kogenerační jednotce a kogenerační jednotka Vitotwin 300-W [20]

Rovnice energetické bilance (schéma Obr. 5.3):

$$\rho \cdot c \cdot V_{kj} \cdot \frac{dT_2}{dt} = \Phi_1 - \Phi_2 + P_c - \Phi_z \quad 5.1$$

$$\Phi_1(t) = c \cdot q_n(t) \cdot T_1(t) \quad 5.2$$

$$\Phi_2(t) = c \cdot q_n(t) \cdot T_2(t) \quad 5.3$$

$$P_c(t) = P(t) + \Phi_z(t) \quad 5.4$$

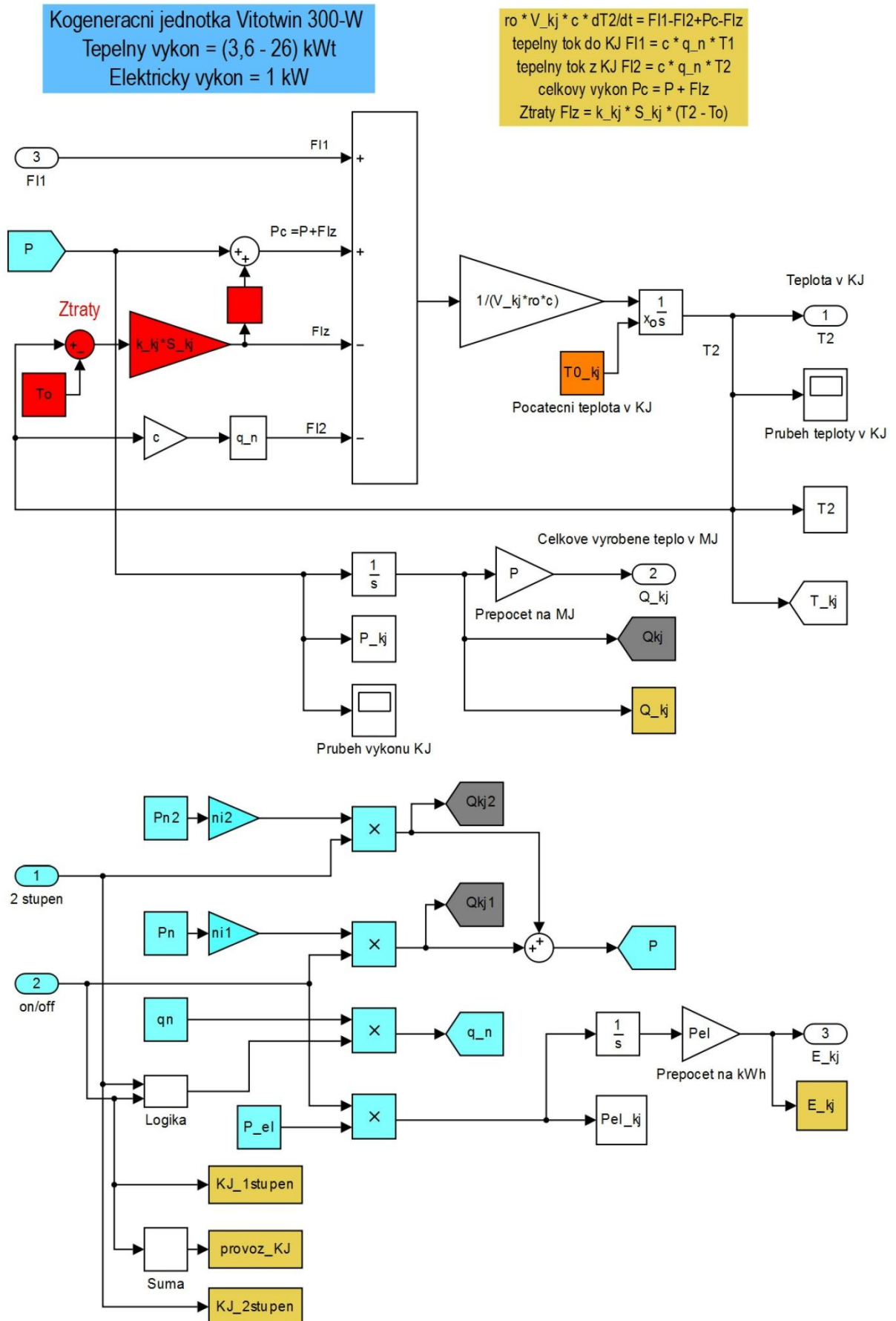
$$\Phi_z(t) = k_{kj} \cdot S_{kj} \cdot (T_2(t) - T_o) \quad 5.5$$

Kde Φ_1 je tepelný tok vstupující do kogenerační jednotky, Φ_2 je tepelný tok vystupující z kogenerační jednotky, P_c je celkový výkon, který udává součet jmenovitého výkonu kogenerační jednotky a výkonu na pokrytí ztrát, Φ_z je tepelný tok ztrát.

Zde je zadán jmenovitý hmotnostní průtok kogenerační jednotky $q_n=0,2$ kg/s a jmenovitý tepelný a elektrický výkon kogenerační jednotky a pomocí integrátoru se vypočítá vyrobené teplo a elektrická energie za celou simulaci.

Kogenerační jednotka dosahuje určitých tepelných ztrát, které zahrnuje tepelný tok Φ_z , ve schématu zvýrazněný červenou barvou. Ztráty jsou dány prostupem tepla. S_{kj} je teplosměnná plocha kogenerační jednotky a k_{kj} je součinitel prostupu tepla rovinnou stěnou. Ztráty jsou závislé na teplotě vody v kogenerační jednotce a na teplotě okolí. Teplota okolí byla zvolena 20°C a s časem se její hodnota nemění.

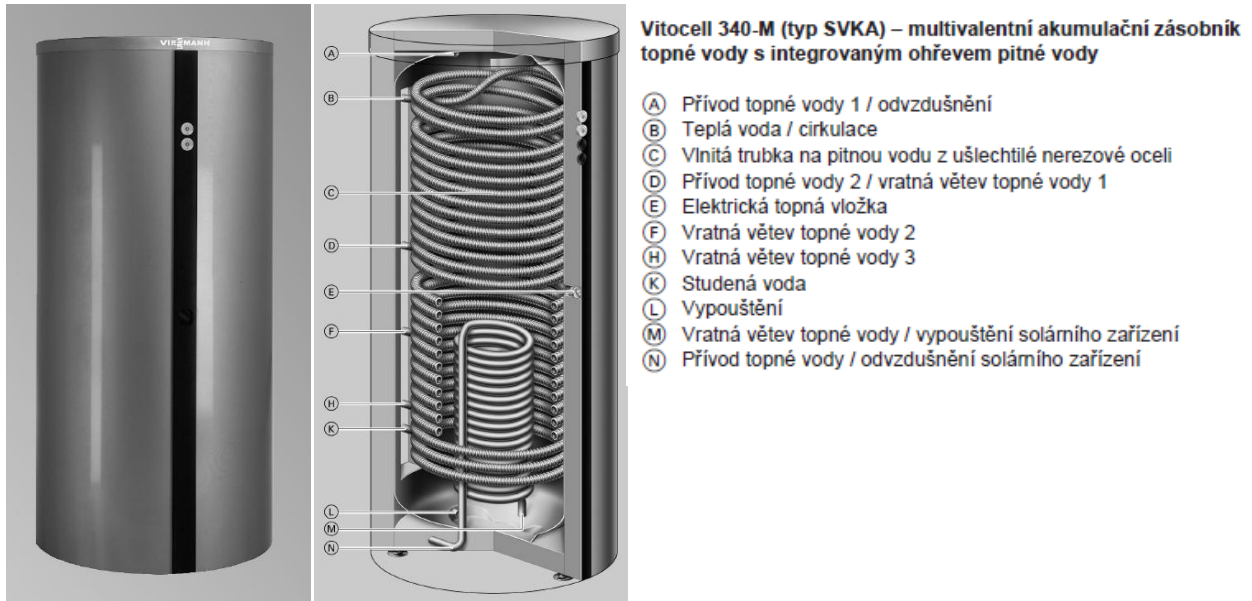
Kogenerační jednotka je spínána dle časového plánu a požadavku na teplo. Hlavním zdrojem tepla je Stirlingův motor s výkonem 3,6 až 5,7kW_t (v simulaci zvolena pevná hodnota výkonu 5,7kW_t). V případě, že požadavek tepla je vyšší, než je Stirlingův motor schopen dodat, dojde ke spuštění kondenzačního kotle s výkonem 4,8 až 20kW_t (v simulaci zvolena pevná hodnota výkonu 10kW_t). Celkový tepelný výkon kogenerační jednotky v simulaci činí 15,7kW_t.



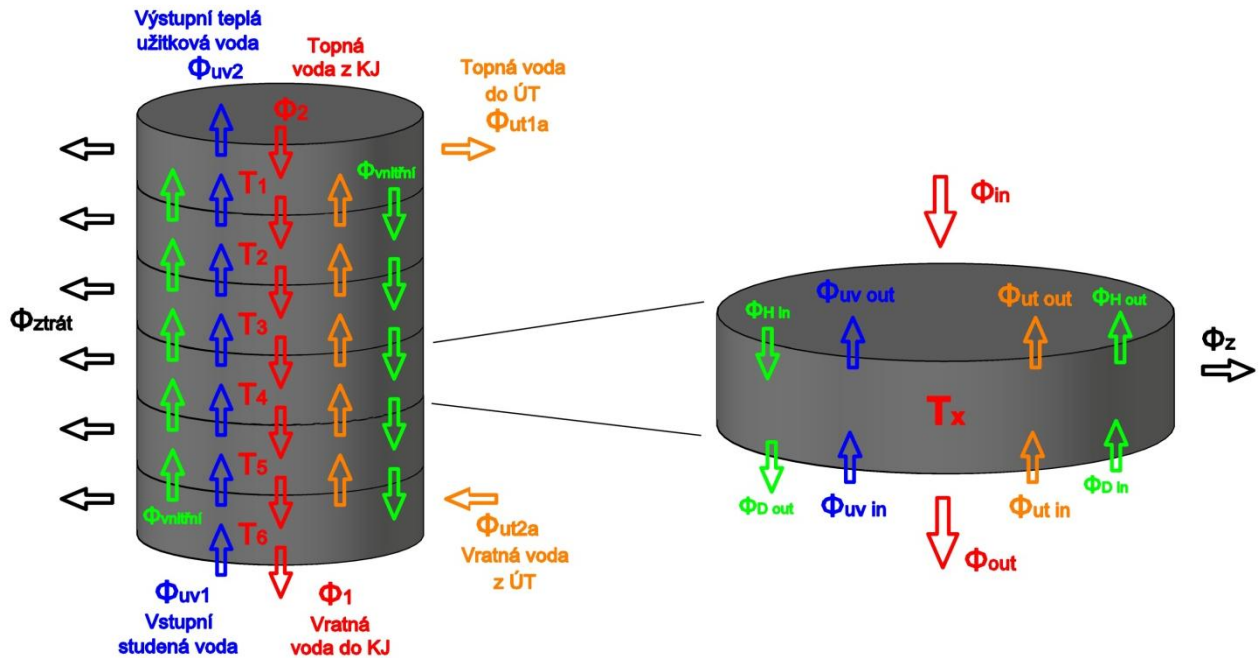
Obr. 5.4: Tepelný model kogenerační jednotky

5.2 Multivalentní akumulční zásobník

Funkce kombinovaného zásobníku spočívá jednak v akumulaci tepla v podobě topné vody, ale také pro ohřev teplé užitkové vody. Celkový objem zásobníku je 750 l, z čehož na topnou vodu připadá objem 708 l, na užitkovou vodu 30 l a objem solárního výměníku tepla je 12 l (v simulaci není uvažován). V akumulčním zásobníku není konstantní teplota v celém objemu, ale dochází zde k rozložení teplot, proto je zásobník rozdělen na 6 stejných elementů, každý o stejných rozměrech a objemu. Všechny tepelné toky v akumulčním zásobníku jsou znázorněny na Obr. 5.6.



Obr. 5.5: Multivalentní akumulční zásobník Vitocell 340-M [22]



Obr. 5.6: Tepelné toky v akumulčním zásobníku

Rovnice energetické bilance x-tého elementu akumulčního zásobníku (schéma Obr. 5.7):

$$\rho \cdot c \cdot V_{AN_x} \cdot \frac{dT_x}{dt} = \sum_i \Phi_i \quad 5.6$$

$$\sum_i \Phi_i = \Phi_{in} - \Phi_{out} + \Phi_{H_in} - \Phi_{H_out} + \Phi_{D_in} - \Phi_{D_out} + \Phi_{ut_in} - \Phi_{ut_out} - \Phi_{pt} - \Phi_z \quad 5.7$$

$$\Phi_{pt} = \Phi_{uv_out} - \Phi_{uv_in} \quad 5.8$$

Do každého elementu akumulční nádrže vstupuje tok Φ_{in} a vystupuje tok Φ_{out} , který je dán hmotnostním průtokem q_n vstupujícím do akumulční nádrže (AN), teplotou T_{x-1} (předchozího elementu AN) a teplotou T_x (daného elementu AN):

$$\Phi_{in}(t) = c \cdot q_n(t) \cdot T_{x-1}(t) \quad 5.9$$

$$\Phi_{out}(t) = c \cdot q_n(t) \cdot T_x(t) \quad 5.10$$

Toky Φ_{H_out} , Φ_{H_in} , Φ_{D_out} , Φ_{D_in} představují vnitřní tok v akumulční nádrži, který vzniká z důvodu mísení vody. Vnitřní průtok q_{an} je závislý především na velikosti průtoků v akumulční nádrži q_n a q_{ut_a} . Byla zvolena závislost vnitřního průtoku:

$$q_{an}(t) = 0,2 + 0,3 \cdot q_s(t) + q_{ut_a}(t) \quad 5.11$$

Kde q_{ut_a} je průtok mezi akumulční nádrží a ústředním topením.

Toky Φ_{H_out} , Φ_{H_in} jsou toky společné s daným elementem AN a horním (předchozím) elementem AN:

$$\Phi_{H_in}(t) = c \cdot q_{an}(t, q_n, q_{ut_a}) \cdot T_{x-1}(t) \quad 5.12$$

$$\Phi_{H_out}(t) = c \cdot q_{an}(t, q_n, q_{ut_a}) \cdot T_x(t) \quad 5.13$$

Toky Φ_{D_out} , Φ_{D_in} jsou toky společné s daným elementem AN a dolním (následujícím) elementem AN:

$$\Phi_{D_in}(t) = c \cdot q_{an}(t, q_n, q_{ut_a}) \cdot T_{x+1}(t) \quad 5.14$$

$$\Phi_{D_out}(t) = c \cdot q_{an}(t, q_n, q_{ut_a}) \cdot T_x(t) \quad 5.15$$

Tok tepelných ztrát Φ_z :

$$\Phi_z(t) = k_{an} \cdot S_{an} \cdot (T_x(t) - T_o) \quad 5.16$$

Toky Φ_{ut_out} , Φ_{ut_in} vznikají při zapnutí odběru tepla do ústředního topení:

$$\Phi_{ut_in}(t) = c \cdot q_{ut_a}(t) \cdot T_{x+1}(t) \quad 5.17$$

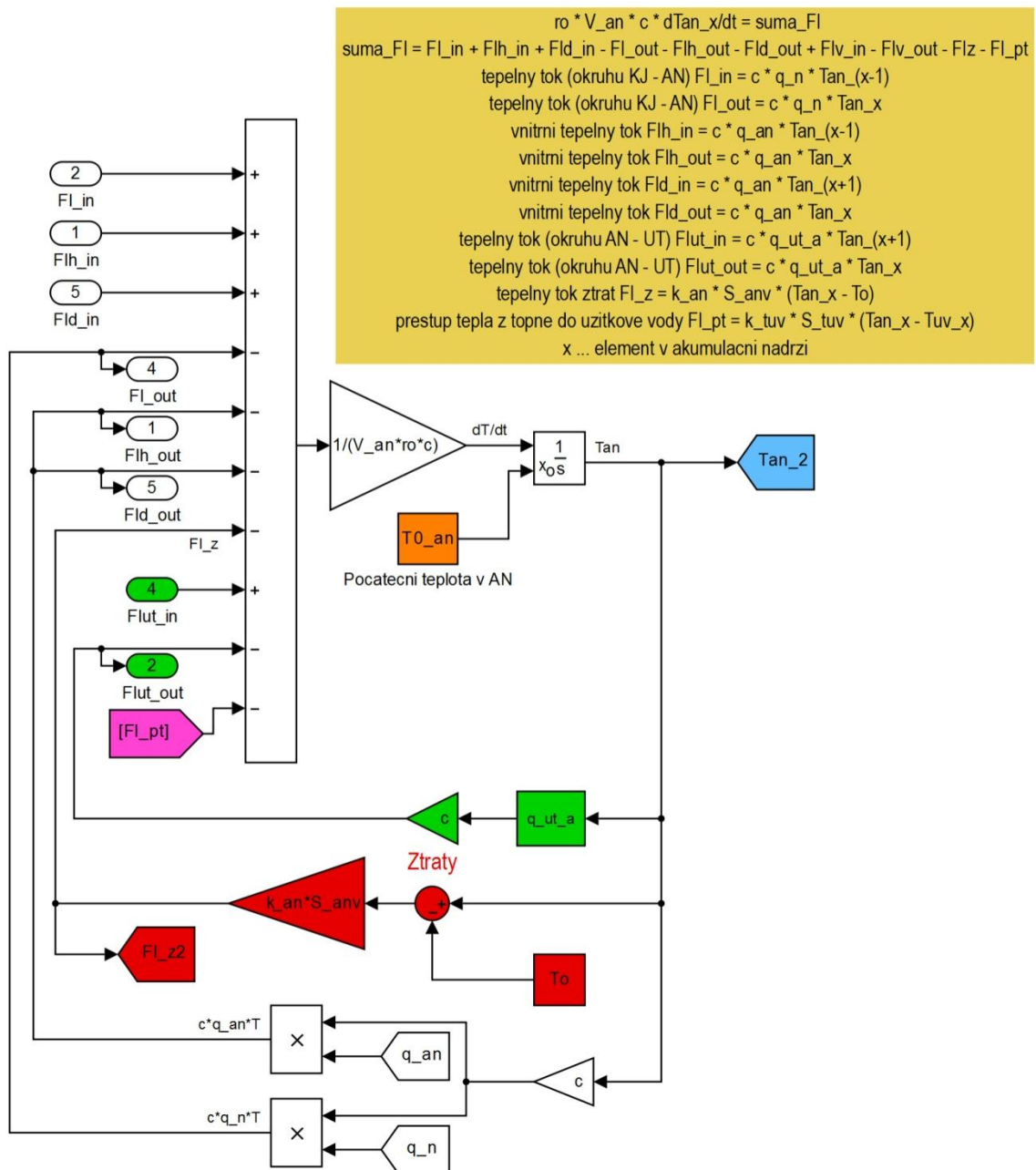
$$\Phi_{ut_out}(t) = c \cdot q_{ut_a}(t) \cdot T_x(t) \quad 5.18$$

Tepelný tok přestupu tepla z topné do užitkové vody Φ_{pt} :

$$\Phi_{pt}(t) = k_{tuv} \cdot S_{tuv} \cdot (T_x(t) - T_{uv_x}(t)) \quad 5.19$$

Do akumulární nádrže je odváděno teplo Φ_2 , které je rovno tepelnému toku z kogenerační jednotky. Z akumulární nádrže je odváděn tepelný tok Φ_1 do kogenerační jednotky. Velikost akumulovaného tepla určuje rozdíl toku přivedeného a odvedeného. Na akumulární nádrž je připojeno ústřední topení s tepelnými toky Φ_{ut_1a} a Φ_{ut_2a} , jehož bloky jsou ve schématu zvýrazněny zelenou barvou.

