



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Disertační práce

**Predikce parametrů distribuce tepla v systému
centrálního zásobování teplem**

The Prediction of Parameters for a District Heating System

Autor Ing. et Ing. Erik Král
Obor Technická kybernetika
Školitel doc. Ing. Lubomír Vašek, CSc.

Zlín, 2013

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování svému prvnímu vedoucímu, zesnulému doc. Ing. Mgr. Milan Kvasnicovi, CSc. Dále bych rád poděkoval prof. Ing. Vladimíru Vaškovi, CSc., který mně dočasně vedl a konečně chci poděkovat svému současnému vedoucímu doc. Ing. Lubomíru Vaškovi, CSc. za vedení, trpělivost a cenné rady. Rovněž bych chtěl rád poděkovat Ing. Viliamu Dolinayovi, Ph.D. a všem ostatním za vstřícnost a pomoc při získávání potřebných informací a podkladů. Poděkování patří také všem mým blízkým, kteří se mnou měli dostatek trpělivosti v době, kdy jsem dokončoval tuto práci.

ABSTRAKT

Práce se zabývá predikcí parametrů distribuce tepla v systému centrálního zásobování teplem (SCZT). Model systému je popsán zdrojem tepla a těžištěm spotřeby, ke kterému se vztahuje plánování. Měřenými (vstupními) parametry jsou teplota topné vody, hmotnostní průtok a venkovní teplota vzduchu. Na základě těchto hodnot je vypočítáno tepelné zatížení v místě spotřeby a také rozdíl teplot na vstupu a výstupu do těžiště spotřeby systému. Dále jsou zvoleny vhodné aproximační funkce tepelného zatížení a rozdílu teplot vstupní a výstupní vody v těžišti SCZT, jejichž parametry jsou nalezeny pomocí vybraných optimalizačních algoritmů. Tyto aproximační funkce jsou poté použity pro predikci teploty vratné vody a hmotnostního průtoku. Vstupními veličinami predikce jsou zadaná teplota topné vody a venkovní teplota vzduchu. Součástí predikce je i určení hodnoty tepelného zatížení. Vyvinutý softwarový nástroj potom slouží operátorům jako simulátor pro plánování teploty topné vody a také vedoucím pracovníkům jako nástroj pro podporu jejich rozhodování.

Klíčová slova: systém centrálního zásobování teplem, dodávaný výkon, tepelná zátěž, aproximace, predikce, optimalizace

ABSTRACT

This work deals with the prediction of selected parameters for a district heating system (DHC). District heating systems are described as a heat source and the centre of a mass of heat consumption to which the DHC planning is related. The heat source input and output temperatures and the mass flow of the heating medium are measured. Using the measured values, the delivered heat load and the temperature difference between the input and output temperatures of the heating medium relative to the centre of the mass are calculated. The appropriate approximation functions are selected and their parameters are estimated using selected optimization algorithms. The appropriate approximation functions are used for the prediction of heat source input temperature and mass flow using the required values of the heat source output temperature. The prediction also includes an estimation of the supplied heat load. The predicted values are used by plant operators as a simulation tool for heat source output temperature planning. The software tool as developed, can also be used by management as a decision-making support tool.

Key-Words: District heating, Supplied Heat Load, Delivered Heat Load, Prediction, Approximation, Prediction, Optimization, Evolution Algorithm

OBSAH

OBSAH	3
SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK.....	9
POUŽITÉ SYMBOLY – SCZT.....	11
POUŽITÉ SYMBOLY - OPTIMALIZACE	12
POUŽITÉ SYMBOLY - IDENTIFIKACE	14
POUŽITÉ ZKRATKY	17
1 ÚVOD.....	19
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	21
2.1 Predikce parametrů distribuce tepla v SCZT	21
2.2 Faktory ovlivňující tepelné zatížení.....	25
3 CÍLE DOKTORSKÉ DISERTAČNÍ PRÁCE	28
4 ZVOLENÉ METODY.....	29
4.1 Systém centrálního zásobování teplem.....	29
4.2 Tepelný výkon dodávaný do primární sítě	31
4.3 Tepelné zatížení.....	32
4.3.1 Dopravní zpoždění.....	32
4.3.2 Výpočet tepelného zatížení	33
4.4 Aproximace tepelného zatížení.....	34

4.5	Funkce závislosti tepelného zatížení na venkovní teplotě..	36
4.5.1	<i>Richardsova křivka</i>	36
4.5.2	<i>Polynomiální funkce</i>	38
4.5.3	<i>Po částech lineární funkce</i>	39
4.6	Funkce koeficientů závislosti tepelného zatížení na hodině dne	41
4.6.1	<i>Aproximační funkce Hybrid of Gaussian and truncated exponential</i>	42
4.6.2	<i>Hodinové koeficienty tepelného zatížení</i>	43
4.7	Rozdíl teplot a průtok v primární síti	45
4.7.1	<i>Aproximace rozdílu teplot v primární síti</i>	46
4.8	Určení koeficientů aproximačních funkcí.....	47
4.8.1	<i>Účelová funkce</i>	48
4.8.2	<i>Standard Particle Swarm Optimization</i>	48
4.8.3	<i>Differential Evolution</i>	52
4.8.4	<i>Self – Organizing Migration Algorithm</i>	55
5	POSTUP IDENTIFIKACE A PREDIKCE.....	56
5.1	Identifikace modelu.....	56
5.2	Predikce	57
6	ŘEŠENÍ A JEHO IMPLEMENTACE	58
6.1	Metody implementace	58
6.1.1	<i>Zdroje a formáty dat</i>	58

6.1.2	<i>Architektura aplikace</i>	59
6.1.3	<i>Paralelní programování heterogenních systémů</i>	62
6.2	Základní struktura implementace.....	64
6.3	Implementace aproximačních funkcí.....	65
6.3.1	<i>Implementace jednotlivých funkcí</i>	65
6.3.2	<i>Implementace funkce aproximující tepelné zatížení</i>	65
6.4	Implementace optimalizačních metod	67
6.4.1	<i>Účelová funkce</i>	67
6.4.2	<i>Evoluční algoritmy</i>	68
6.5	Implementace služeb.....	69
6.5.1	<i>Datové služby</i>	69
6.5.2	<i>Optimalizační služba</i>	71
6.6	Implementační moduly.....	74
6.6.1	<i>Modul tepelného zatížení</i>	74
6.6.2	<i>Modul rozdílu teplot</i>	76
6.6.3	<i>Modul predikce</i>	78
7	MĚŘENÍ A DISKUSE	80
7.1	Zvolené parametry	81
7.1.1	<i>Optimalizační algoritmy</i>	81
7.1.2	<i>Aproximační funkce</i>	82
7.2	Ověření optimalizačních algoritmů.....	85
7.3	Ověření identifikace a predikce	88

ZÁVĚR.....	97
HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE.....	98
PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	99
POUŽITÁ LITERATURA.....	100
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA.....	109
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	112
SEZNAM PŘÍLOH.....	114

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Primární a sekundární síť	30
Obrázek 2: Závislost tepelného zatížení na venkovní teplotě vzduchu	35
Obrázek 3: Závislost tepelného zatížení na hodině ve dni.....	35
Obrázek 4: Ukázka Richardsovy křivky	37
Obrázek 5: Ukázka polynomiální funkce	38
Obrázek 6: Ukázka po částech lineární funkce.....	40
Obrázek 7: Ukázka funkce EGH při aproximaci tepelného zatížení.....	43
Obrázek 8: Ukázka funkce hodinových koeficientů tepelného zatížení.....	45
Obrázek 9: Závislost rozdílu teplot na teplotě topné vody	46
Obrázek 10: Závislost rozdílu teplot na tepelném zatížení.....	47
Obrázek 11: Vývojový diagram algoritmu SPSO.....	50
Obrázek 12: Komunikace částic v gbest topologii [45].....	51
Obrázek 13: Komunikace částic v lbest topologii [45].....	51
Obrázek 14: Vývojový diagram algoritmu DE.....	54
Obrázek 15: Komunikace mezi View, ViewModel a Model [65].....	61
Obrázek 16: Ukázka implementace MVVM [66].....	61
Obrázek 17: Paralelní implementace PSO v OpenCL	63
Obrázek 18: Implementace aproximačních funkcí	66
Obrázek 19: Implementace účelové funkce.....	67
Obrázek 20: Implementace evolučních algoritmů	68
Obrázek 21: Implementace ukončovacích kritérií	69
Obrázek 22: Implementace datových služeb	70
Obrázek 23: Implementace lokální optimalizační služby.....	72
Obrázek 24: Sekvenční diagram spuštění optimalizační služby.....	73
Obrázek 25: Závislosti modulu tepelné zatížení.....	74
Obrázek 26: Uživatelské rozhraní modulu tepelného zatížení	75
Obrázek 27: Závislosti modulu rozdílu teplot	76

Obrázek 28: Uživatelské rozhraní modulu rozdílu teplot.....	77
Obrázek 29: Závislosti modulu predikce	78
Obrázek 30: Uživatelské rozhraní modulu predikce.....	79
Obrázek 31: Výsledky aproximace SCZT A 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011	86
Obrázek 32: Výsledky aproximace SCZT B 1. 11. 2006 až 31. 3. 2007.....	87
Obrázek 33: Predikce tepelného zatížení SCZT A od 6. 3. 2011 do 12. 3. 2011.....	93
Obrázek 34: Predikce teploty vratné vody SCZT A od 6. 3. 2011 do 12. 3. 2011.....	93
Obrázek 35: Predikce průtoku v SCZT A od 6. 3. 2011 do 12. 3. 2011	94
Obrázek 36: Predikce tepelného zatížení SCZT B od 6. 3. 2007 do 12. 3. 2007.....	94
Obrázek 37: Predikce teploty vratné vody SCZT B od 6. 3. 2007 do 12. 3. 2007.....	95
Obrázek 38: Predikce průtoku v SCZT B od 6. 3. 2007 do 12. 3. 2007.....	95

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Podíl jednotlivých komponent, převzato [7]	26
Tabulka 2: Podíl komponent dle velikosti SCZT, převzato z [10]	26
Tabulka 3: Srovnání významnosti meteorologických vlivů	27
Tabulka 4: Ukázkové souřadnice x funkce PCL	39
Tabulka 5: Ukázkové souřadnice y funkce PCL	40
Tabulka 6: Ukázkové parametry funkce EGH.....	42
Tabulka 7: Ukázkové parametry funkce HRS	44
Tabulka 8: Kombinace funkcí pro aproximaci tepelného zatížení	47
Tabulka 9: Implementace základních aproximačních funkcí.	65
Tabulka 10: Implementace evolučních algoritmů.	68
Tabulka 11: Datové služby a jejich rozhraní	69
Tabulka 12: Nastavení parametrů algoritmu SPSO	81
Tabulka 13: Nastavení parametrů algoritmu DE	81
Tabulka 14: Nastavení parametrů algoritmu SOMA	81
Tabulka 15: Meze parametrů Richadsovy křivky.....	82
Tabulka 16: Meze parametrů funkce P4	82
Tabulka 17: Meze parametrů funkce PCL.....	83
Tabulka 18: Nastavení konstant funkce PCL.....	83
Tabulka 19: Meze parametrů funkce EGH pro ranní špičku	84
Tabulka 20: Meze parametrů funkce EGH pro večerní špičku	84
Tabulka 21: Meze parametrů funkce HRS.....	84
Tabulka 22: Kombinace aproximačních funkcí.....	85
Tabulka 23: Výsledky aproximace ve W pro SCZT A 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011.....	86
Tabulka 24: Výsledky aproximace ve W pro SCZT B 1. 11. 2006 až 31. 3. 2007.....	87
Tabulka 25: Výsledky identifikace SCZT A, topná sezóna 2011/2012	89

Tabulka 26: Výsledky predikce SCZT A, topná sezóna 2011/2012	90
Tabulka 27: Výsledky identifikace SCZT B, topná sezóna 2006/2007	91
Tabulka 28: Výsledky predikce SCZT B, topná sezóna 2006/2007.....	92

POUŽITÉ SYMBOLY – SCZT

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>
$Q_{\text{dodávaný}}(t)$	W	je funkce dodávaného tepelného výkon do primární sítě,
c_p	$\frac{J}{kg K}$	je měrná tepelná kapacita vody v primární síti,
$\dot{m}(t)$	$\frac{kg}{s}$	je hmotnostní průtok primární sítě,
$\vartheta_{\text{topná}}(t)$	$^{\circ}C$	je teplota topné vody,
$\vartheta_{\text{vratná}}(t)$	$^{\circ}C$	je teplota vratné vody.
$D_{\text{topná}}$	s	je dopravní zpoždění topné větve primární sítě
$D_{\text{vratná}}$	s	je neznámé dopravní zpoždění vratné větve primární sítě,
R	kg	je známá konstantní hmotnost vody odpovídající polovině objemu primární sítě,
$Q_{\text{zatížení}}(t)$	W	je funkce tepelného zatížení (potřebný výkon),
$\vartheta_{\text{vstup}}^{\text{těžiště}}(t)$	$^{\circ}C$	je teplota topné vody na vstupu těžiště primární sítě.
$\vartheta_{\text{výstup}}^{\text{těžiště}}(t)$	$^{\circ}C$	je teplota topné vody na výstupu těžiště primární sítě.
$\Delta\vartheta^{\text{těžiště}}(t)$	$^{\circ}C$	je rozdíl teplot topné vody na vstupu a výstupu těžiště primární sítě,
ϑ_{ex}	$^{\circ}C$	je venkovní teplota vzduchu,