Akumulární nádrž dosahuje určitých tepelných ztrát, které zahrnuje tepelný tok Φ_z , ve schématu zvýrazněný červenou barvou. Ztráty jsou dány prostupem tepla. S_{an} je plocha elementu akumulární nádrže a k_{an} je součinitel prostupu tepla rovinou stěnou. Neuvažujeme tepelnou kapacitu stěny akumulární nádrže. Ztráty jsou závislé na teplotě vody v akumulární nádrži a na teplotě okolí. Teplota okolí byla zvolena 20°C a s časem se její hodnota nemění.



Obr. 5.7: Tepelný model elementu akumulární nádrže

Na akumulární nádrž je napojen přívod studené vody, který představuje tepelný tok Φ_{uv_1} . Studená voda proudí vlnitou trubkou v nádrži a je ohřívána přestupem tepla z topné vody. Tepelný tok Φ_{uv_2} představuje teplou užitkovou vodu na výstupu z akumulární nádrže. Model ohřevu užitkové vody je rozdělen na 6 elementů, stejně jako akumulární nádrž.

Rovnice energetické bilance x-tého elementu ohřevu TUV (schéma Obr. 5.8):

$$\rho \cdot c \cdot V_{tuv_x} \cdot \frac{dT_{uv_x}}{dt} = \Phi_{uv_in} - \Phi_{uv_out} + \Phi_{pt} \quad 5.20$$

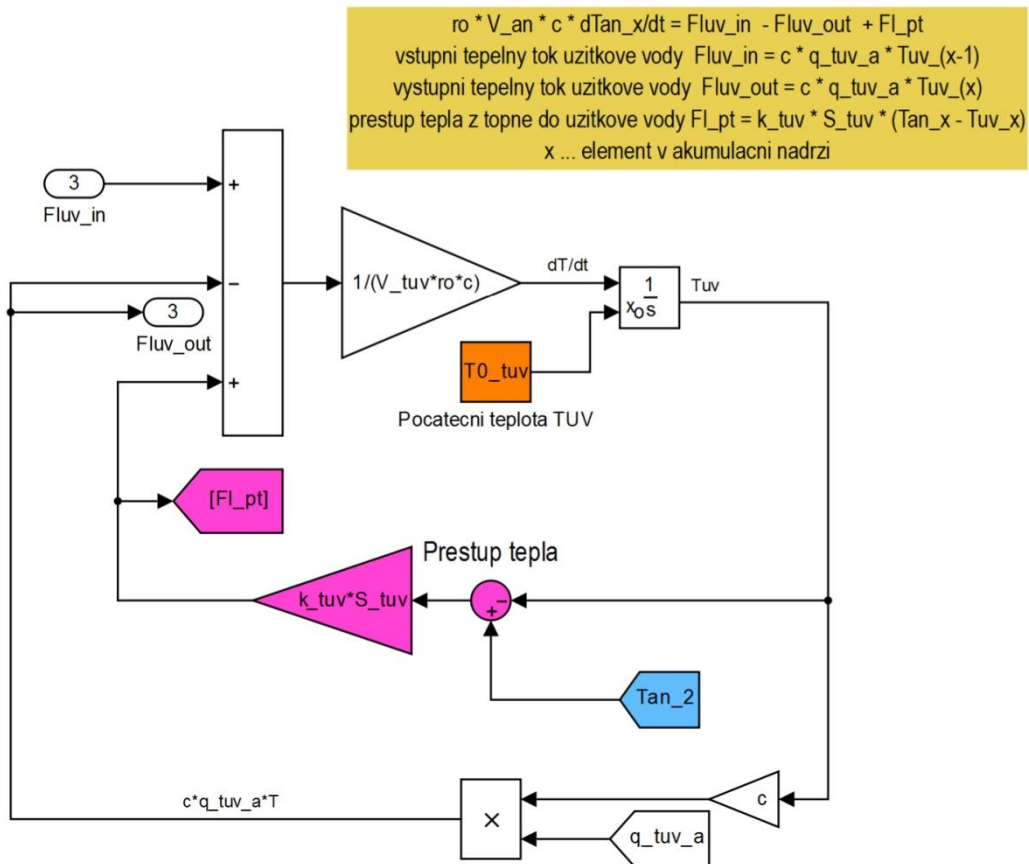
$$\Phi_{uv_in}(t) = c \cdot q_{tuv_a}(t) \cdot T_{uv_x-1}(t) \quad 5.21$$

$$\Phi_{uv_out}(t) = c \cdot q_{tuv_a}(t) \cdot T_{uv_x}(t) \quad 5.22$$

$$\Phi_{pt}(t) = k_{tuv} \cdot S_{tuv_x} \cdot (T_x(t) - T_{uv_x}(t)) \quad 5.23$$

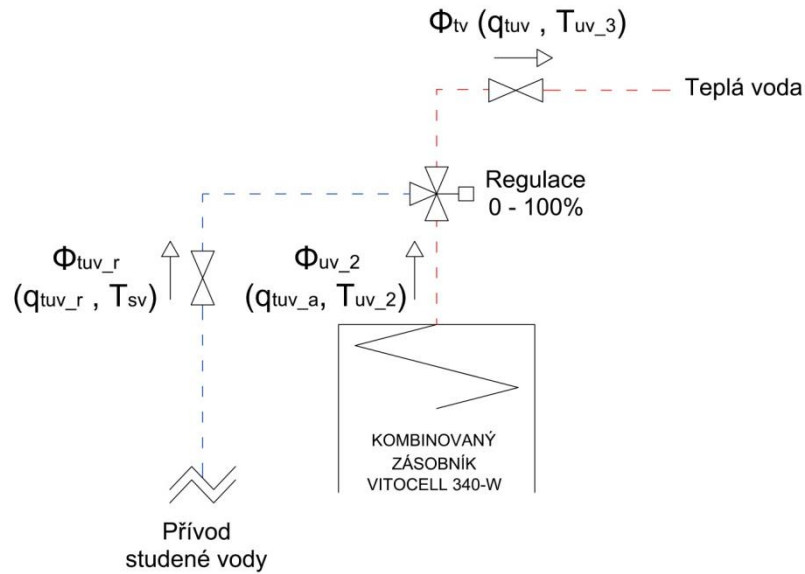
$$\Phi_{uv_out} = \Phi_{pt} + \Phi_{uv_in} \quad 5.24$$

Kde tok Φ_{pt} představuje přestup tepla z topné vody x-tého elementu akumulární nádrže do užitkové vody v x-tém elementu modelu ohřevu TUV. Přestup tepla závisí na rozdílu teplot topné a užitkové vody, součiniteli přestupu tepla k_{tuv} a na ploše ohřívání vlnité trubky užitkové vody S_{tuv} . Tepelné toky Φ_{uv_out} , Φ_{uv_in} představují tok užitkové vody mezi elementy ohřevu TUV, kde q_{tuv_a} je průtok užitkové vody v akumulární nádrži.



Obr. 5.8: Tepelný model elementu ohřevu TUV

Na výstupu je užitková voda směřována na požadovanou teplotu trojcestným směšovacím ventilem se servopohonem se spojitou regulací 0-10V. Tato teplota bude zajištěna změnou průtoků a mísením vody. Schéma tepelných toků v regulaci TUV je uvedeno na Obr. 5.9.



Obr. 5.9: Tepelné toky v regulaci TUV



Obr. 5.10: Trojcestný ventil Esbe řada VRG 131 [13] a servopohon Belimo HT 24-SR-T [14]

Rovnice energetické bilance má tvar (schéma modelu regulace je na Obr. 5.11):

$$\Phi_{tv} = \Phi_{uv_2} + \Phi_{uv_r} \quad 5.25$$

$$\Phi_{tv}(t) = c \cdot q_{tuv}(t) \cdot T_{tuv_{pož}}(t) \quad 5.26$$

$$\Phi_{uv_r}(t) = c \cdot q_{tuv_r}(t) \cdot T_{sv} \quad 5.27$$

$$\Phi_{uv_2}(t) = c \cdot q_{tuv_a}(t) \cdot T_{uv_2}(t) \quad 5.28$$

$$q_{tuv} = q_{tuv_a} + q_{tuv_r} \quad 5.29$$

$$q_{tuv_r}(t) = k \cdot q_{tuv}(t) \quad 5.30$$

$$q_{tuv_a}(t) = (1 - k) \cdot q_{tuv}(t) \quad 5.31$$

$$q_{tuv}(t) \cdot T_{tuv_{pož}} = (1 - k) \cdot q_{tuv}(t) \cdot T_{uv_2} + k \cdot q_{tuv}(t) \cdot T_{sv} \quad 5.32$$

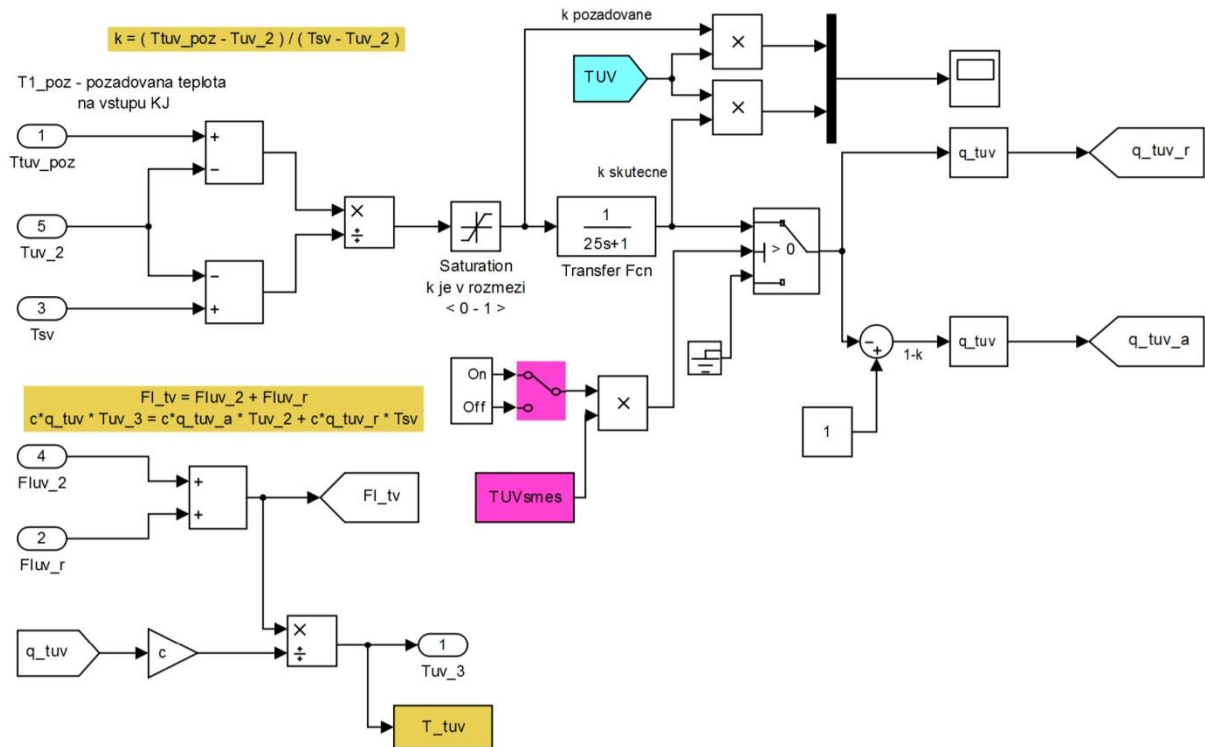
$$k = \frac{T_{tuv_{pož}} - T_{uv_2}}{T_{sv} - T_{uv_2}} \quad 5.33$$

Kde Φ_{tuv_r} je tepelný tok studené vody vstupující do regulace, Φ_{uv_2} je tepelný tok teplé užitkové vody vstupující do regulace z akumulární nádrže, Φ_{tv} je výstupní tepelný tok směšované

teplé vody. T_{tuv_poz} je požadovaná teplota teplé užitkové vody na výstupu z regulace a byla zvolena hodnota 55°C.

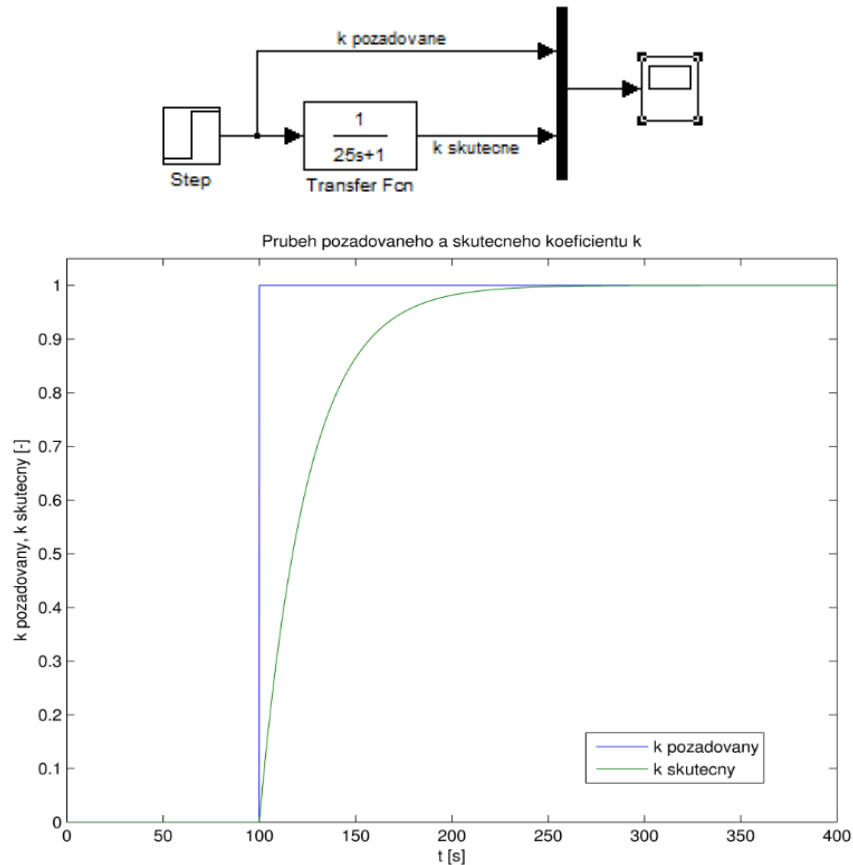
Koeficient k nabývá hodnot v rozmezí 0-1, jeho velikost je závislá na teplotě vstupující vody z akumulární nádrže. Velikost koeficientu k udává úhel otevření směšovacího ventilu. Čím vyšší bude hodnota koeficientu k , tím vyšší bude průtok studené vody do regulace a nižší průtok teplé užitkové vody z akumulární nádrže.