POUŽITÉ SYMBOLY - OPTIMALIZACE

G		je iterace evolučního algoritmu,
χ		je constriction factor algoritmu DE,
N		je počet jedinců,
i		je index jedince, $i = 1, 2, 3, \dots, N$,
D		je dimenze problému,
d		je index dimenze $d = 1, 2, 3, \dots, D$,
x_i		je pozice jedince,
v_i		je rychlost částice algoritmu PSO,
ω		je parametr zrychlení algoritmu PSO,
c_1		je parametr reprezentující sociální chování částice algoritmu PSO,
c_2		je parametr reprezentující poznávací chování částice algoritmu PSO,
ϵ_1, ϵ_2		jsou náhodná čísla s rovnoměrným rozdělením $\langle 0, 1 \rangle$,
p_i		je nejlepší dosažená pozice částice algoritmu PSO,
p_g		je nejlepší dosažená pozice ze sousedících částic algoritmu PSO,
r_1, r_2, r_3		jsou náhodná vzájemně se lišící celá čísla $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N\}$ která se nerovnájí aktuálnímu indexu i ,
F		je mutační konstanta, $F \in \langle 0; 2 \rangle$
CR		je definovaný práh křížení (crossover constant), $CR \in \langle 0, 1 \rangle$,

$randb(d)$		je ohodnocení generátoru náhodných čísel s rovnoměrným rozdělením $\langle 0,1 \rangle$, pro index d ,
path		je násobek vzdálenosti od výchozí pozice k pozici nejlepšího jedince $x_{gd,G} - x_{id,G,start}$, path = 0, Step, 2 Step, ..., PathLength,
PathLength		je maximální násobek vzdálenosti $x_{gd,G} - x_{id,G,start}$,
Path		je velikost kroku,
PRTVector		je perturbační vektor,
PRT		je perturbační koeficient $PRT \in \langle 0; 1 \rangle$,

POUŽITÉ SYMBOLY - IDENTIFIKACE

$f_{Q_{\text{zatížení}}}(t, \vartheta_{ex})$	W	je funkce aproximace tepelného zatížení,
$f_{\text{čas}}(h, \text{daycat})$		je funkce koeficientu závislosti na hodině dne a typu dne,
$f_{\text{teplota}}(\vartheta_{ex})$	W	je funkce závislosti tepelného zatížení na venkovní teplotě vzduchu,
$\text{hour}(t)$	h	je funkce hodina dne,
$\text{day}(t)$		je funkce typu dne, $\text{day}(t) = \text{daycat} = \{w, f\}$, kde w označuje pracovního volna a f označuje den pracovního volna.
$RMSE_{Q_{\text{zatížení}}}$	W	je účelová funkce aproximace tepelného zatížení.
$f_{GLC}(\vartheta_{ex})$	W	je funkce aproximace tepelného zatížení s využitím Richardsovy křivky,
A		je hodnota horní asymptoty,
K		je sklon v inflexním bodu,
T_i		je čas inflexního bodu,
$\frac{d}{d(1-d)}$		je relativní podíl horní asymptoty v čase inflexního bodu.
ϑ_{ex}^i		je teplota inflexního bodu,
Q_{min}		je minimální hodnota tepelného zatížení,
$f_{P4}(\vartheta_{ex})$	W	je funkce aproximace tepelného zatížení s využitím polynom čtvrtého stupně,
a_0, a_1, a_2, a_3, a_4		jsou reálné koeficienty polynomu,
$f_{PLC_i}(\vartheta_{ex})$	W	je funkce aproximace tepelného zatížení s využitím po částech lineární funkce,
j		je index segmentu $j = 1 \dots m - 1$,

m		je počet segmentů,
(x_j, y_j)		jsou souřadnice prvního koncového bodu segmentu,
(x_{j+1}, y_{j+1})		jsou souřadnice druhého koncového bodu segmentu,
$f_{free}(h)$		je funkce koeficientu závislosti na hodině dne a typu dne aproximace zatížení pro pracovní den,
$f_{work}(h)$		je funkce koeficientu závislosti na hodině dne a typu dne aproximace tepelného zatížení pro den pracovního klidu,
$f_{EGH}(h)$		je funkce koeficientu závislosti na hodině dne a typu dne pomocí funkce EGH,
H		je výška vrcholu funkce EGH,
σ		je směrodatná odchylka rodičovského Gaussova rozdělení funkce EGH,
τ		je časová konstanta definující exponenciální pokles,
h_m		je hodina ($h = h_m$) v němž má funkce EGH vrchol H .
$f_{HRS}(h, daycat)$		je funkce koeficientu závislosti na hodině dne a typu dne pomocí hodinových koeficientů,
$l_{g,daycat}$		je koeficient tepelného zatížení pro index hodiny $g = 1, 2, \dots, 24$ a typ dne $daycat = \{work, free\}$ je typ dne, kde w označuje pracovního volna a f označuje den pracovního volna
g		je index hodiny $g = 1, 2, \dots, 24$,
$GetIndex(h)$		je funkce vracející index g pro danou hodinu h ,

$f_{\Delta\theta_{\text{těžiště}}}(t, q)$	$^{\circ}\text{C}$	je funkce aproximace rozdílu teplot vody na vstupu a výstupu těžiště primární sítě, kde q je hodnota tepelného zatížení.
p_0, p_1, p_2, p_3, p_4		jsou reálné koeficienty funkce $f_{DIF}(t)$,

POUŽITÉ ZKRATKY

<i>Zkratka</i>	Význam
<i>DDDT</i>	Denní diagram dodávky tepla
<i>SCZT</i>	Systemu centrálního zásobování teplem
<i>ARMAX</i>	Autoregressive Moving Average with Extraneous Input
<i>AP</i>	Analytic Programming
<i>ARX</i>	Autoregressive with Exogenous Input
<i>LMTD</i>	Logarithmic Mean Temperature Difference
<i>TUV</i>	Teplá užitková voda
<i>SCZT</i>	System centrálního zásobování teplem
<i>EGH</i>	Gaussian and truncated exponential function
<i>URM</i>	Unified-Richards model
<i>P4</i>	Polynomiální funkce 4. řádu
<i>PCL</i>	Piecewise linear function (po částech lineární funkce)
<i>HRS</i>	Hodinové koeficienty tepelného zatížení
<i>DE</i>	Differential Evolution
<i>SPSO</i>	Standard Particle Swarm Optimisation
<i>SOMA</i>	Self-Organizing Migrating Algorithm
<i>CPU</i>	Central Processing Unit
<i>GPU</i>	Graphics Processing Unit
<i>MSE</i>	Mean Squared Error (střední kvadratická chyba)
<i>RMSE</i>	Root Mean Squared Error (odmocnina střední čtvercové chyby)
<i>SEM</i>	Standard Error of the Mean (střední chyba průměru)
<i>MAPE</i>	Mean Absolute Percentage error (střední absolutní procentuální chyba)
<i>GUI</i>	Graphical User Interface
<i>XML</i>	Extensible Markup Language

<i>XAML</i>	Extensible Application Markup Language
<i>EAP</i>	Event-based Asynchronous Pattern
<i>OpenCL</i>	Open Computing Language
<i>CUDA</i>	Compute Unified Device Architecture
<i>C++ AMP</i>	C++ Accelerated Massive Parallelism
<i>PE</i>	Processing Elements
<i>DI</i>	Dependency injection
<i>IoC</i>	Inversion of Control
<i>MVVM</i>	Model View ViewModel
<i>MVC</i>	Model View Controller
<i>EAP</i>	Event-based Asynchronous
<i>TAP</i>	Task-based Asynchronous Pattern
<i>PLINQ</i>	Parallel LINQ

1 ÚVOD

Práce se zabývá predikcí základních parametrů distribuce tepla v systému centrálního zásobování teplem (SCZT). Cílem práce je navržení nových metod a postupů využitelných pro tvorbu softwarového nástroje, který může v praxi sloužit operátorům a vedoucím pracovníkům SCZT jako simulátor pro plánování teploty topné vody díky predikci teploty vratné vody a hmotnostního průtoku. Při predikci se zadává teplota topné vody a predikce venkovní teploty vzduchu a predikuje se jejich vliv na teplotu vratné vody a hmotnostního průtoku. Vstupními veličinami predikce je žádaná teplota topné vody a predikce venkovní teploty vzduchu. Součástí predikce je i určení hodnot tepelného zatížení.

Důraz je kladen na jednoduché nasazení v SCZT. Potřebnými parametry pro identifikaci modelu jsou teplota topné a vratné vody, hmotnostní průtok a venkovní teplota vzduchu.

V práci je nejprve popsán současný stav problematiky. Dále je pro potřeby práce definován model systému centrálního zásobování teplem a metody pro výpočet jeho potřebných charakteristik, jako je dopravní zpoždění, dodávaný výkon a tepelného zatížení primární sítě. V následující části jsou popsány metody aproximace tepelného zatížení a to nejprve funkce popisující jeho závislost na venkovní teplotě a poté funkce jeho závislosti na hodině dne. Dále je uveden postup výpočtu rozdílu teplot na vstupu a výstupu do těžiště systému. Parametry aproximačních funkcí jsou určovány pomocí optimalizačních algoritmů. V práci jsou dále popsány vybrané optimalizační algoritmy a způsob jejich paralelizace.

Kromě výpočtových metod a postupů se práce zabývá softwarovými metodami implementace navržených metod. Zvolené softwarové řešení by mělo umožňovat znovuvyužití navržených modulů v desktopových i klient-server aplikacích. Návrh by měl také umožnit agregaci zdrojů dat od různých poskytovatelů a v různých formátech bez nutnosti změny vlastní aplikační a prezentační logiky.

V praktické části je popsána implementace výpočtových a softwarových metod jako doplňku pro Microsoft Excel 2010 a vyšší. Ovšem základní moduly jsou přenositelné i pro jiné platformy, například mobilní telefony nebo tablety. Metody budou ověřeny na datech ze dvou nezávislých SCZT. V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky a návrh postupu dalších prací.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 Predikce parametrů distribuce tepla v SCZT

Madsen a kol. (1994) [1] popisuje kvalitativní řízení, kdy regulovanou veličinou je pouze teplota topné vody a jako klíčové uvádí snižování teploty topné vody za dodržení následujících podmínek:

- Dodávané teplo uspokojí požadavky spotřebitelů v jakémkoliv čase.
- Každý zákazník má garantované minimální dodávané teplo v závislosti na venkovní teplotě vzduchu.
- Změny teplot topné vody v čase jsou v akceptovatelném rozsahu.

System rozdělit na kritické body v distribuční síti, pro které platí, že pokud jsou uspokojeny požadavky zákazníků na dodávané teplo v těchto bodech, tak budou uspokojeny požadavky všech zákazníků.

Benonysoon a kol. (1995) [2] prezentuje simulaci distribuční sítě pomocí metod uzlů (node method), kdy se zabývá především distribucí tepla. Tepelná síť systému centrálního zásobování teplem (SCZT) je popsána uzly, jejich spojeními a dostupnými technickými informacemi jako je tepelná kapacita nebo průměr potrubí. Pro sestavení systému je nutné znát predikci dodávaného tepla pro všechny uzly. Tepelné ztráty jsou dle autora úměrné rozdílu teplot topné vody a průměrné teploty půdy v okolí rozvodné sítě.

Pálson a kol. (1999) [3] popisuje komplexní problematiku modelování SCZT. Velká pozornost je věnována aproximaci složitých rozvodných sítí jednoduššími ekvivalentními modely. Tyto metody agregace sítí detailně popsal také autor Helge a kol. (2004) [37]. Pálson a kol. se dále věnují metodám pro modelování distribuce toku a teploty v rozvodné síti a také operativním řízením SCZT.

Metody pro modelování distribuce teploty vody v rozvodné síti rozdělují na:

- Modelování fyzické struktury a chování systému, kdy se bere v úvahu topologie sítě a také fyzikální vlastnosti rozvodných trubek. Autor zmiňuje metodu prvků (the element method) a metodu uzlů (the node method) Benonysson (1991) [4] a Zhao (1995) [5],
- Matematické modelování s využitím metod „černé skříňky“, typickým zástupcem je analýza časových řad.

Jako hlavní faktory ovlivňující změny teplot v SCZT uvádí:

- Změny teplot vody prováděné operátorem.
- Změny teplot vody způsobených ochlazením topného média ve výměnících. Autoři uvádí, že tyto změny jsou v čase relativně stabilní, ale může docházet i rychlým změnám v závislosti na typu odběratelů.
- Tepelné ztráty v rozvodné síti. Tyto ztráty jsou stabilní v čase ale přesto významné.

Jako hlavní faktory ovlivňující spotřebu tepla uvádí:

- Vytápění domů a domácností, které závisí na venkovní teplotě, slunečním záření, rychlosti větru a také návyky spotřebitelů.
- Spotřebu teplé užitkové vody, která je závislá na chování obyvatel připojených do SCZT.

Jako nejvýznamnější metody pro predikci dodávaného tepla uvádí metody analýzy časových řad jako Autoregressive Moving Average with Extraneous Input (ARMAX). V části věnované výměníkovým stanicím popisuje jednoduchý model deskového tepelného výměníku založeného na tepelné bilanci výměníku a vztahu pro výpočet sdílení tepla založeného na výrazu pro střední logaritmický spád (Logarithmic Mean Temperature Difference - LMTD) (definovaný například také ve zdoji [6]). Autoři zanedbávají tepelné ztráty výměníku a také předpokládají známé, nejlépe konstantní teploty chladnější tekutiny.