Regulace TUV (0-100%)



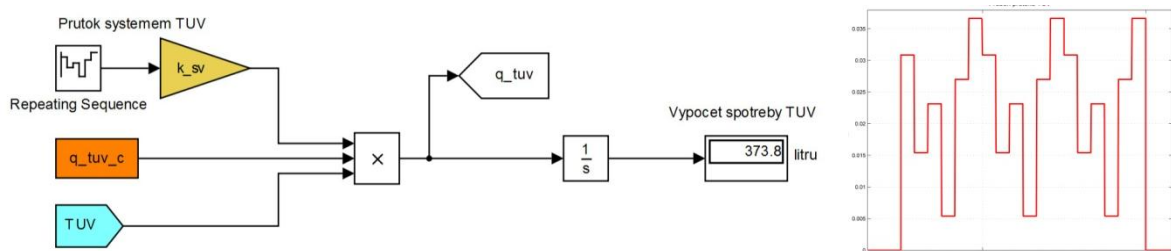
Obr. 5.11: Tepelný model regulace TUV

Reálný regulační ventil se servopohonem má určité zpoždění, než zareaguje a vyrovná změnu teploty. V případě použití servopohonu firmy Belimo HT 24-SR-T je udávána doba přestavení 140s. Blok přenosové funkce Transfer Fcn zajišťuje zpoždění regulace, které je možno nastavit velikostí časové konstanty přenosové funkce. Odezva přenosové funkce na přivedený jednotkový skok je znázorněna na Obr. 5.12.



Obr. 5.12: Odezva směšovacího ventilu na jednotkový skok

Odběr teplé užitkové vody je charakterizován průtokem q_{tuv} , který je v čase proměnný. Jeho tepelný model je na Obr. 5.13. Vstupní hodnota bloku q_{tuv_c} udává maximální průtok TUV. Blok Repeating sequence udává náhodný charakter průtoku odběru TUV a koeficientem k_{sv} je průtok TUV optimalizován, tak aby výsledný odběr tepla ve formě TUV odpovídal zadaným hodnotám potřeby tepla rodinného domu na ohřev TUV.

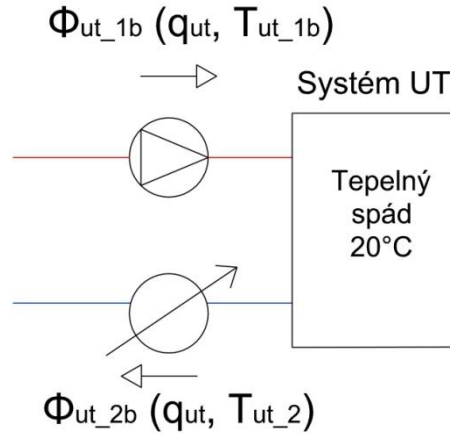


Obr. 5.13: Tepelný model průtoku TUV a detail průběhu průtoku TUV

5.3 Ústřední topení

Zjednodušující předpoklady:

- Při zapínání a vypínání ústředního topení dochází ke skokové změně výkonu.



Obr. 5.14: Tepelné toky v systému ÚT

Tepelné toky ústředním topením jsou znázorněny na Obr. 5.14, kde Φ_{ut_1b} je tepelný tok vstupující do ÚT, Φ_{ut_2b} je tepelný tok vystupující z ÚT a Φ_{ut_p} představuje tepelný tok přestupu tepla z ÚT do okolí (vnitřní místnosti). Teplota T_{ut_1b} je vstupní teplota topné vody do systému ÚT. Teplota vratné vody T_{ut_2} je vypočítávána podle velikosti přestupu tepla. T_p je pokojová teplota, která je nastavena na 22°C.

Součinitel k_{ut} představuje součin součinitele přestupu tepla a teplosměnné plochy radiátorů. Součinitel k_{ut} je optimalizován, tak aby výsledný odběr tepla v systému ÚT odpovídal zadaným hodnotám potřeby tepla rodinného domu na vytápění.

Vztahy jednotlivých toků v ústředním topení jsou:

$$\Phi_{ut_1b}(t) = c \cdot q_{ut}(t) \cdot T_{ut_1b}(t) \quad 5.34$$

$$\Phi_{ut_2b}(t) = c \cdot q_{ut}(t) \cdot T_{ut_2}(t) \quad 5.35$$

$$\Phi_{ut_p}(t) = k_{ut} \cdot (T_{ut_1b}(t) - T_p) \quad 5.36$$

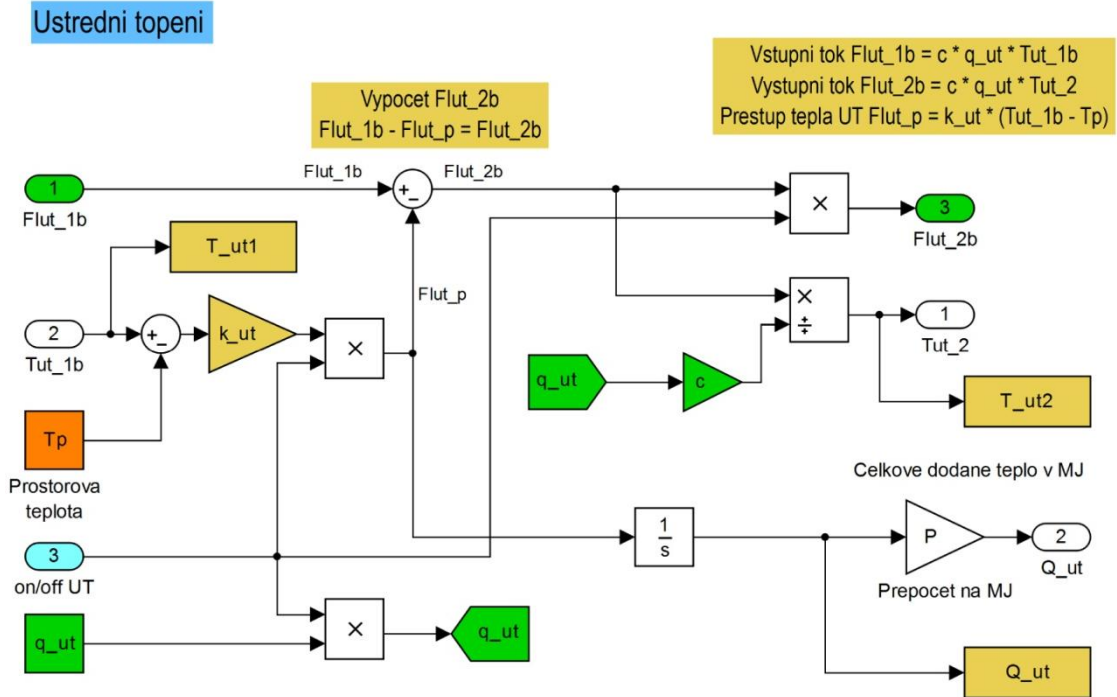
Výpočet výstupního toku z ÚT:

$$\Phi_{ut_1b}(t) - \Phi_{ut_p}(t) = \Phi_{ut_2b}(t) \quad 5.37$$

Celkové teplo odvedené do systému ÚT je dáno integrací tepelného toku Φ_{ut_p} za jednotku času podle vztahu:

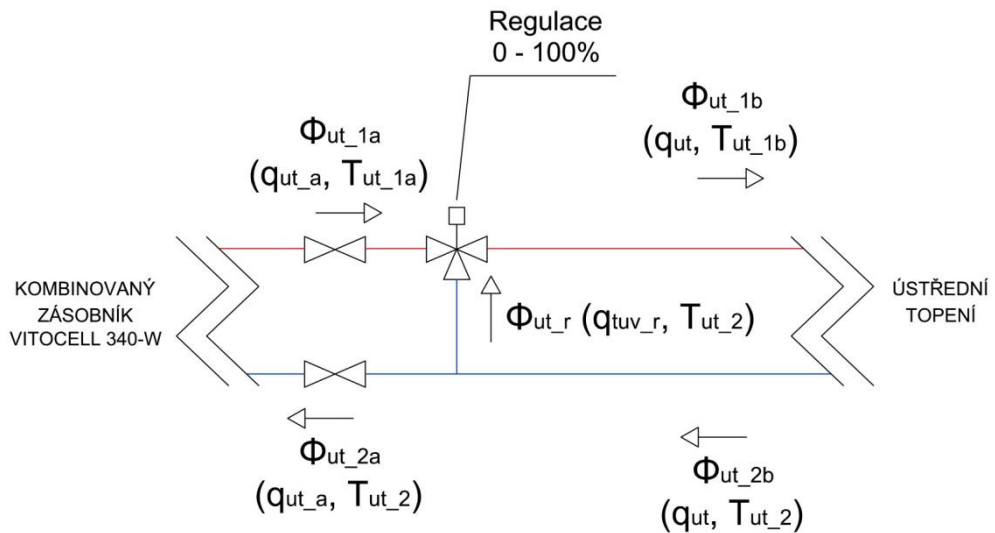
$$Q_{ut} = \int_0^t \Phi_{ut_p}(t) dt \quad 5.38$$

Na Obr. 5.15 je schéma tepelného modelu ústředního topení, průtok ústředním topením q_{ut} je nastavený na hodnotu 0,2 kg/s. Průtok ÚT je zapínám dle časového plánu a jeho velikost je konstantní.



Obr. 5.15: Tepelný model ústředního topení

Na vstupu ústředního topení je topná voda směřována na požadovanou teplotu trojcestným směšovací ventilem se servopohonem se spojitou regulací 0-10V (viz. Obr. 5.10). Tato teplota bude zajištěna změnou průtoků a mísením vody. Schéma tepelných toků v regulaci ÚT je uvedeno na Obr. 5.16.



Obr. 5.16: Tepelné toky v regulaci ÚT

Rovnice energetické bilance má tvar (schéma modelu regulace je na Obr. 5.17):

$$\Phi_{ut_1b} = \Phi_{ut_1a} + \Phi_{ut_r} \quad 5.39$$

$$\Phi_{ut_1b}(t) = c \cdot q_{ut}(t) \cdot T_{ut_pož}(t) \quad 5.40$$

$$\Phi_{ut_r}(t) = c \cdot q_{ut_r}(t) \cdot T_{ut_2}(t) \quad 5.41$$

$$\Phi_{ut_1a}(t) = c \cdot q_{ut_a}(t) \cdot T_{ut_1a}(t) \quad 5.42$$

$$q_{ut} = q_{ut_a} + q_{ut_r} \quad 5.43$$

$$q_{ut_r}(t) = k \cdot q_{ut}(t) \quad 5.44$$

$$q_{ut_a}(t) = (1 - k) \cdot q_{ut}(t) \quad 5.45$$

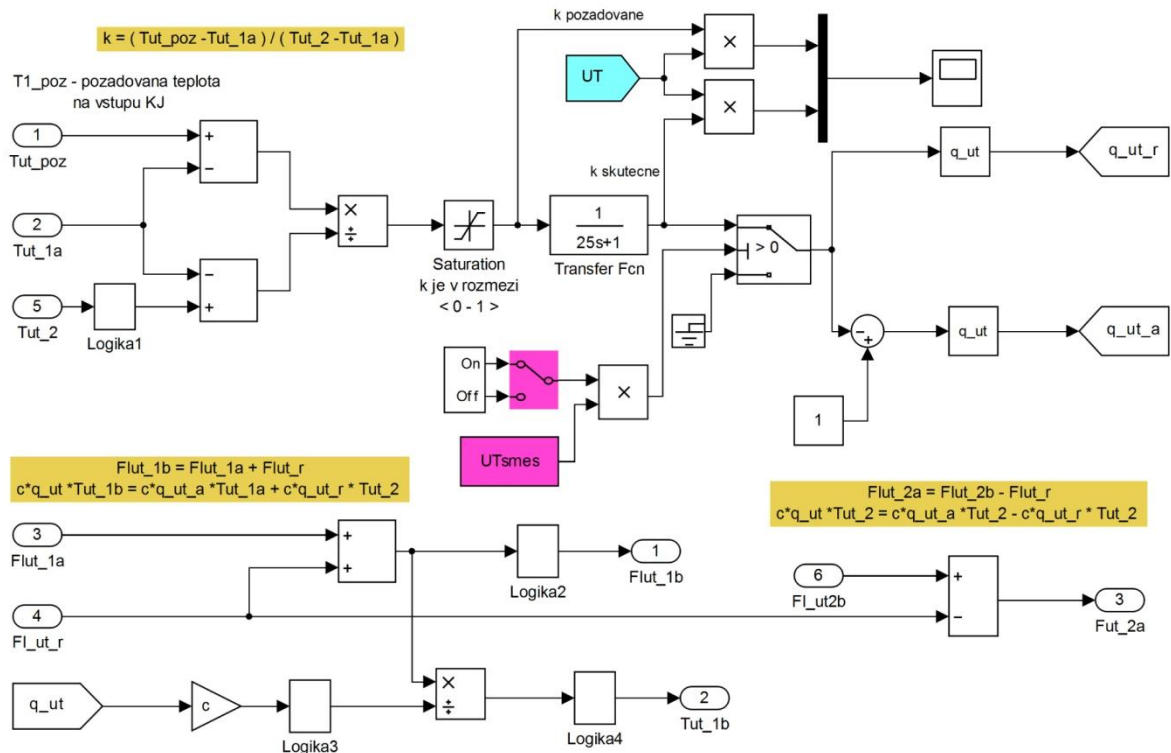
$$q_{ut}(t) \cdot T_{ut_pož} = (1 - k) \cdot q_{ut}(t) \cdot T_{ut_1a} + k \cdot q_{ut}(t) \cdot T_{ut_2}(t) \quad 5.46$$

$$k = \frac{T_{ut_pož} - T_{ut_1a}}{T_{ut_2} - T_{ut_1a}} \quad 5.47$$

Kde Φ_{ut_r} je tepelný tok studené vody vstupující do regulace, Φ_{ut_1a} je tepelný tok topné vody vstupující do regulace z akumulární nádrže, Φ_{ut_1b} je výstupní tepelný tok směšované topné vody do systému ÚT. $T_{ut_pož}$ je požadovaná teplota topné vody na výstupu z regulace a byla zvolena hodnota 55°C.

Koeficient k nabývá hodnot v rozmezí 0-1, jeho velikost je závislá na teplotě vstupující vody z akumulární nádrže. Velikost koeficientu k udává úhel otevření směšovacího ventilu. Čím vyšší bude hodnota koeficientu k , tím vyšší bude průtok vratné vody do regulace a nižší průtok topné vody z akumulární nádrže.

Regulace UT (0-100%)



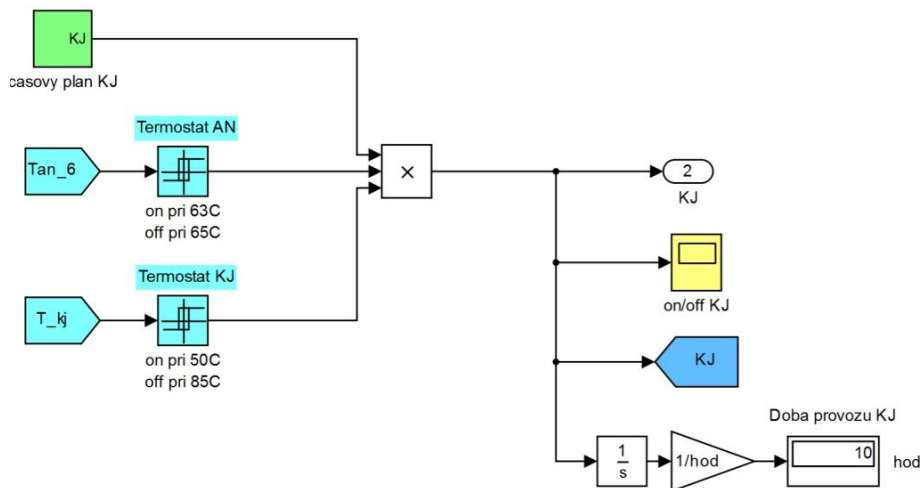
Obr. 5.17: Tepelný model regulace ÚT

5.4 Řízení kogenerační jednotky

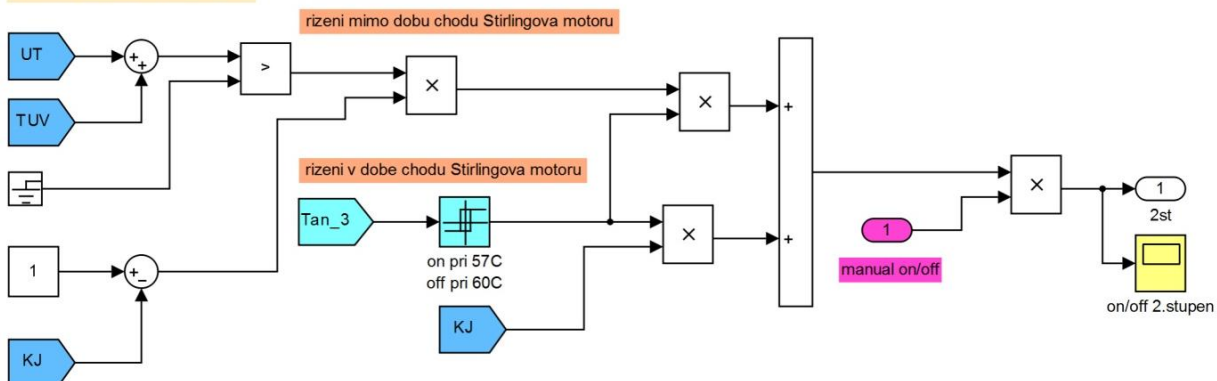
Spouštění kogenerační jednotky zajišťuje řídicí jednotka (viz. Obr. 5.18).