Heller (Heller 2000) [7] ve své práci uvádí přehled metod pro modelování dodávaného tepla. Metody rozděljuje na top-down a bottom-up přístup, kdy u prvního je modelován celý systém jako celek a od něj je pak odvozena spotřeba jednotlivých subsystémů. U druhého přístupu jsou modelováni jednotliví spotřebitelé a celkové dodávané teplo je určeno jejich agregací. V práci dále uvádí následující metody pro modelování dodávaného tepla:

- Jednoduché metody založené prakticky na vyhledávacích tabulkách:
 - Metody založené na procentuálním rozložení dodávek tepla pro jednotlivé měsíce nebo období.
 - Energetické charakteristiky (Energy Characteristics, Signature Models), kdy jsou použité jednoduché funkce pro určení závislosti dodávaného tepla na vybraném faktoru, například venkovní teplotě vzduchu. Podobným způsobem se určuje pomocí ekvitemní charakteristiky (křivky) závislost mezi teplotou topného média a venkovní teplotou vzduchu.
- Metody černé skříňky (Black-Box).
- Dynamické modelování.
 - Stochastické modelování, které se týká především popisu chování uživatelů.
 - Deterministické modelování prostřednictvím fyzikálních principů.

Autor také zmiňuje normalizaci naměřených hodnot pomocí metody degree-day. Z hlediska určení závislosti dodávaného tepla na různých faktorech autor zmiňuje především práce z Technical University of Denmark, kde Werner (1994) [8] definoval množinu základních prvků ovlivňujících množství dodávaného tepla, Aronsson (1996) [9] utřídil tyto elementy do jednotlivých komponent (otop, příprava teplé užitkové vody, ztráty a dodatečná zátěž v pracovních dnech (additional workday loads), Larsson (1999) [11] poté určil korelaci mezi prvky

ovlivňujícími spotřebu tepla a vlastní spotřebou. Autor poté navrhuje fyzikální modelování jednotlivých prvků na nejnižší úrovni (například obytného domu) a určení celkové spotřeby tepla na základě agregace těchto prvků (The Bottom-Up Approach).

Bøhm (2002) [12] popisuje především možnosti agregace komplexních rozvodných sítí a tvrdí, že je možné zjednodušit model rozvodné sítě až o 80 procent bez ztráty přesnosti.

Dotzauer [13] ve své práci navrhuje jednoduchou metodu vhodnou pro praktické použití, které je specifické nedostupnými, nepřesnými a chybovými daty a menší spolehlivostí předpovědi počasí. Dodávané teplo aproximuje pomocí sumy dvou komponent, kdy první komponenta představuje závislost části dodávaného tepla na venkovní teplotě vzduchu a je vyjádřena po částech lineární funkcí s devíti parametry. Druhá komponenta potom představuje závislost části dodávaného tepla na sociálním chování spotřebitelů během týdne a je popsána 168 parametry, kdy každý parametr popisuje jednu hodinu v týdnu.

Saarinen ve své práci [15] popisuje způsob výpočtu dopravního zpoždění vzhledem k těžišti systému dle celkového objemu SCZT. V práci navrhuje a srovnává dva modely. První model (statický) modeluje tepelné zatížení jako sumu následujících komponent:

- Lineární závislost na aktuální venkovní teplotě vzduchu.
- Závislost na průměru venkovní teploty vzduchu v jednom měsíci.
- Denní průběh pracovních dnů a dnů pracovního volna každého měsíce aproximovaný polynomem desátého stupně.

Druhý model (dynamický) využívá pro modelování tepelného zatížení ARX model, kdy vstupem je venkovní teplota vzduchu. Autor uvádí, že složitější modely ARMAX a metodologie Box-Jenkins nepřinesly významné zlepšení kvality predikce. Při srovnání statického a dynamického modulu potom vychází

dle autora lépe model dynamický. Dále autor popisuje strategii řízení SCZT pro minimalizaci teploty topného média na výstupu ze zdroje tepla.

Šípál [19] ve své práci navrhuje modelovat tepelné zatížení, popsané denní diagramem dodávky tepla (DDDT), složkovým modelem. Model se skládá z trendové složky, sezónní týdenní složky a sezónní denní složky. Chramcov [20][21] navrhl a implementoval ve své práci výpočet předpovědi DDDT a rozpracoval metodologii Box-Jenkinse [22] tak, aby byla použitelná pro predikci DDDT v SCZT. Balátě a kolektiv [23][24][24] se ve své práci zabývá především strategií kvantitativně-kvalitativního řízení s využitím DDDT. Vašek a kol. [26][27][28] vychází ve své práci z využití podobného dne, jehož naměřené parametry poté aplikuje při diskrétní simulaci založené na fyzikální simulaci a zjednodušeném modelu rozvodné sítě. Vařacha a kol. ve své práci [29][30] zkoumá aproximaci tepelné zátěže pomocí neuronových sítí tvořených a optimalizovaných pomocí algoritmu Analytic Programming (AP) (Analytické programování) [31][32][33]. Neuronové sítě využité pro predikci v SCZT jsou uvedeny také v [34][35]. Princ ve své práci [36] popisuje metodu okruhových průtoků sloužící pro simulaci tlakových, průtokových a teplotních poměrů v distribuční síti SCZT.

2.2 Faktory ovlivňující tepelné zatížení

Heller uvádí následující seznam komponent tepelného zatížení (Heller 2000)[7]:

- otop (space heating),
- příprava teplé užitkové vody (TUV) (hot water preparation),
- ztráty,
- dodatečná spotřeba v pracovních dnech (additional workday loads).

Heller dále ve své práci uvádí odhad podílu jednotlivých komponent na celkové tepelné zátěži. Vybrané hodnoty jsou publikované v Tabulce 1.

Tabulka 1: Podíl jednotlivých komponent, převzato [7]

Komponenta	Odhad podílu v %	
	Werner [8]	Aronsson [9]
Otop	60	
TUV	30	11-15
Ztráty	6-8	
Dodatečná spotřeba v pracovních dnech	4-2	

Karafiát uvádí ve sborníku technických řešení [10] následující podíly jednotlivých komponent pro rozsáhlou městskou horkovodní SCZT a menší sídlištní teplovodní SCZT (Tabulka 2)

Tabulka 2: Podíl komponent dle velikosti SCZT, převzato z [10]

Komponenta	Odhad podílu v %	
	Rozsáhlá městská horkovodní SCZT	Menší sídlištní teplovodní SCZT
Otop	66	69
TUV	22	25
Ztráty	12	6

Heler [7] dále uvádí srovnání významnosti meteorologických vlivů na tepelnou zátěž (Tabulka 3).

Tabulka 3: Srovnání významnosti meteorologických vlivů

Parametr	Odhad významnosti v %
Venkovní teplota vzduchu	83
Teplota studené vody	8,8
Intenzita slunečního záření	7,7
Intenzita a směr větru	0,2
Vlhkost vzduchu	<0,1

Dotzauer (2002) [13] a Arvastson (2001) [14] zdůrazňují, že nejvýznamnějšími faktory ovlivňujícími dodávku tepla je venkovní teplota vzduchu a sociální chování spotřebitelů. Saarinen [15] uvádí, že dodatečné zahrnutí vlivu rychlosti větru a intenzity slunečního záření nemělo výrazný vliv na zvýšení kvality predikce. K obdobným závěrům došel také Vařacha [30], kdy zahrnutí vlivu relativní vlhkosti a slunečního svitu výrazně nezvýšilo kvalitu predikce. Je možné udělat závěr, že nejvýznamnějším meteorologickým vlivem je venkovní teplota vzduchu a z hlediska komponent je nejvýznamnější otop a příprava teplé užitkové vody. Práce navazuje především na práce autorů Dotzauer [13], Saarinen [15], Šípal [19] a Chramcov [20][21]. Stejně jako ve zdroji [13] a [15] využívá aproximačních funkcí pro modelování dodávaného tepla. Cílem je ovšem na rozdíl od zdroje [13] snížení počtu parametrů. Dalším cílem je snadná interpretace parametrů modelu, což není možné například u metod černých skříněk, jako jsou například neuronové sítě. Zatímco se všechny zmíněné zdroje zabývají především predikcí dodávaného tepla, tak cílem navržené metody je, i bez podrobného modelování tepelné sítě, predikovat navíc i teplotu vratné vody a souvisejícího průtoku.

3 CÍLE DOKTORSKÉ DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem práce je navržení nových metod a postupů pro predikci časových průběhů a charakteristik procesů probíhajících v SCZT, které budou sloužit operátorům SCZT jako simulátor pro plánování teploty topné vody a také vedoucím pracovníkům jako nástroj pro podporu jejich rozhodování.

Dílčí cíle disertační práce byly stanoveny takto:

1. Sestavení modelu distribuce tepla v teplovodních a horkovodních SCZT.
2. Návrh vhodných funkcí pro aproximaci vybraných základních závislostí ve vytvořeném modelu.
3. Návrh vhodných optimalizačních metod pro určování parametrů zvolených aproximačních funkcí modelu.
4. Návrh funkcí a postupů predikce základních procesů distribuce tepla v SCZT.
5. Vypracování uživatelského programu pro predikci parametrů distribuce tepla v SCZT.
6. Testování navržené metody predikce na konkrétních SCZT.

4 ZVOLENÉ METODY

V této kapitole je nejprve popsán systém centrálního zásobování teplem a jeho model. Dále je popsána metoda výpočtu dodávaného výkonu do primární sítě. Na základě metody odhadu dopravního zpoždění je následně popsán způsob výpočtu tepelného zatížení.

V práci jsou použity následující vědecko-výzkumné metody:

- Modelování.
- Numerické matematické metody (aproximace).
- Metody softwarového inženýrství.

4.1 Systém centrálního zásobování teplem

Systém centrálního zásobování teplem (SCZT) můžeme z hlediska procesů rozdělit na:

- výrobu,
- distribuci,
- spotřebu.

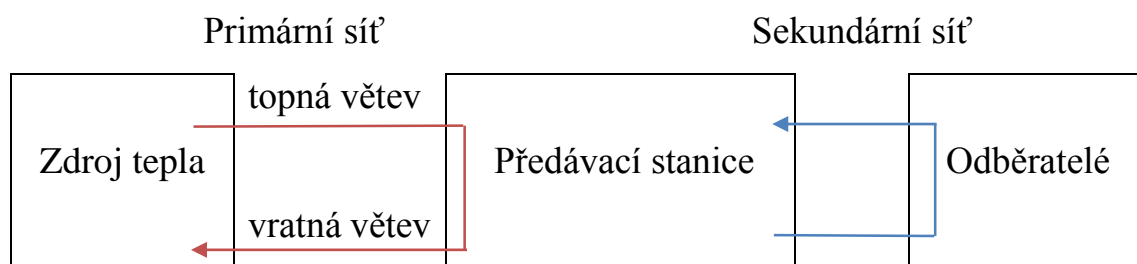
Z hlediska struktury můžeme SCZT rozdělit dle normy ČSN 38 3350 [38] na:

- zdroje tepla (základní, špičkové),
- rozvodné tepelné sítě,
- předávací stanice,
- vnitřní zařízení včetně otopných těles apod.

Norma ČSN 38 3350 [38] definuje rozvodnou tepelnou síť jako „část tepelné sítě od tepelných napaječů (primární) nebo od předávacích stanic (sekundární – zpravidla obsahují i potrubí teplé užitkové vody) k jednotlivým objektům.“. Norma dále definuje tepelnou síť jako „komplex objektů a zařízení pro dopravu

tepla za zdrojů, nezávisle na způsobu využití tepla“. Tepelný napaječ potom norma definuje jako „část tepelné sítě od zdroje tepla do jednotlivých oblastí nebo obytných souborů a průmyslových závodů k hydraulicky nejvzdálenějšímu odběrateli.“

Pro potřeby této práce budeme definovat pojmy primární síť jako část rozvodné tepelné sítě od zdroje tepla k předávacím stanicím a jako sekundární síť jako část rozvodné tepelné sítě od předávacích stanic k odběratelům. Obrázek 1 schematicky zobrazuje primární a sekundární síť. Topná větev primární sítě je potom část primární sítě od zdroje tepla ke vstupu do předávací stanice. Vratná větev primární sítě je část primárního sítě od výstupu předávací stanice po vstup do zdroje tepla. Primární a sekundární části tepelné sítě mohou být často provozovány samostatnými organizačními jednotkami nebo dokonce i nezávislými firmami. Často proto může být obtížné získat a centralizovat potřebná data.



Obrázek 1: Primární a sekundární síť

Vyhláška č. 193/2007 Sb. [39] z hlediska teploty teploty uvádí: „Pro vytápění a přípravu teplé vody a všude tam, kde to pro daný účel postačuje, volí se přednostně pro přenos tepelné energie teplá voda do 90 st. C nebo do 115 st. C. Horká voda nad 115 st. C se použije pro rozsáhlé tepelné sítě určené k zásobování rozlehlých sídlišť, obcí a vzdálených odběratelů. Pára jako teplotní látka se použije jen tam, kde je to tepelně-technicky opodstatněné a zdůvodněné optimalizačním výpočtem, a zejména pro technologické účely.“

Norma ČSN 38 3350 [38] uvádí „V soustavách zásobování teplem se pro vytápění, větrání a teplou užitkovou vodu obytných, veřejných a průmyslových budov jako teplonosná látka používá voda.“ A dále dodává: „Z racionalizačního energetického hlediska se doporučuje stávající parní tepelné sítě postupně přebudovat na vodní.“

Tato práce se bude zabývat pouze případy kdy je teplonosným médiem voda a to jak teplá voda, tak horká voda.