Ridici jednotka

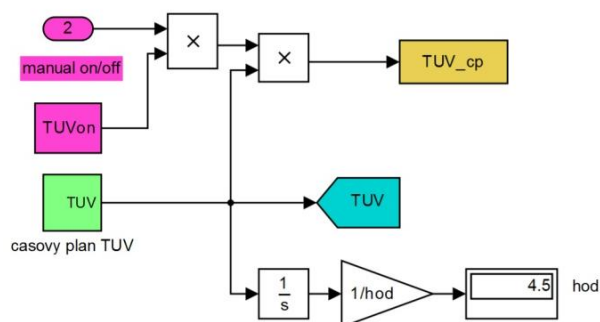
Rizeni chodu Stirlingova motoru



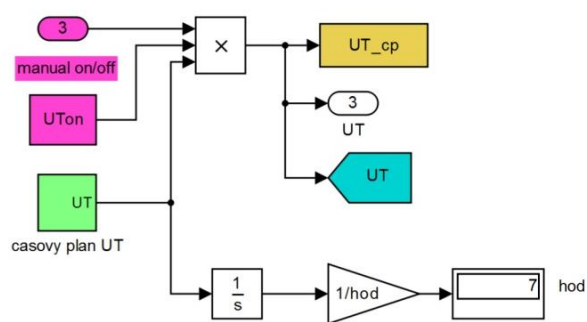
Rizeni chodu kondenzacniho kotle



spousteni systemu TUV



spousteni systemu UT



Obr. 5.18: Schéma modelu řídicí jednotky KJ Vitotwin 300-W

Spouštění kogenerační jednotky je provedeno podle nastavených časových plánů (odběru TUV a vytápění) a dále bude omezeno následujícími parametry:

- Teplotou výstupní vody z kogenerační jednotky (havarijní termostat), kdy v případě zvýšení teploty nad 85°C dojde k odstavení KJ. K opětovnému spuštění KJ dojde, když teplota poklesne pod 50°C.
- Teplotou vody v akumulární nádrži, kdy v případě dosažení teploty 65°C dojde k odstavení KJ. K opětovnému spuštění KJ dojde, když teplota v akumulární nádrži poklesne pod 63°C.
- Spínání druhého stupně (kondenzačního kotle) kogenerační jednotky je provedeno v případě, kdy teplota vody v akumulární nádrži poklesne pod 57°C. K vypnutí druhého stupně KJ dojde, když teplota v akumulární nádrži stoupne nad 60°C. Kondenzační kotel je spouštěn především v případě, že tepelný výkon Stirlingova motoru nestačí na pokrytí potřeby tepla.

Pro účel simulace letního a zimního provozu KJ lze jednotlivé systémy (ústřední topení a odběr TUV) v simulačním modelu spínat manuálně.

5.5 Hospodárnost kogenerace

Cílem této kapitoly bude stanovení úspor nákladů na energie s kogenerační jednotkou Vitotwin 300-W. Postup stanovení úspor bude uveden výpočtem na příkladu rodinného domku se stávajícím kotlem (parametry viz. Tab. 5.2) a se spotřebou energií uvedenými v Tab. 5.3.

Tab. 5.2: Parametry stávajícího kotle instalovaného v rodinném domě

Technické parametry stávajícího kotle		
Tepelný výkon	[kW _t]	12 - 24
Účinnost	[%]	80

Tab. 5.3: Spotřeba energií za rok v rodinném domě

Energetická zátěž rodinného domu		
Spotřeba plynu	[m ³ /r]	3000
	[kWh/r]	31650
Potřeba tepla pro RD (η kotle)	[kWh]	25320
Spotřeba elektřiny	[kWh]	4000

Spotřebu plynu rodinného plynu na ohřev TUV a vytápění v m³ můžeme přepočítat na kWh pomocí spalného tepla zemního plynu. Spalné teplo H představuje množství energie uložené v jednotkovém množství paliva a ve výpočtu je uvažováno 10,55 kWh/m³.

$$\text{Spotřeba plynu}_{kWh} = \text{Spotřeba plynu}_{m^3} \cdot H = 3000 \cdot 10,55 = 31650 kWh \quad 5.48$$

Z účinnosti stávajícího kotle lze přibližně podle následujícího vztahu určit skutečnou potřebu tepla na ohřev TUV a vytápění:

$$\begin{aligned} \text{Potřeba tepla pro RD} &= \text{Spotřeba plynu}_{kWh} \cdot \eta_{\text{stáv.kotle}} = 31650 \cdot 0,8 = \\ &= 25320 kWh \end{aligned} \quad 5.49$$

V Tab. 5.4 jsou uvedeny parametry kogenerační jednotky, které jsou vstupními parametry pro výpočet úspor energií a v Tab. 5.5 jsou uvedeny nákupní ceny plynu a elektrické energie dle údajů z účtu rodinného domu. Smluvená tržní cena elektrické energie představuje předpokládanou cenu za dodanou elektrickou energii do distribuční sítě.

Tab. 5.4: Vstupní parametry kogenerační jednotky pro výpočet úspor energií

Technické parametry KJ			
Elektrický výkon		[kW _e]	1
Účinnost	Stirlingův motor	[%]	96
	Kondenzační kotel	[%]	98
Tepelný výkon	Stirlingův motor	[kW _t]	3,6 - 5,7
	Kondenzační kotel	[kW _t]	4,8 - 20
Náklady	pořizovací	[Kč]	300000
	na údržbu	[Kč/rok]	1000
Provozní hodiny za rok		[h/rok]	2877

Tab. 5.5: Předpokládané ceny energií

Ceny energií		
Nákupní cena elektrické energie	[Kč/kWh]	4,446
Smluvená tržní cena ele. energie	[Kč/kWh]	0,640
Nákupní cena zemního plynu	[Kč/m ³]	15,280
	[Kč/kWh]	1,448

V Tab. 5.6 je uvedena podpora ve formě zeleného bonusu stanovená Energetickým regulačním úřadem ERÚ pro rok 2013.

Tab. 5.6: Zelený bonus [16]

Zelený bonus			
Podpora dle cenového rozhodnutí 4/2012 Kombinovaná výroba elektřiny a tepla s výjimkou výroby využívající obnovitelné zdroje nebo degazační a důlní plyn Instalovaný výkon výroby 0-200kW (sloupec 700-702)			
Zelený bonus - provozní hodiny	3000 h/rok	[Kč/kWh]	2,010
	4400 h/rok	[Kč/kWh]	1,540
	8400 h/rok	[Kč/kWh]	0,670

Z elektrického výkonu Stirlingova motoru a provozních hodin za rok lze určit celková elektrická energie vyrobená za rok kogenerační jednotkou:

$$E_{vyrobená} = P_{e \text{ Stirl.motor}} \cdot t_{prov.hodiny/rok} = 1 \cdot 2877 = 2877kWh/rok \quad 5.50$$

Rozdíl uvedené spotřeby elektrické energie a vyrobené elektrické energie kogenerační jednotkou za rok určí zbývající potřebu elektrické energie, kterou je potřeba nakoupit z distribuční sítě (DS):

$$E_{nákup \text{ z DS}} = Spotřeba E_{RD} - E_{vyrobená} = 4000 - 2877 = 1123kWh/rok \quad 5.51$$

Z následujícího vztahu vychází množství vyrobeného teplo při provozu Stirlingova motoru:

$$Q_{Stirl.motor} = P_{t \text{ Stirl.motor}} \cdot t_{prov.hodiny/rok} \cdot \eta_{Stirl.motor} = 5,7 \cdot 2877 \cdot 0,96 = 15742kWh/rok \quad 5.52$$

V tomto případě Stirlingův motor nedodá tolik množství tepla, aby byla pokryta veškerá potřeba tepla rodinného domu. Kondenzační kotel dodá zbývající teplo, jehož množství je určeno vztahem:

$$Q_{kond.kotel} = spotřeba Q_{RD} - Q_{Stirl.motor} = 25320 - 15742 = 9577kWh/rok \quad 5.53$$

Z množství vyrobeného tepla lze podle následujících vztahů určit spotřeba paliva kogenerační jednotky:

$$Spotřeba \text{ plynu}_{Stirl.motor} = t_{prov.hodiny/rok} \cdot (P_{e \text{ Stirl.motor}} + P_{t \text{ Stirl.motor}}) / \eta_{Stirl.motor} = 2877 \cdot (1 + 5,7) / 0,96 = 20079kWh/rok = 1903m^3/rok \quad 5.54$$

$$Spotřeba \text{ plynu}_{kond.kotel} = \frac{Q_{kond.kotel}}{\eta_{kond.kotel}} = \frac{9577}{0,98} = 9773kWh/rok = 926m^3/rok \quad 5.55$$

$$Spotřeba \text{ plynu}_{celkem} = Spotřeba \text{ plynu}_{Stirl.motor} + Spotřeba \text{ plynu}_{kond.kotel} = 1903 + 926 = 2829m^3/rok \quad 5.56$$

Tab. 5.7: Roční bilance výroby a spotřeba paliva kogenerační jednotky

Roční bilance výroby KJ			
Elektřina	vyrobená	[kWh]	2877,00
	nákup z DS	[kWh]	1123,00
Tepelná energie	Stirlingův motor	[kWh]	15742,94
		[GJ]	56,67
	Kondenzační kotel	[kWh]	9577,06
		[GJ]	34,48
	Celkem	[kWh]	25320,00
		[GJ]	91,15
Spotřeba plynu	Stirlingův motor	[kWh]	20079
		[m ³]	1903
	Kondenzační kotel	[kWh]	9773
		[m ³]	926
	Celkem KJ	[kWh]	29851,57
		[m ³]	2829,53

Roční náklady na energie (plyn a elektrickou energii) viz. Tab. 5.8 jsou určeny následujícími vztahy:

$$\begin{aligned} \text{Náklady}_{\text{plyn stáv.kotel}} &= \text{Spotřeba plynu}_{\text{m}^3} \cdot \text{Cena}_{\text{plynu K}\text{č}/\text{m}^3} = \\ &= 3000 \cdot 15,28 = 45840 \text{K}\text{č}/\text{rok} \end{aligned} \quad 5.57$$

$$\begin{aligned} \text{Náklady}_{\text{ele. stáv.kotel}} &= \text{Spotřeba } E_{\text{RD}} \cdot \text{Cena}_{\text{ele. K}\text{č}/\text{kWh}} = 4000 \cdot 4,446 = \\ &= 17784 \text{K}\text{č}/\text{rok} \end{aligned} \quad 5.58$$

$$\begin{aligned} \text{Náklady}_{\text{celk. stáv.kotel}} &= \text{Náklady}_{\text{plyn stáv.kotel}} - \text{Náklady}_{\text{ele. stáv.kotel}} = \\ &= 45840 + 17784 = 63624 \text{K}\text{č}/\text{rok} \end{aligned} \quad 5.59$$

Tab. 5.8: Náklady na energie RD se stávajícím kotlem

Ekonomika provozu stávajícího kotle		
Náklady na plyn	[Kč/r]	45840,00
Náklady na elektřinu	[Kč/r]	17784,00
Celkové náklady	[Kč/r]	63624,00

Výpočet nákladů na energie rodinného domu s kogenerační jednotkou bude proveden pro tři různé scénáře. Scénáře se budou lišit v procentuálním využití vyrobené energie ze Stirlingova motoru v domácnosti (100%, 90%, 80% využití). V Tab. 5.9 jsou uvedeny náklady za energie pro zvolené scénáře a níže bude uveden příklad výpočtu pro scénář 2, kdy je 90% vyrobené elektrické energie využito v domácnosti a 10% vyrobené energie prodáno do distribuční sítě. V každém okamžiku nemusí odpovídat elektrický výkon Stirlingova motoru příkonu spotřebičů v rodinném domě. V případě vyššího výkonu Stirlingova motoru než-li příkonu spotřebičů v rodinném domě dochází k dodávce přebytku elektrické energie do distribuční sítě.

Celkové náklady za plyn, který spotřebuje kogenerační jednotka:

$$\begin{aligned} \text{Náklady}_{\text{plyn } KJ} &= \text{Spotřeba plynu}_{KJ} \cdot \text{Cena}_{\text{plynu } K\check{c}/m^3} = 2829 \cdot 15,28 = & 5.60 \\ &= 43235 K\check{c}/rok \end{aligned}$$

Náklady na nákup elektřiny z distribuční sítě, kterou nedodá kogenerační jednotka:

$$\begin{aligned} \text{Náklady}_{\text{ele. z DS}} &= E_{\text{nákup z DS}} \cdot \text{Cena}_{\text{ele. } K\check{c}/kWh} = 1123 \cdot 4,446 = & 5.61 \\ &= 4992 K\check{c}/rok \end{aligned}$$

Zelený bonus za vyrobenou elektrickou energii:

$$\begin{aligned} \text{Zelený bonus} &= E_{\text{vyrobená}} \cdot \text{Podpora } ZB_{K\check{c}/kWh} = 2877 \cdot 2,01 = & 5.62 \\ &= 5782 K\check{c}/rok \end{aligned}$$

Množství využití elektrické energie v domácnosti (90%):

$$E_{\text{využitá v RD}} = E_{\text{vyrobená}} \cdot 0,9 = 2877 \cdot 0,9 = 2589,3 kWh/rok \quad 5.63$$

Množství přebytku elektrické energie dodaného do distribuční sítě (10%):

$$E_{\text{přebytek do DS}} = E_{\text{vyrobená}} \cdot 0,1 = 2877 \cdot 0,1 = 287,7 kWh/rok \quad 5.64$$

Příjem za prodej přebytku elektrické energie do distribuční sítě:

$$\begin{aligned} \text{Příjem}_{\text{přebytek E do DS}} &= E_{\text{přebytek do DS}} \cdot \text{Smluvní cena}_{\text{ele. } K\check{c}/kWh} = & 5.65 \\ &= 287,7 \cdot 0,64 = 184 K\check{c}/rok \end{aligned}$$

Množství elektrické energie odpovídající přebytku vyrobené energie dodaného do distribuční sítě, které nebylo využito v domácnosti je potřeba zpětně dodat z DS např. v jiném okamžiku, kdy potřeba elektrické energie neodpovídá výrobě elektrické energie kogenerační jednotkou. Náklady za nákup zbývajících elektrické energie:

$$\begin{aligned} \text{Náklady}_{\text{zbýv. ele. z DS}} &= E_{\text{přebytek do DS}} \cdot \text{Cena}_{\text{ele. } K\check{c}/1kWh} = 287,7 \cdot 4,446 = & 5.66 \\ &= 1279 K\check{c}/rok \end{aligned}$$

Celkové náklady za elektřinu:

$$\begin{aligned} \text{Náklady}_{\text{celkem ele. KJ}} &= \text{Náklady}_{\text{ele. z DS}} - \text{Zelený bonus} - \\ &- \text{Příjem}_{\text{přebytek E do DS}} + \text{Náklady}_{\text{zbýv. ele. z DS}} = \\ &= 4992 - 5782 - 184 + 1279 = 305 \text{ Kč/rok} \end{aligned} \quad 5.67$$

Celkové náklady za energie:

$$\begin{aligned} \text{Náklady}_{\text{celkem energie}} &= \text{Náklady}_{\text{plyn KJ}} - \text{Náklady}_{\text{celkem ele. KJ}} = \\ &= 43235 + 305 = 43540 \text{ Kč/rok} \end{aligned} \quad 5.68$$

Tab. 5.9: Náklady na energie RD s kogenerační jednotkou

Ekonomika provozu KJ				
Náklady na plyn	[Kč/r]	43235,26	43235,26	43235,26
Náklady na nákup elektřiny	[Kč/r]	4992,86	4992,86	4992,86
		Scénář 1	Scénář 2	Scénář 3
Využití vyrobené elektřiny v domácnosti	[%]	100	90	80
	[kWh]	2877,00	2589,30	2301,60
Prodej vyrobené elektřiny do DS	[%]	0	10	20
	[kWh]	0,00	287,70	575,40
Zelený bonus za vyrobenou elektřinu	[Kč/r]	5782,77	5782,77	5782,77
Prodej přebytku elektřiny do DS	[Kč/r]	0,00	184,13	368,26
Nákup zbývající elektřiny z DS	[Kč/r]	0,00	1279,11	2558,23
Celkové náklady na elektřinu	[Kč/r]	-789,91	305,07	1400,06
Celkové náklady	[Kč/r]	43445,35	44540,33	45635,32

Úspory nákladů za energie jsou pro všechny tři scénáře uvedeny v Tab. 5.10. Níže je uveden výpočet úspory nákladů za energie rodinného domu s kogenerační jednotkou pro scénář 2, kdy je 90% vyrobené elektrické energie využito v domácnosti a 10% vyrobené energie prodáno do distribuční sítě.

$$\begin{aligned} \text{Úspora}_{\text{plyn}} &= \text{Náklady}_{\text{plyn stáv.kotel}} - \text{Náklady}_{\text{plyn KJ}} = 45840 - 43235 = \\ &= 2605 \text{ Kč/rok} \end{aligned} \quad 5.69$$

$$\begin{aligned} \text{Úspora}_{\text{ele}} &= \text{Náklady}_{\text{ele. stáv.kotel}} - \text{Náklady}_{\text{celkem ele. KJ}} = 17784 - 305 = \\ &= 17479 \text{ Kč/rok} \end{aligned} \quad 5.70$$

$$\begin{aligned}
 \text{Úspora}_{\text{celkem}} &= \text{Úspora}_{\text{plyn}} + \text{Úspora}_{\text{ele}} - \text{Náklady}_{\text{údržbu}} = \\
 &= 2605 + 17479 - 1000 = \underline{\underline{19084 \text{ Kč/rok}}}
 \end{aligned}
 \tag{5.71}$$

Tab. 5.10: Úspora nákladů na energie RD s kogenerační jednotkou

Scénář 1	Úspora v případě - 100% využití elektřiny v domácnosti - 0% prodej vyrobené elektřiny do DS		
	Úspora za plyn	[Kč/r]	2604,74
	Úspora za elektřinu	[Kč/r]	18573,91
	Celková úspora*	[Kč/r]	20178,65

Scénář 2	Úspora v případě - 90% využití elektřiny v domácnosti - 10% prodej vyrobené elektřiny do DS		
	Úspora za plyn	[Kč/r]	2604,74
	Úspora za elektřinu	[Kč/r]	17478,93
	Celková úspora*	[Kč/r]	19083,67

Scénář 3	Úspora v případě - 80% využití elektřiny v domácnosti - 20% prodej vyrobené elektřiny do DS		
	Úspora za plyn	[Kč/r]	2604,74
	Úspora za elektřinu	[Kč/r]	16383,94
	Celková úspora*	[Kč/r]	17988,68

* včetně nákladů na údržbu

5.6 Grafické uživatelské rozhraní

Cílem této kapitoly bude popis prvků grafického uživatelského rozhraní v Matlab GUI a postup spouštění simulací ve vytvořeném grafickém uživatelském rozhraní.