Vyhláška č. 194/2007 Sb. [40] definuje období otopného období: „Otopné období začíná 1. září a končí 31. května následujícího roku.“. Zahájení dodávek potom definuje následovně: „Dodávka tepelné energie se zahájí v otopném období, když průměrná denní teplota venkovního vzduchu v příslušném místě nebo lokalitě poklesne pod +13 st. C ve 2 dnech po sobě následujících a podle vývoje počasí nelze očekávat zvýšení této teploty nad +13 st. C pro následující den.“.

4.2 Tepelný výkon dodávaný do primární sítě

Dodávaný tepelný výkon do primární sítě je možné určit jako [15]:

$$Q_{\text{dodávaný}}(t) = c_p \dot{m}(t)(\vartheta_{\text{topná}}(t) - \vartheta_{\text{vratná}}(t)) \quad (1)$$

kde:

$Q_{\text{dodávaný}}(t)$ je dodávaný výkon do primární sítě,

c_p je měrná tepelná kapacita topné vody primární sítě,

$\dot{m}(t)$ je hmotnostní průtok primární sítě,

$\vartheta_{\text{topná}}(t)$ je teplota topné vody,

$\vartheta_{\text{vratná}}(t)$ je teplota vratné vody,

4.3 Tepelné zatížení

Tepelné zatížení pro potřeby této práce představuje spotřebu tepla v čase t včetně ztrát. Dodávaný výkon do primární sítě nemusí odpovídat tepelnému zatížení. Pokud je dodávaný výkon vyšší než tepelné zatížení (spotřeba), tak dochází k akumulaci tepla a může dojít ke zvýšení teploty vratné vody. V případě že je dodávaný výkon nižší než potřeba a tepelné zatížení potom neodpovídá potřebě tepla, tak nejsou uspokojeny potřeby odběratelů.

Při určení tepelného zatížení SCZT musíme vzít v úvahu také následující fakta:

- SCZT se může skládat z řádově desítek až stovek předávacích stanic.
- V systému je velké a variabilní dopravní zpoždění (řádově hodiny).

4.3.1 Dopravní zpoždění

Pokud nejsou dostupná data z předávacích stanic, je možné určit tepelné zatížení vzhledem k těžišti SCZT v čase. Těžiště určíme jako dobu $D_{topná}$, za kterou vstoupí (proteče) ze zdroje do distribuční sítě polovina objemu vody v primární síti SCZT [15]:

$$R = \int_{t-D_{topná}}^t \dot{m}(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$R = \int_t^{t+D_{vratná}} \dot{m}(\tau) d\tau \quad (3)$$

kde:

$D_{topná}$ je neznámé dopravní zpoždění topné větve primární sítě,

$D_{vratná}$ je neznámé dopravní zpoždění vratné větve primární sítě,

R je známá konstantní hmotnost topné vody odpovídající polovině objemu primární sítě.

V reálném provozu jsou naměřená data, v tomto případě hmotnostní průtok, vzorkována. Hmotnostní průtoky $\dot{m}(t_i)$ jsou vzorkovány v časech t_i kde $i = 1, 2, \dots, n-1, n, m+1, \dots, m$, kde m je počet vzorků a n je index vzorku, ke kterému určujeme dopravní zpoždění, tj vzorek, jenž se v „daném čase nachází“ v těžišti. Dopravní zpoždění topné větve v čase t_n se určí jako $D_{topná} = t_n - t_{n0}$, kdy t_{n0} se určí, jako minimální čas pro který platí:

$$\sum_{i=n}^{n0} (t_i - t_{i-1}) \dot{m}(t_{i-1}) \leq R \quad (4)$$

Dopravní zpoždění vratné větve v čase t_n se určí jako $D_{topná} = t_{n1} - t_n$, kdy t_{n1} se určí, jako maximální čas pro který platí:

$$\sum_{i=n1}^n (t_i - t_{i-1}) \dot{m}(t_{i-1}) \leq R \quad (5)$$

4.3.2 Výpočet tepelného zatížení

Po určení dopravního zpoždění můžeme určit tepelné zatížení vztažené k těžišti systému následujícím způsobem [15]:

$$Q_{zatížení}(t) = c_p \dot{m}(t) (\vartheta_{vstup}^{těžiště}(t) - \vartheta_{výstup}^{těžiště}(t)) \quad (6)$$

kde:

$Q_{zatížení}(t)$ je tepelné zatížení,

c_p je měrná tepelná kapacita vody primární sítě,

$\vartheta_{vstup}^{těžiště}(t)$ je teplota vody na vstupu do těžiště primární sítě SCZT.

$\vartheta_{výstup}^{těžiště}(t)$ je teplota vody na výstupu z těžiště primární sítě SCZT.

Teplota vody na vstupu do těžiště primárního systému se určí jako:

$$\vartheta_{vstup}^{těžiště} = \vartheta_{topná}(t - D_{topná}) \quad (7)$$

A teplota vody na výstupu z těžiště primární sítě SCZT se určí jako:

$$\vartheta_{výstup}^{těžiště} = \vartheta_{vratná}(t + D_{vratná}) \quad (8)$$

4.4 Aproximace tepelného zatížení

Tepelné zatížení je aproximováno s pomocí součinu dvou funkcí, z nichž každá zachycuje vliv jednoho z podstatných faktorů ovlivňující tepelné zatížení. První funkce určuje hodnotu tepelného zatížení v závislosti na venkovní teplotě vzduchu ϑ_{ex} . Druhá funkce určuje koeficient reprezentující průběh tepelného zatížení v závislosti na hodině dne $h = 0, 1, \dots, 23$ a typu dne $daycat = \{work, free\}$, kde *work* označuje pracovního volna a *free* označuje den pracovního volna. Ke koeficientu je přičtena 1, tak aby koeficient $f_{\check{c}as}(hour(t), day(t)) > 0$ reprezentoval relativní podíl tepelného zatížení závislého na hodině dne na tepelném zatížení závislém na venkovní teplotě vzduchu.