5.6.1 Popis grafického uživatelského rozhraní

Na Obr. 5.19 je znázorněno upořádání hlavní obrazovky grafického uživatelského rozhraní. Na Obr. 5.20 je uvedeno hlavní menu ovládání grafického uživatelského rozhraní. Na Obr. 5.21 jsou uvedeny vstupní parametry pro simulaci a výpočet úspory nákladů na energie. V části viz. Obr. 5.22 je možno nastavit časové plány odběru TUV a vytápění, případně je zde možnost vypnout směšování na požadovanou teplotu.

Kogenerační jednotky pro RD - hodnocení a simulace

Menu

Parametry KJ

Elektrický výkon: 1 kW

Teplý výkon SM: 5.7 kW

Teplý výkon kotle: 10 kW

Účinnost SM: 96 %

Účinnost kotle: 98 %

Pořizovací náklady: 300000 Kč

Náklady na údržbu: 1000 Kč / rok

Spotřeba energií

Spotřeba plynu: 3000 m³ / rok

Spotřeba elektřiny: 4000 kWh / rok

Účinnost stáv. kotle: 80 %

Doba provozu KJ: 350 dní / rok

Délka topné sezóny: 240 dní / rok

Využití vyrobené E: 90 %

Poměr spotřeby TUV: 25 %

Ekonomika provozu KJ

Počet provozních hodin: hod / rok

Zelený bonus: Kč / kWh

Náklady na energii v případě stávajícího kotle

Náklady na plyn: Kč / rok

Náklady na elektřinu: Kč / rok

Celkové náklady na energii: Kč / rok

Ceny energií

Spalné teplo: 10.55 kWh / m³

Cena zemního plynu: 15.28 Kč / m³

Nákupní cena elektřiny: 4.446 Kč / kWh

Cena za prodej elektřiny: 0.64 Kč / kWh

Zelený bonus

Do 3000 prov. hodin / rok: 2.01 Kč / kWh

Do 4400 prov. hodin / rok: 1.54 Kč / kWh

Do 8400 prov. hodin / rok: 0.67 Kč / kWh

Časový plán TUV

☒ TUV-on

☐ TUV-off

směšování

☒ on

☐ off

Tpož: 55 °C

1. interval ☒ 2. interval ☒ 3. interval ☒

ZAČ KON ZAČ KON ZAČ KON

6.5 : 7 hod 16 : 17.5 hod 21 : 22.5 hod

Časový plán UT

☒ UT-on

☐ UT-off

směšování

☒ on

☐ off

Tpož: 55 °C

1. interval ☒ 2. interval ☒ 3. interval ☐

ZAČ KON ZAČ KON ZAČ KON

6.5 : 9 hod 17.5 : 22 hod 19 : 22 hod

Simulace

Vyrobené teplo SM: kWh / rok

Vyrobené teplo kond. kotlet: kWh / rok

Celkové dodané teplo KJ: kWh / rok

Vyrobená elektřina KJ: kWh / rok

Náklad elektřiny z DS: kWh / rok

Spotřeba plynu: m³ / rok

Celkové náklady na plyn: Kč / rok

Náklady za elektřinu z DS: Kč / rok

Zelený bonus za elektřinu: Kč / rok

Prodej přebytku ele. do DS: Kč / rok

Celkové náklady na elektřinu: Kč / rok

Celkové náklady na energii: Kč / rok

Úspora nákladů s KJ: Kč / rok

Doba návratnosti: let

Kumulace úspor během 20 let.

Výpočet

Vyrobené teplo SM: kWh / rok

Vyrobené teplo kond. kotlet: kWh / rok

Celkové dodané teplo KJ: kWh / rok

Vyrobená elektřina KJ: kWh / rok

Náklad elektřiny z DS: kWh / rok

Spotřeba plynu: m³ / rok

Celkové náklady na plyn: Kč / rok

Náklady za elektřinu z DS: Kč / rok

Zelený bonus za elektřinu: Kč / rok

Prodej přebytku ele. do DS: Kč / rok

Celkové náklady na elektřinu: Kč / rok

Celkové náklady na energii: Kč / rok

Úspora nákladů s KJ: Kč / rok

Doba návratnosti: let

© 2013, Václav Martynek

Obr. 5.19: Hlavní obrazovka grafického uživatelského rozhraní v Matlab GUI

Menu

Tepelný okruh

Obr. 5.20: Hlavní menu grafického uživatelského rozhraní

Parametry KJ		Spotřeba energií	
Elektrický výkon:	1 kW	Spotřeba plynu:	3000 m ³ / rok
Tepelný výkon SM:	5.7 kW	Spotřeba elektřiny:	4000 kWh / rok
Tepelný výkon kotle:	10 kW	Účinnost stáv. kotle:	80 %
Účinnost SM:	96 %	Doba provozu KJ:	350 dní / rok
Účinnost kotle:	98 %	Délka topné sezóny:	240 dní / rok
Pořizovací náklady:	300000 Kč	Využití vyrobené E:	90 %
Náklady na údržbu:	1000 Kč / rok	Poměr spotřeby TUV:	25 %

Ceny energií		Zelený bonus	
Spalné teplo:	10.55 kWh / m ³	Do 3000 prov. hodin / rok:	2.01 Kč / kWh
Cena zemního plynu:	15.28 Kč / m ³	Do 4400 prov. hodin / rok:	1.54 Kč / kWh
Nákupní cena elektřiny:	4.446 Kč / kWh	Do 8400 prov. hodin / rok:	0.67 Kč / kWh
Cena za prodej elektřiny:	0.64 Kč / kWh		

Obr. 5.21: Vstupní parametry pro simulaci a výpočet úspory nákladů za energie

Časový plán TUV	
☒ TUV-on	☒ směšování
☐ TUV-off	☐ on
	☐ off
Tpož: 55 °C	
☒ 1.interval	☒ 2.interval
☒ ZAČ KON	☒ ZAČ KON
5.5 : 7 hod	16 : 17.5 hod
☒ 3.interval	
☒ ZAČ KON	
21 : 22.5 hod	

Časový plán UT	
☒ UT-on	☒ směšování
☐ UT-off	☐ on
	☐ off
Tpož: 55 °C	
☒ 1.interval	☒ 2.interval
☒ ZAČ KON	☒ ZAČ KON
6.5 : 9 hod	17.5 : 22 hod
☐ 3.interval	
☐ ZAČ KON	
19 : 22 hod	

Obr. 5.22: Panel nastavení časových plánů odběru TUV a vytápění

5.6.2 Návod na používání grafického uživatelského rozhraní

- 1) Otevřít soubor KJ_GUI.m a spustit pomocí tlačítka , vyčkat až se načte obrazovka viz. Obr. 5.19.
- 2) Nyní lze nastavit vstupní parametry a hodnoty potřebné k simulacím viz. Obr. 5.21 a Obr. 5.22 (jako výchozí jsou nastaveny parametry pro **zimní provoz**).
- 3) Uložení nastavených parametrů do workspace se provede tlačítkem **Ulož** (pokud okraj zezelená je vše v pořádku viz. Obr. 5.23a).
- 4) Tlačítkem **Spustit** se zahájí simulace zimního provozu.
- 5) Po skončení simulace je potřeba uložit simulované průběhy a hodnoty tlačítkem **Ulož zimní provoz** (okraj tlačítka zezelená viz. Obr. 5.23b).

- 6) Po uložení zimního provozu se v nastavení časových plánů automaticky přepne výběr z UT-on na UT-off (vypnutí systému vytápění), nyní je potřeba znovu stisknout tlačítko **Ulož** pro načtení hodnot letního provozu (okraj tlačítka opět zezelená viz. Obr. 5.23c).
- 7) Tlačítkem **Spustit** se zahájí simulace letního provozu.
- 8) Po skončení simulace je potřeba uložit simulované průběhy a hodnoty tlačítkem **Ulož letní provoz** (okraj tlačítka zezelená viz. Obr. 5.23d).
- 9) Nyní jsou všechny potřebné hodnoty uloženy ve workspace a stisknutím tlačítka **Ekonomika** jsou zobrazeny výsledky ekonomiky provozu kogenerační jednotky (pokud je vše v pořádku okraj tlačítka zezelená viz. Obr. 5.23e).



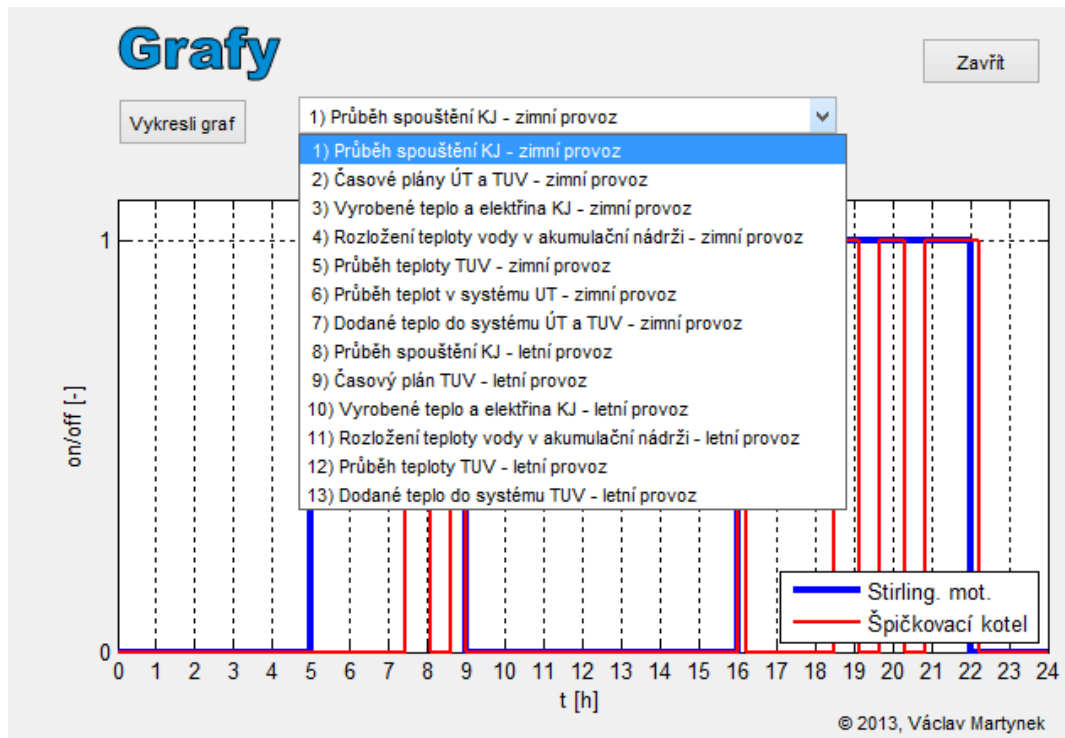
Obr. 5.23: Postup při spouštění a ukládání simulovaných průběhů

Na Obr. 5.24 jsou uvedeny vypočítané hodnoty ekonomiky provozu kogenerační jednotky. Sloupec **Simulace** odpovídá výsledným úsporám nákladů určených na základě simulovaných průběhů a sloupec **Výpočet** odpovídá výsledným úsporám nákladů určených na základě výpočtu uvedeného v kapitole 5.5 Hospodárnost kogenerace.

Ekonomika provozu KJ				
Počet provozních hodin:	2877	hod / rok		
Zelený bonus:	2.01	Kč / kWh		
Náklady na energie v případě stávajícího kotle				
Náklady na plyn:	45840	Kč / rok		
Náklady na elektřinu:	17784	Kč / rok		
Celkové náklady na energie:	63624	Kč / rok		
	Simulace		Výpočet	
Vyrobené teplo SM:	15742	kWh / rok	15742	kWh / rok
Vyrobené teplo kond. kotel:	9596	kWh / rok	9578	kWh / rok
Celkové dodané teplo KJ:	25338	kWh / rok	25320	kWh / rok
Vyrobená elektřina KJ:	2877	kWh / rok	2877	kWh / rok
Nákup elektřiny z DS:	1123	kWh / rok	1123	kWh / rok
Spotřeba plynu:	29869	m ³ / rok	29851	m ³ / rok
Celkové náklady na plyn:	43261	Kč / rok	43235	Kč / rok
Náklady za elektřinu z DS:	6273	Kč / rok	6273	Kč / rok
Zelený bonus za elektřinu:	5782	Kč / rok	5782	Kč / rok
Prodej přebytku ele. do DS:	184	Kč / rok	184	Kč / rok
Celkové náklady na elektřinu:	306	Kč / rok	306	Kč / rok
Celkové náklady na energie:	43568	Kč / rok	43541	Kč / rok
Úspora nákladů s KJ:	19056	Kč / rok	19083	Kč / rok
Doba návratnosti:	15.74	let	15.72	let
Kumulace úspor během	20	let.	Vykresli graf	

Obr. 5.24: Výsledky výpočtu úspory provozu kogenerační jednotky v grafickém uživ. rozhraní

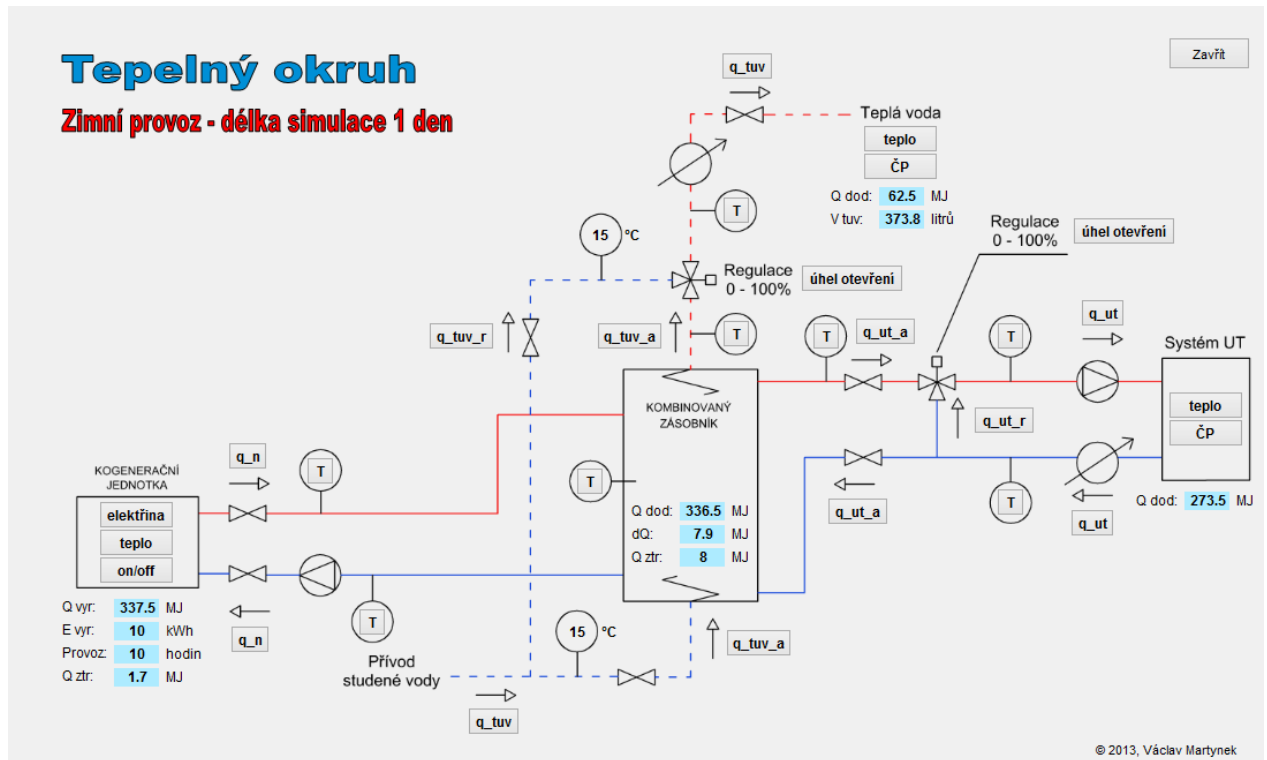
Tlačítkem **Grafy** je otevřeno nové okno viz. Obr. 5.25, ve kterém si lze vybrat v roletovém menu typ grafu, a tlačítkem **Vykresli graf** je vykreslen.



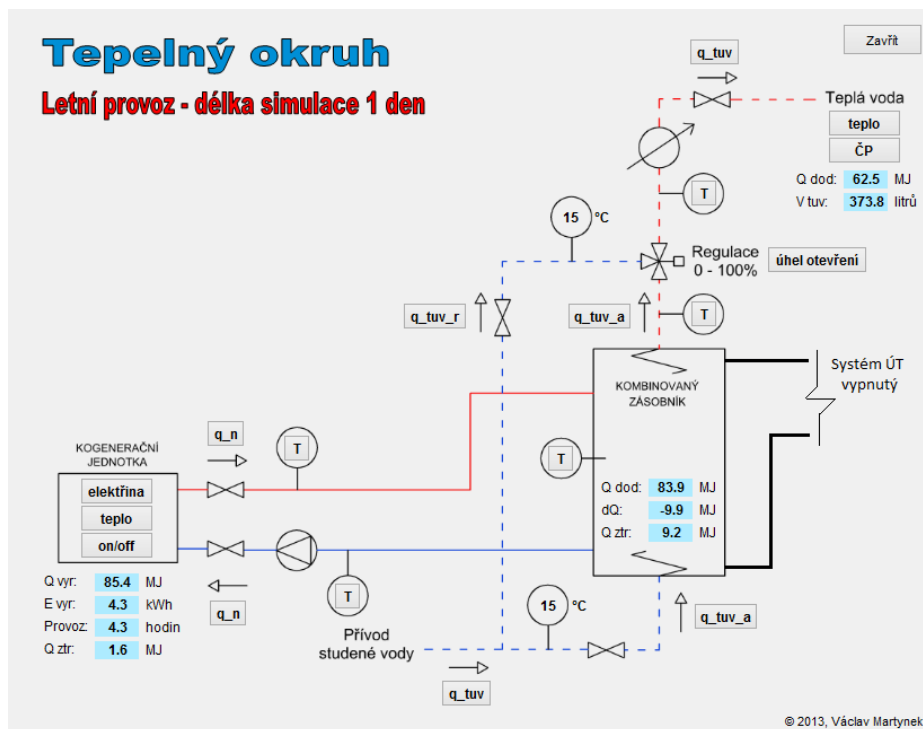
Obr. 5.25: Okno s možností vykreslení vybraného typu grafu

Tlačítko **Vymaž** slouží k vymazání všech proměnných z workspace a navrácení programu uživatelského rozhraní do původního stavu.

Tlačítky **Zimní provoz** a **Letní provoz** jsou zobrazeny tepelné okruhy, s možností zobrazení jednotlivých simulovaných průběhů během jednoho dne (teploty, průtoku, tepla, elektřiny).



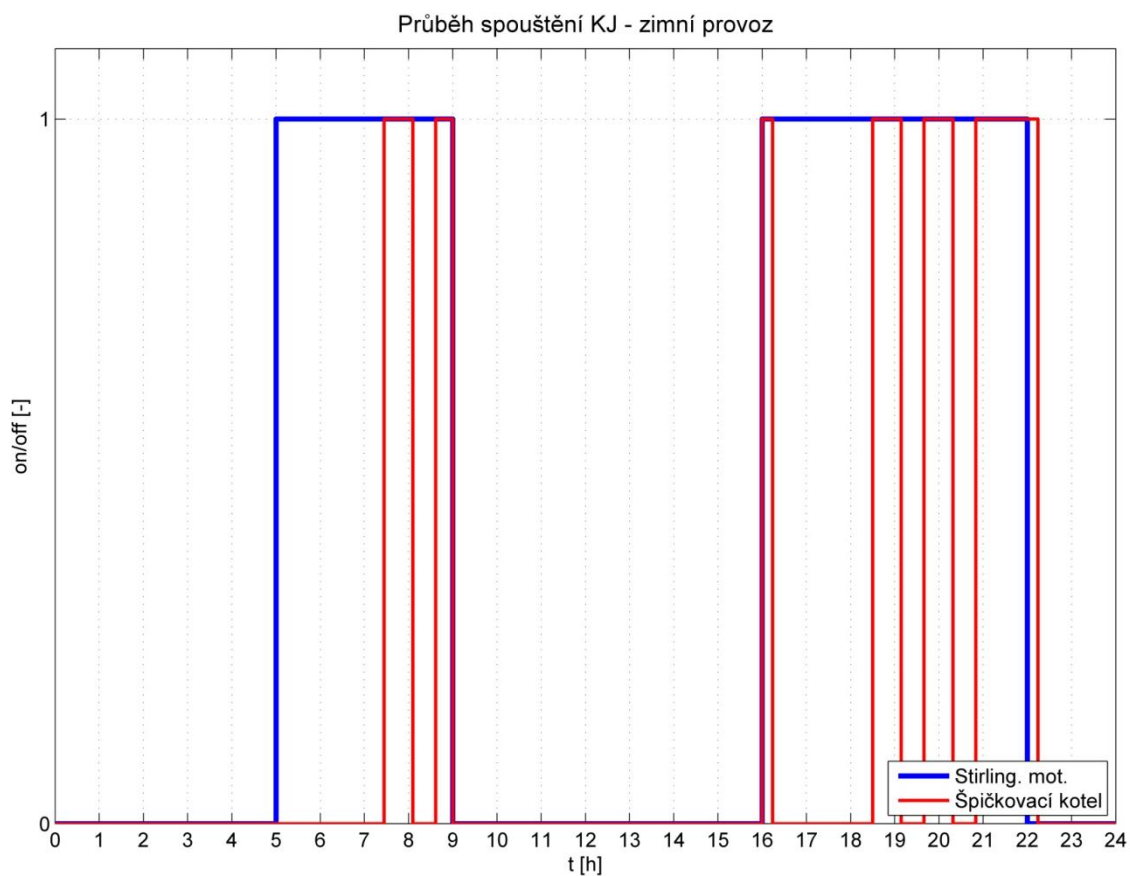
Obr. 5.26: Tepelný okruh zimního provozu v grafickém uživatelském rozhraní



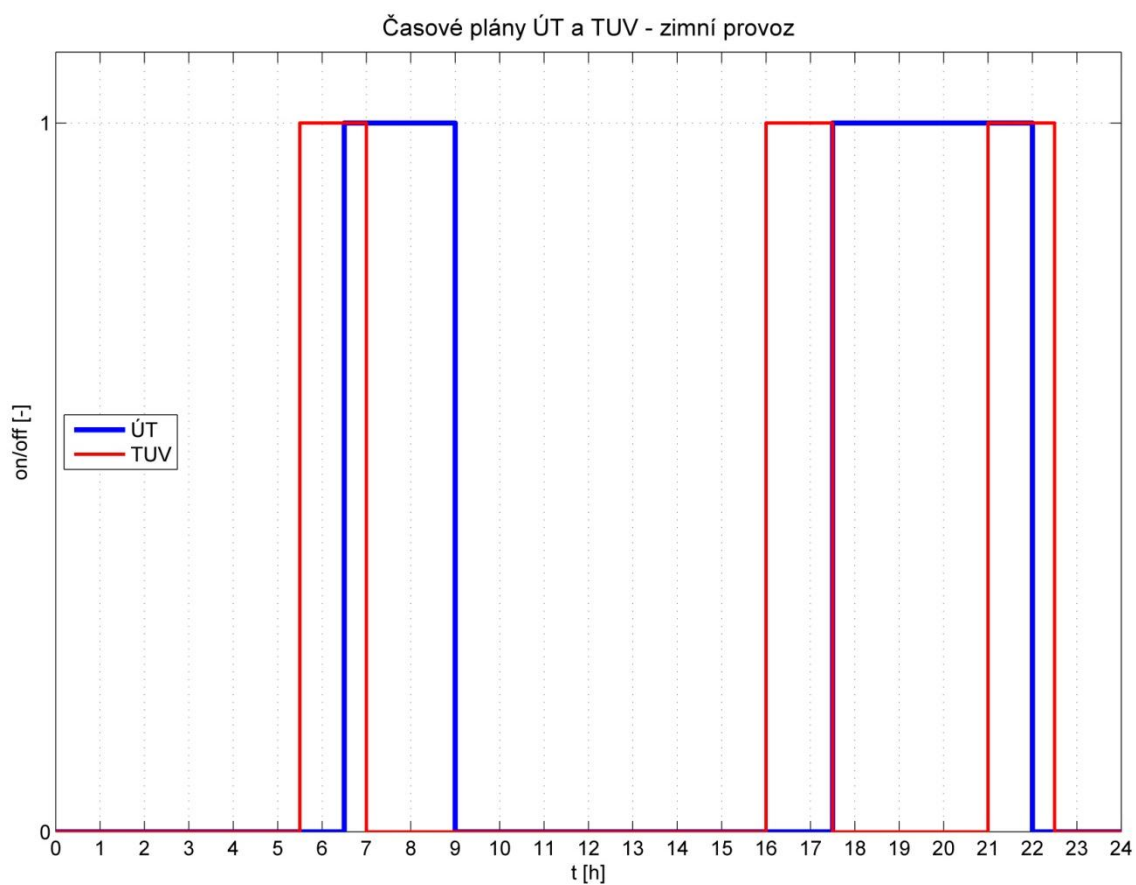
Obr. 5.27: Tepelný okruh letního provozu v grafickém uživatelském rozhraní

5.6.3 Simulované průběhy chodu kogenerační jednotky

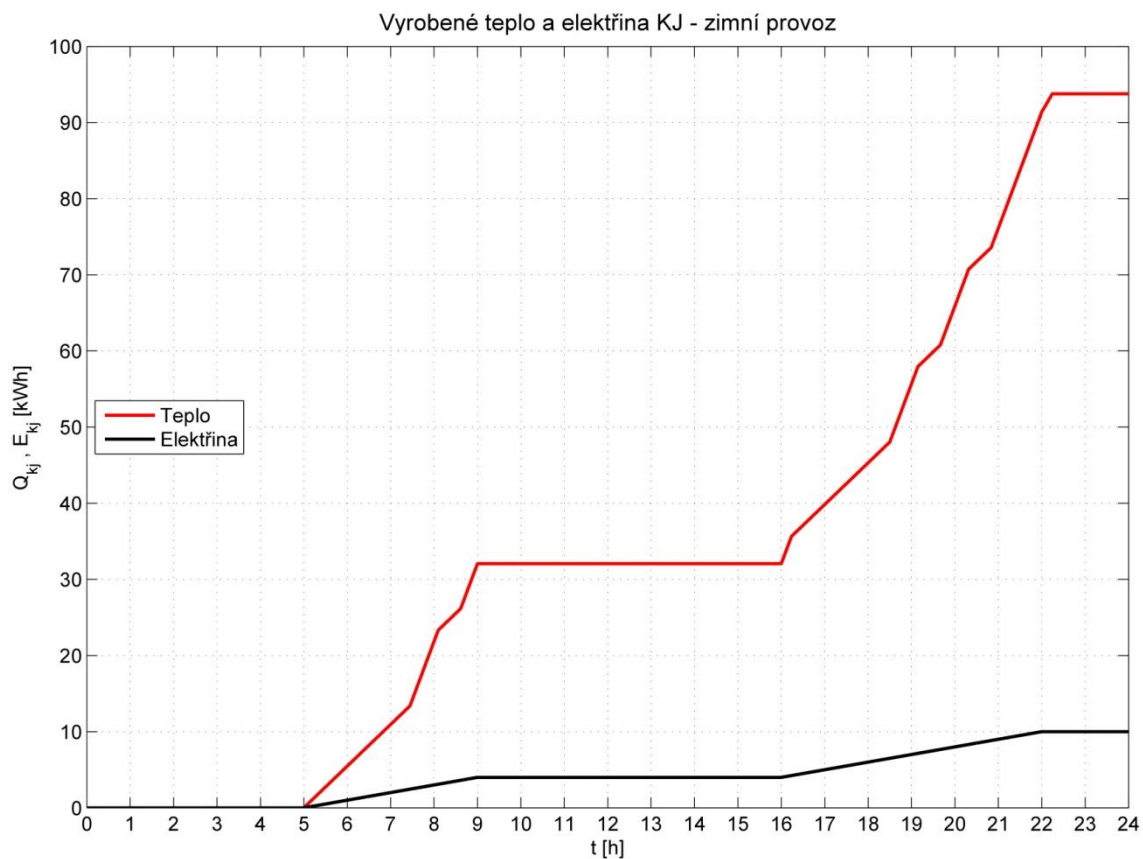
V této části budou uvedeny výsledky simulací zimního a letního provozu kogenerační jednotky. Vstupní parametry pro simulaci jsou na Obr. 5.21 a nastavení časových plánů je na Obr. 5.22. Dále uvedené grafy odpovídají simulaci tepelného okruhu během jednoho dne (24 hodin).



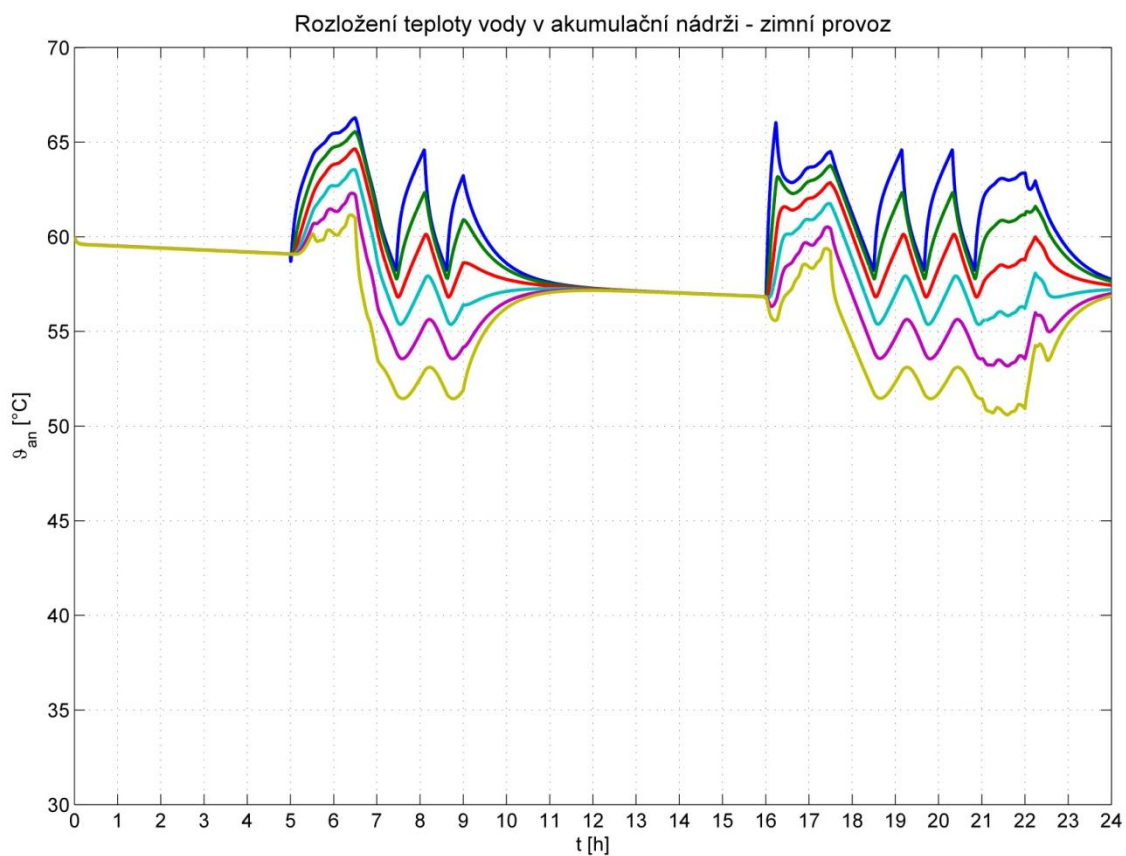
Obr. 5.28: Průběh spouštění kogenerační jednotky - zimní provoz



Obr. 5.29: Časové plány systému ÚT a odběru TUV – zimní provoz



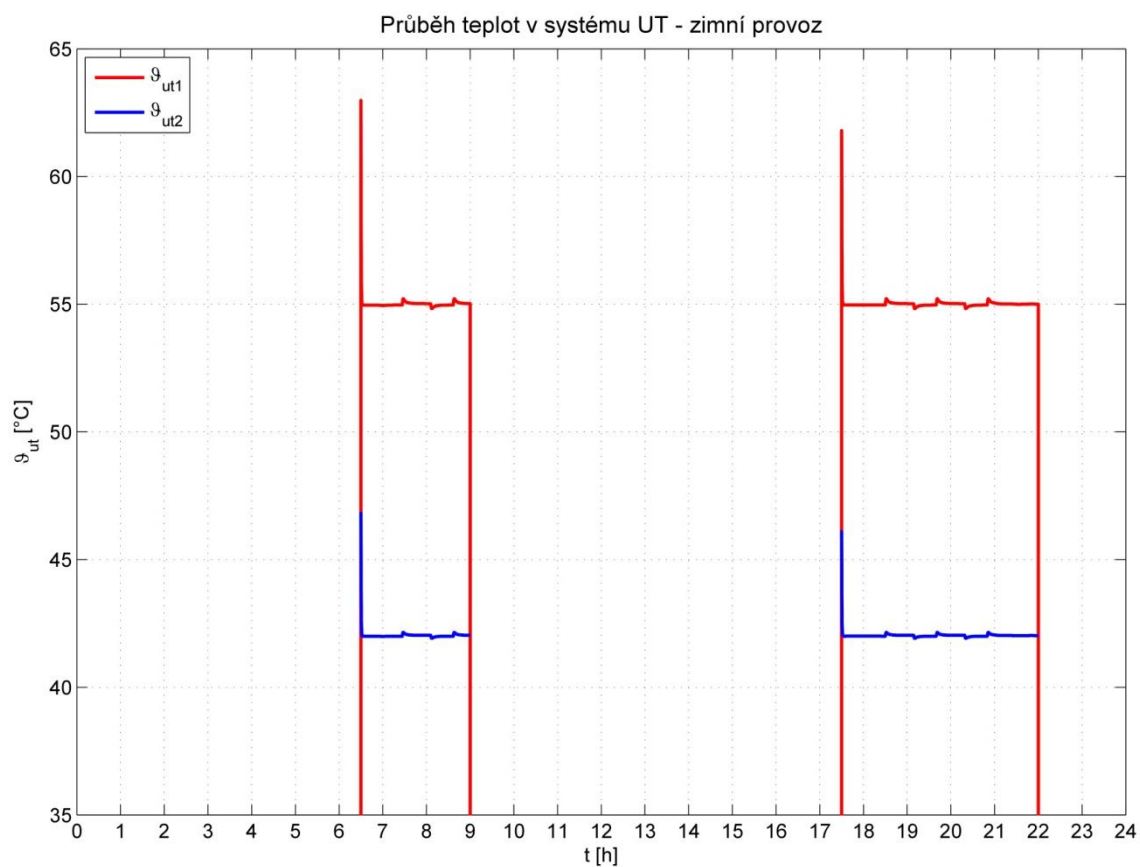
Obr. 5.30: Průběh vyrobeného tepla a elektřiny kogenerační jednotkou – zimní provoz



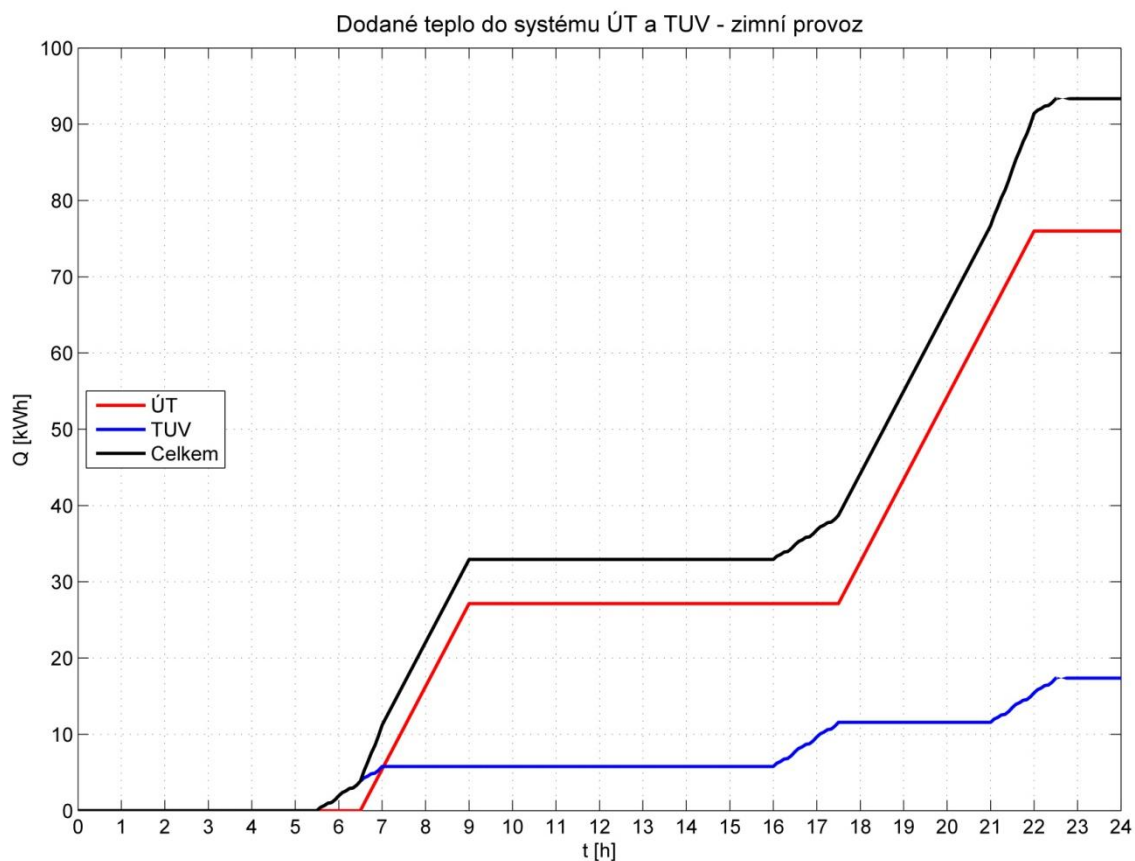
Obr. 5.31: Průběh rozložení teploty vody v akumulární nádrži – zimní provoz



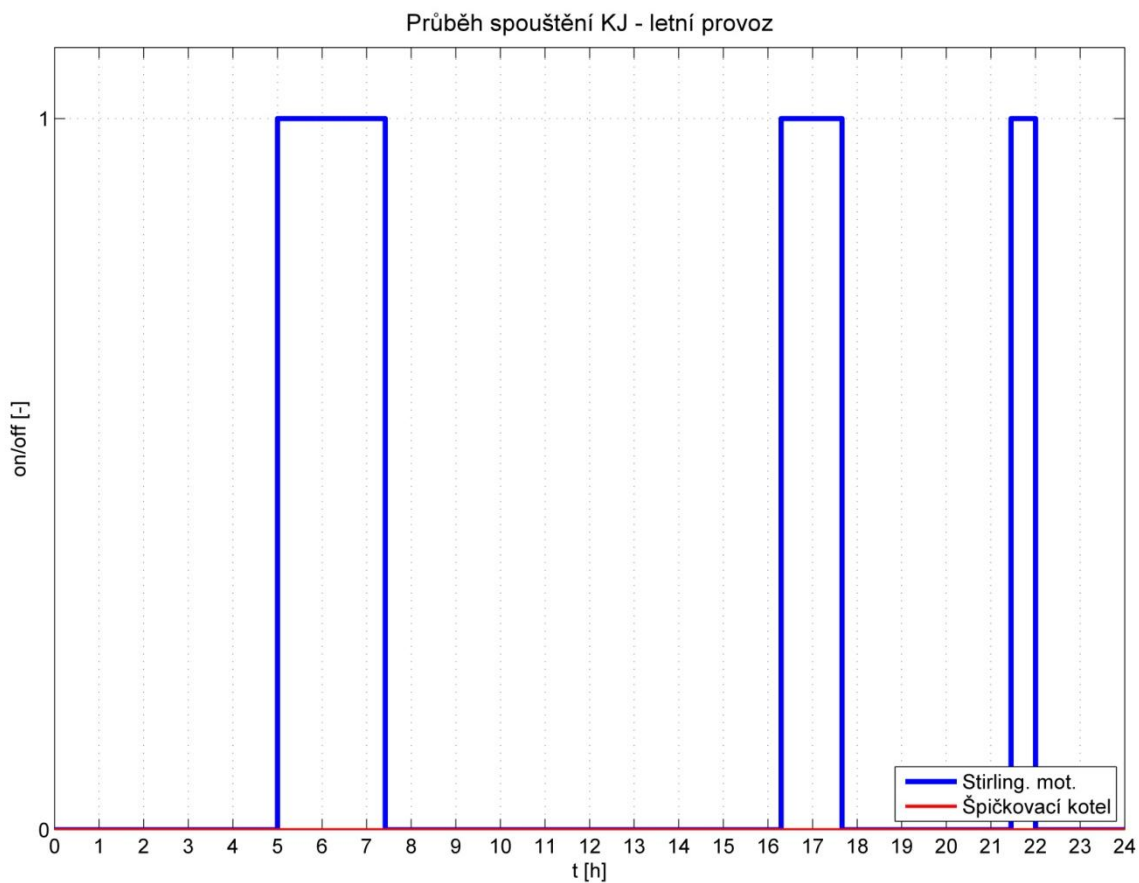
Obr. 5.32: Průběh teploty TUV – zimní provoz



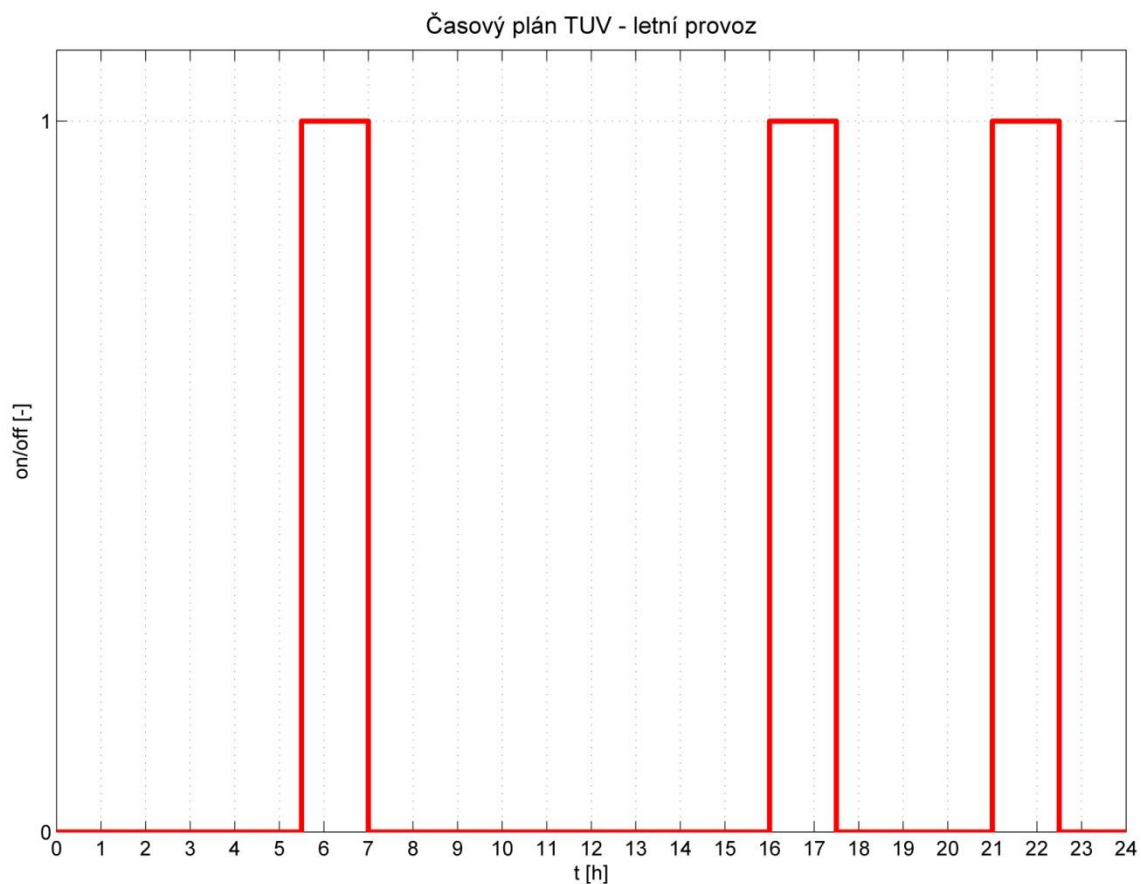
Obr. 5.33: Průběh teplot topné a vratné vody v systému ÚT – zimní provoz



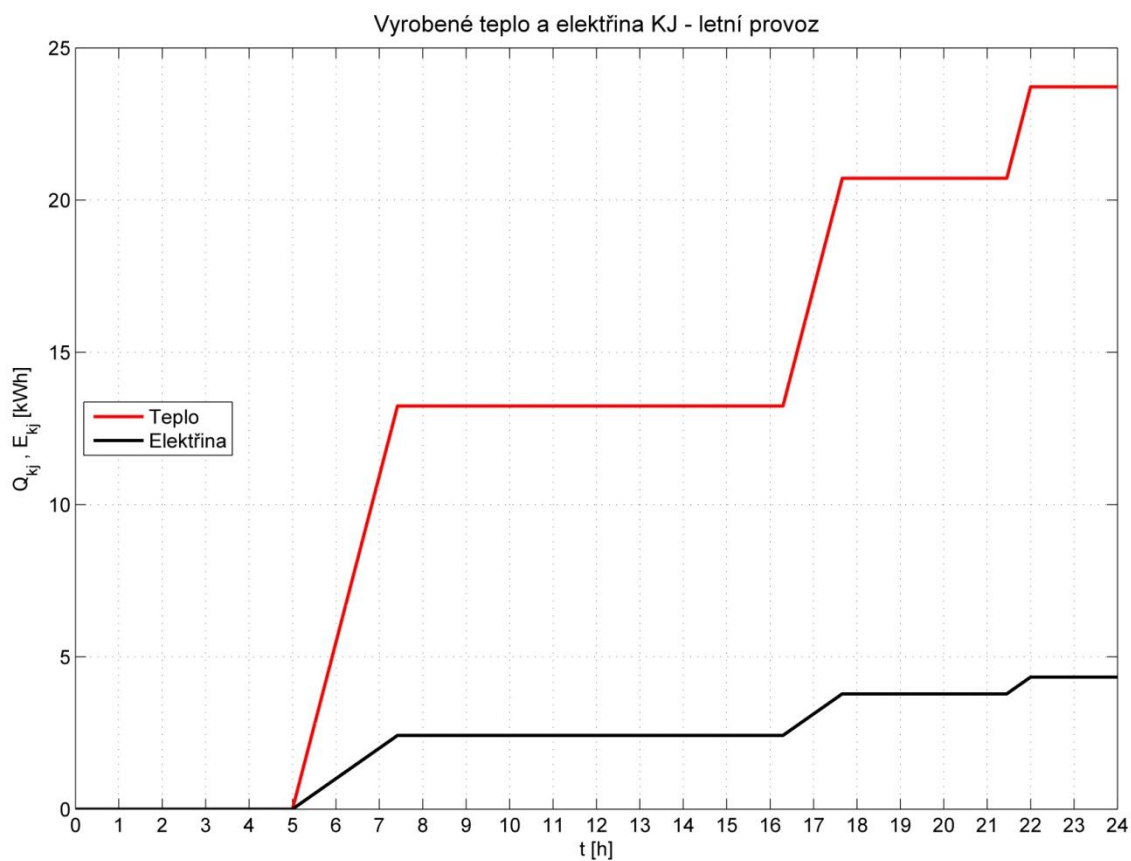
Obr. 5.34: Průběh tepla dodaného do systému ÚT a TUV – zimní provoz



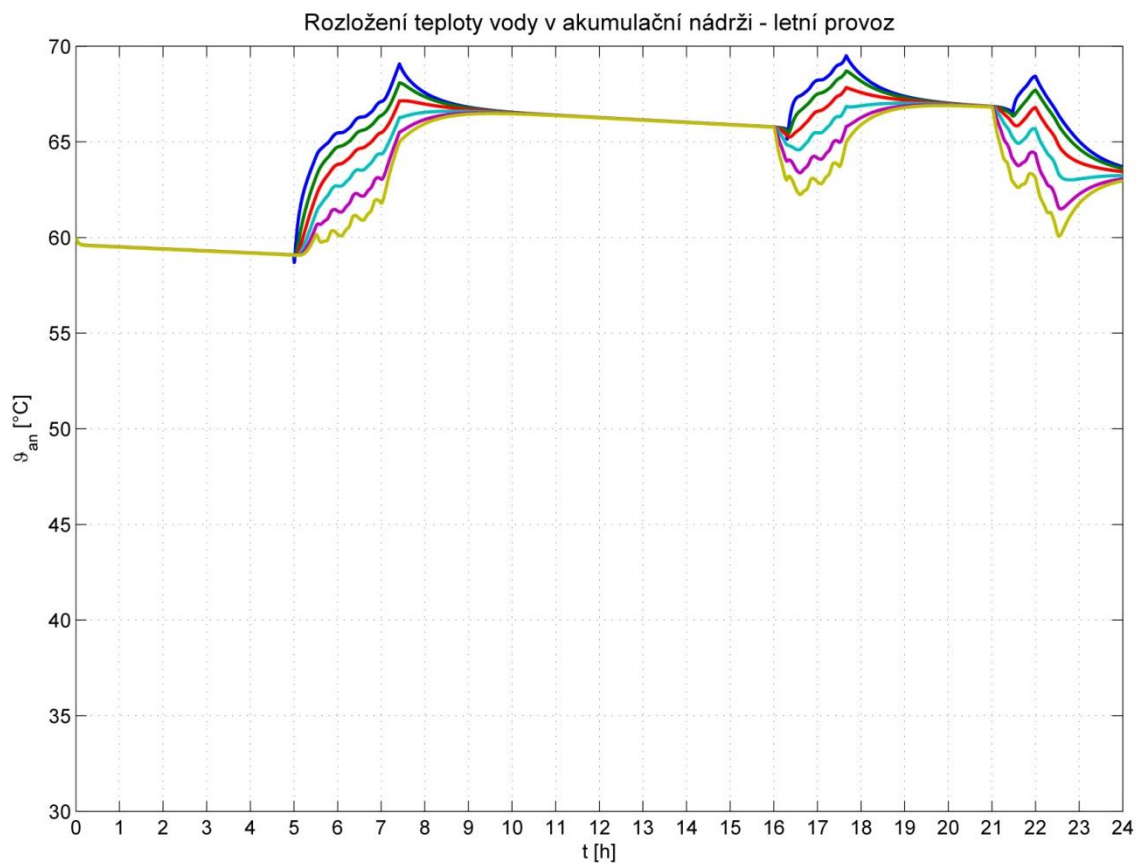
Obr. 5.35: Průběh spouštění kogenerační jednotky - letní provoz



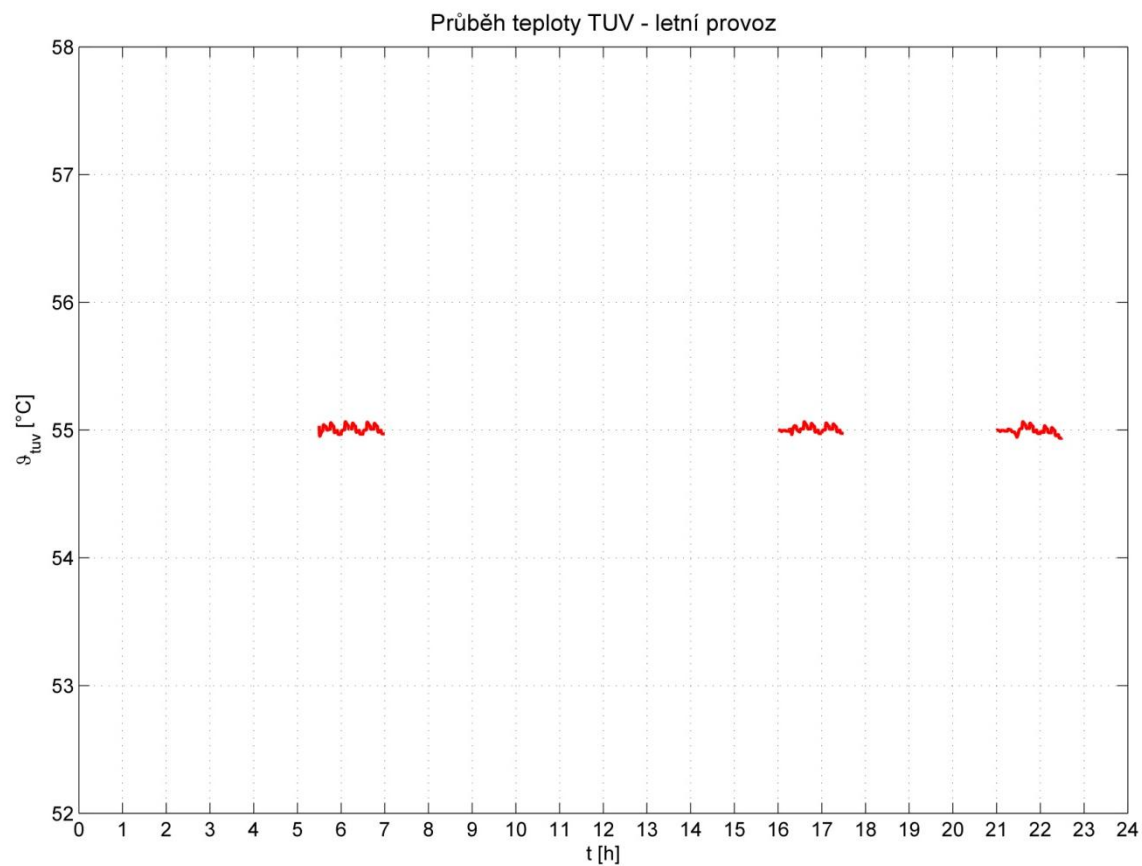
Obr. 5.36: Časový plán odběru TUV – letní provoz



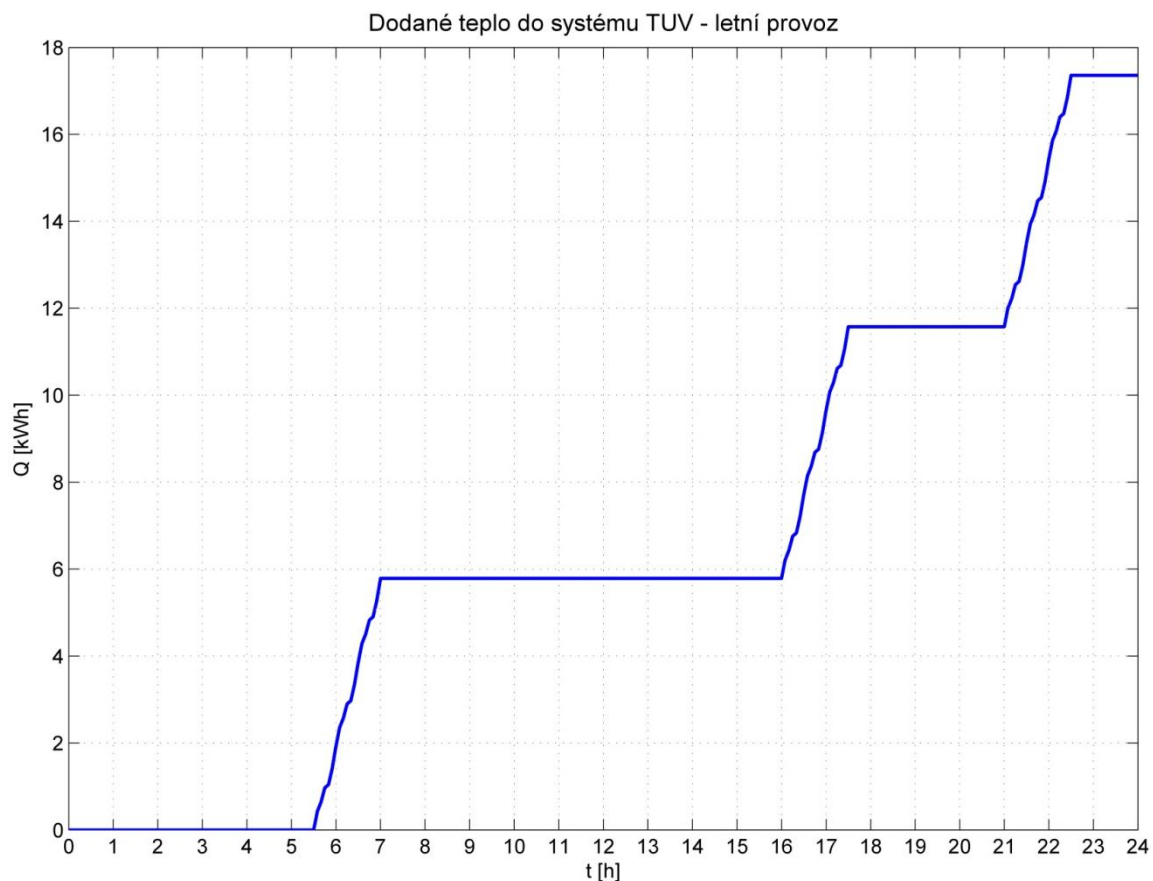
Obr. 5.37: Průběh vyrobeného tepla a elektřiny kogenerační jednotkou – letní provoz



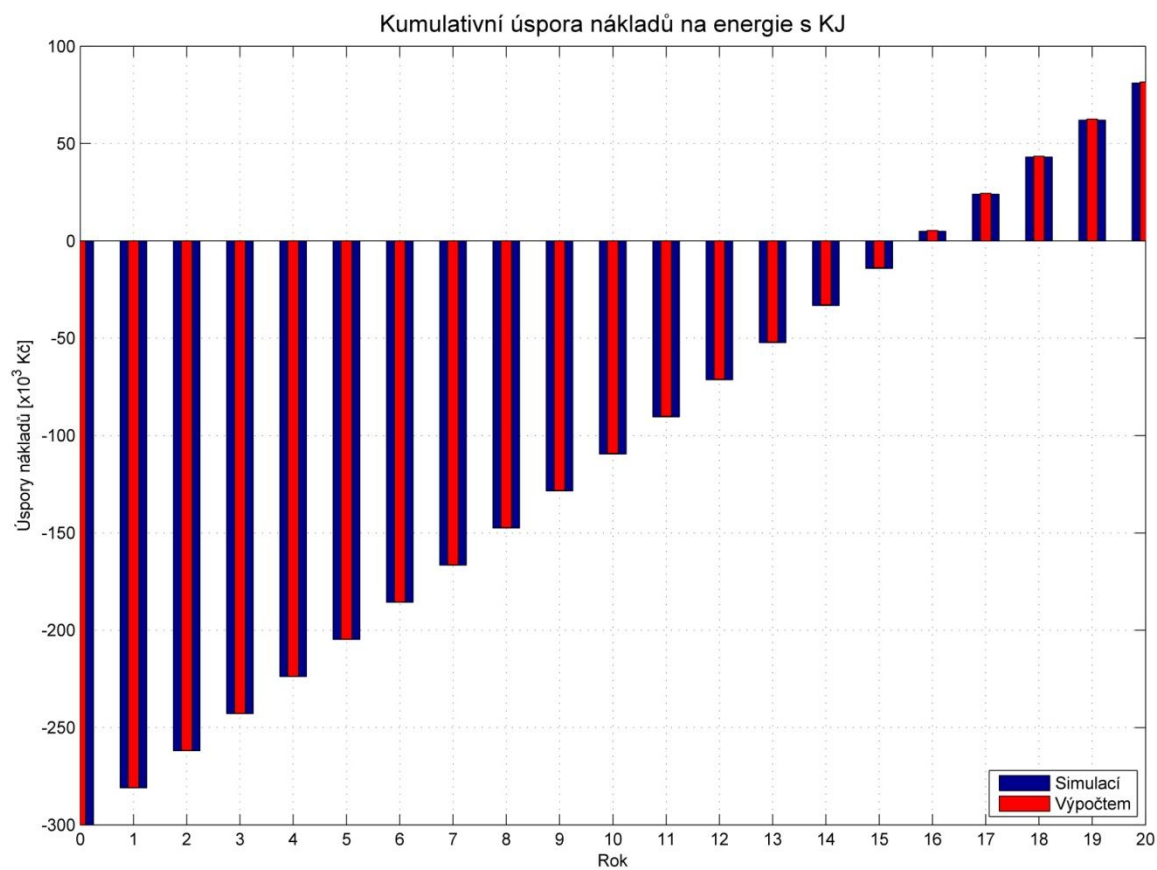
Obr. 5.38: Průběh rozložení teploty vody v akumulární nádrži – letní provoz



Obr. 5.39: Průběh teploty TUV – letní provoz



Obr. 5.40: Průběh tepla spotřebovaného na ohřev TUV – letní provoz



Obr. 5.41: Kumulativní úspora nákladů během 20 let

6 ZÁVĚR

Cíl práce spočíval ve vytvoření základního přehledu kogeneračních zařízení vhodných především pro rodinné domy, vytvoření počítačového modelu tepelného okruhu kogenerační jednotky Vitotwin 300-W a jeho grafické nadstavby.

Úvodní kapitoly jsou zaměřeny na objasnění principu kogenerační výroby, uvedení její výhody ve srovnání s oddělenou výrobou elektrické energie a tepla a rozdělení kogeneračních zařízení podle typu pohonné jednotky a jejich popis.

Čtvrtá kapitola obsahuje popis základních tepelných procesů a sdílení tepla, jejich matematické rovnice. Znalost uvedených rovnic je nezbytně nutná pro vytvoření počítačového modelu tepelného okruhu.

V páté kapitole je uveden popis modelu tepelného okruhu, který obsahuje kogenerační jednotku Vitotwin 300-W se Stirlingovým motorem, multivalentní akumulací zásobníku a na něj napojené ústřední topení. Model je vytvořen s použitím matematických rovnic tepelných procesů. Ke každé části tepelného schématu jsou uvedeny energetické bilance a vykresleny důležité grafy průběhů charakteristických veličin (teplot, výkonů a množství tepla). Součástí je také ekonomické hodnocení provozu kogenerační jednotky, která závisí na mnoha vstupních parametrech. Z tohoto důvodu je nutno provést podrobné ekonomické hodnocení před instalací kogenerační jednotky.

Vytvořený model pro simulaci tepelného okruhu kogenerační jednotky společně s grafickým uživatelským prostředím jsou nedílnou součástí diplomové práce a umožňují výpočet a simulaci s jinými vstupními parametry. Model byl vytvořen v simulačním programu Matlab Simulink a grafické uživatelské rozhraní v Matlab GUI.

Model společně s grafickým uživatelským rozhraním může být využit pro určení úspory nákladů provozu kogenerační jednotky. Uživatelské rozhraní umožňuje možnost jednoduše změnit vstupní parametry simulace a následné vyhodnocení. Také jej lze využít pro optimalizaci provozu tak, aby daný tepelný okruh pracoval s co nejefektivnějším využitím energií. Další možností využití je navrhování řízení a automatizace provozu kogeneračních jednotek v rodinných domech.

Zavedenými zjednodušujícími předpoklady mohou vznikat nepřesnosti mezi skutečným a simulovaným průběhem veličin tepelného okruhu, především se jedná o skokové změny výkonů a rozložení teplot v nádrži. Jako možné vylepšení by mohlo být rozdělení akumulacího zásobníku na větší počet elementů. Přiblížení simulace skutečným průběhům by mohlo být provedeno také zavedením nových koeficientů. Jejich závislost by mohla být odvozena z měření skutečných průběhů zařízení tepelného okruhu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MARTYNEK, Václav. *Počítačový model tepelného okruhu kogenerační jednotky*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 49 s.
- [2] KRBEK, Jaroslav; POLESNÝ, Bohumil. *Kogenerační jednotky zřizování a provoz*. Praha : GAS s.r.o., 2007. 201 s. ISBN 978-80-7328-151-9.
- [3] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava : Montanex, 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2
- [4] KUTATELADZE, S.S.; BORISANSKIJ, V.M. *Průručka sdílení tepla*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 528 s.
- [5] KRBEK, Jaroslav; POLESNÝ, Bohumil. *Kogenerační jednotky malého výkonu v komunálních a průmyslových tepelných zdrojích*. Brno : [s.n.], 1997. 100 s. ISBN 80-214-0889-0.
- [6] MATOUŠEK, Antonín. *Výroba elektrické energie*. Brno : [s.n.], 2007. 139 s. ISBN 978-80-214-3317-5.
- [7] *Energetický regulační úřad* [online]. 2005 [cit. 2012-10-23]. Dostupné z WWW: <http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocní_zprava/2010/pdf/energie.pdf>.
- [8] *TEDOM* [online]. [cit. 2010-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://kogenerace.tedom.cz/>>.
- [9] *GE Jenbacher* [online]. 2010 [cit. 2010-12-14]. Dostupné z WWW: <http://www.jenbacher.cz/ctyri_vyrobni_rady.html>.
- [10] MASTNÝ, Petr. *Kombinovaná výroba elektrické energie a tepelné energie. Přednášky kurzu malé zdroje elektrické energie* [online]. 2006, 7, [cit. 2010-12-14]. Dostupný z WWW: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/prednasky/07_08_pr.pdf>.
- [11] SAJDL, Jan. *MEA Membrane Electrode Assembly* [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://cs.autolexicon.net/articles/mea-membrane-electrode-assembly/>>.
- [12] *Stirling motor* [online]. 2010 [cit. 2012-11-18]. Dostupné z WWW: <<http://stirlingmotor.cz/>>.
- [13] *Bola* [online]. 2013 [cit. 2013-01-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.bola.cz/>>.
- [14] *Belimo* [online]. 2013 [cit. 2013-01-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.belimo.cz/>>.
- [15] DVORSKÝ, Emil; HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha : Nakladatelství BEN, 2005. 276 s. ISBN 80-7300-118-7
- [16] *Energetický regulační úřad* [online]. 2012 [cit. 2013-04-07]. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2012 ze dne 26. listopadu 2012, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie. Dostupné z WWW: <http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV8_2012.pdf>.
- [17] *COGEN, Sdružení pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla* [online]. 2008 [cit. 2013-04-07]. Rukověť provozovatele kogenerační jednotky. Dostupné z WWW: <<http://www.cogen.cz/download/127.pdf>>.
- [18] *Energetický regulační úřad* [online]. 2013 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.eru.cz/>>.

-
- [19] *Operátor trhu s elektřinou* [online]. 2013 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z WWW: <http://www.ote-cr.cz/>.
- [20] *Viessmann* [online]. 2010 [cit. 2012-11-18]. Dostupné z WWW: <http://www.viessmann.cz/>.
- [21] *Viessmann* [online]. 2011 [cit. 2013-05-13]. Prospekt Vitotwin 300-W. Dostupné z WWW: http://www.viessmann.cz/cs/rodinny_dum_dvougeneracni_rodinny_dum/produkty/mikro-kwk.html.
- [22] *Viessmann* [online]. 2011 [cit. 2013-05-13]. Prospekt Vitocell 340-M. Dostupné z WWW: http://www.viessmann.cz/cs/rodinny_dum_dvougeneracni_rodinny_dum/produkty/systemtechnik/speicher-wassererwaermer/Vitocell_340-M.html.
- [23] *Stirling energy* [online]. 2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z WWW: <http://www.stirlingenergy.cz/>.
- [24] *Gascontrol* [online]. 2006 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z WWW: <http://www.gascontrol.cz/produkty/spalovaci-mikroturbiny-c65.html>.