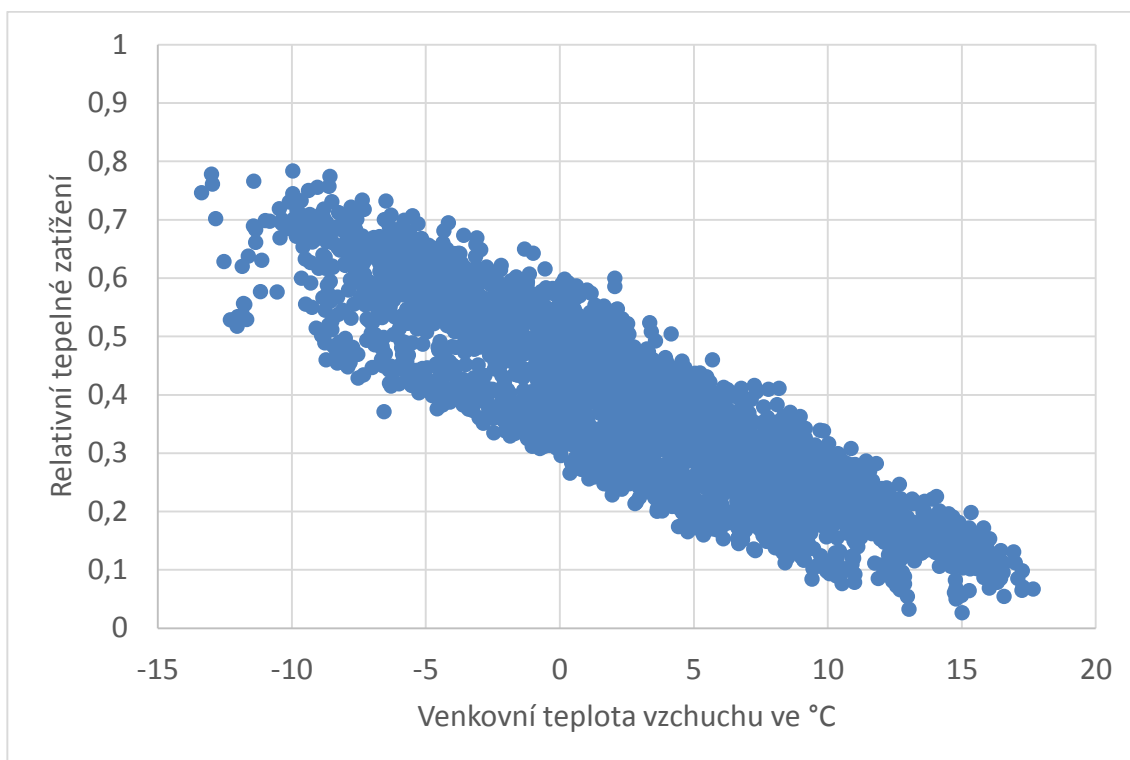
Tepelné zatížení je tedy definováno následujícím vztahem:

$$f_{Q_{zatížení}}(t) = \left(\left(1 + f_{\check{c}as}(hour(t), day(t)) \right) * f_{teplota}(\vartheta_{ex}(t)) \right) \quad (9)$$

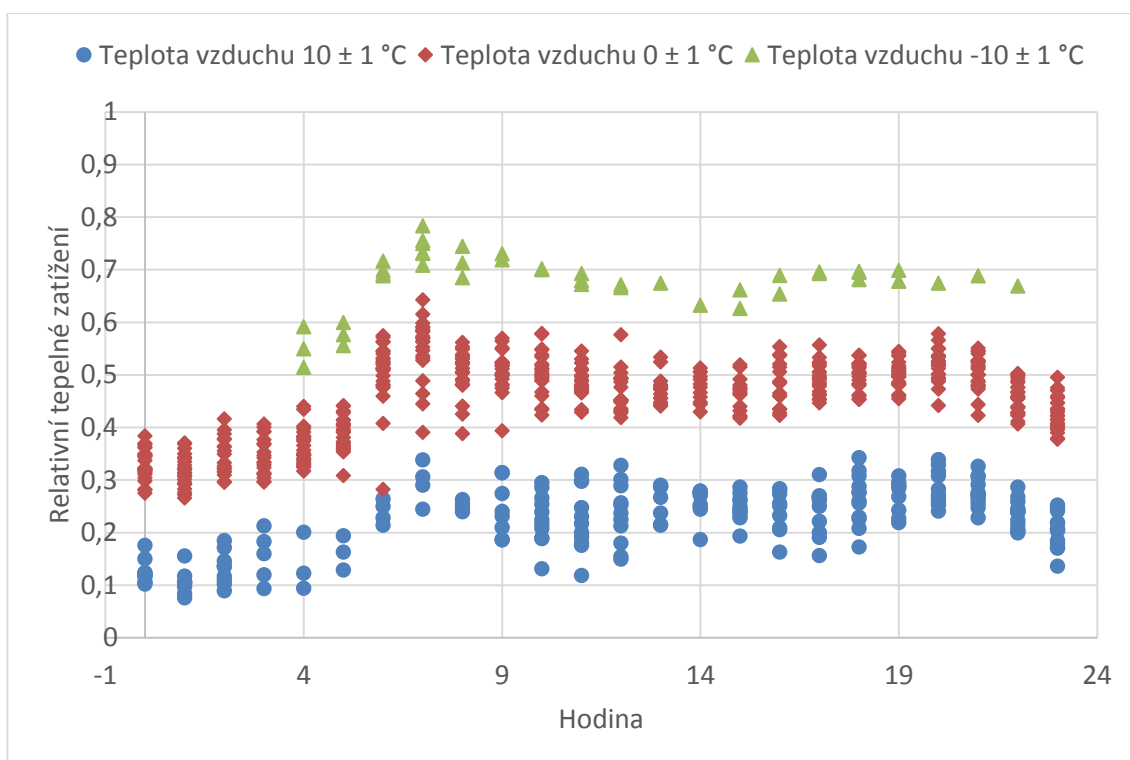
kde:

- $f_{Q_{zatížení}}(t)$ je funkce aproximace tepelného zatížení,
- $f_{\check{c}as}(h, daycat)$ je funkce koeficientu závislosti na hodině dne a typu dne,
- $f_{teplota}(\vartheta_{ex})$ je funkce závislosti tepelného zatížení na venkovní teplotě vzduchu,
- $hour(t)$ je funkce vracející hodinu dne,
- $day(t)$ je funkce typu dne, $day(t) = daycat = \{work, free\}$, kde *w* označuje pracovního volna a *f* označuje den pracovního volna.
- ϑ_{ex} je venkovní teplota vzduchu.

Obrázek 2 znázorňuje ukázkou vypočteného tepelného zatížení podle vztahu (6) pro SCZT A pro období 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011. Obrázek 3 potom zobrazuje závislost tepelného zatížení pro stejné období ale v závislosti na hodině ve dni a to pro venkovní teploty vzduchu 10 ± 1 °C, 0 ± 1 °C a -10 ± 1 °C.



Obrázek 2: Závislost tepelného zatížení na venkovní teplotě vzduchu



Obrázek 3: Závislost tepelného zatížení na hodině ve dni

4.5 Funkce závislosti tepelného zatížení na venkovní teplotě

Pro aproximaci složky výkonu závislé na venkovní teplotě vzduchu byly zvoleny a otestovány následující funkce:

- Richardsova křivka (varianta „Unified-Richards model“) (URM) [16][18].
- Polynomiální funkce 4. řádu (P4).
- Po částech lineární funkce (PCL)[18].

4.5.1 Richardsova křivka

Richardsova křivka je součástí rodiny růstových křivek, které jsou vhodná pro modelování fyzikálního procesu, i když tento proces není znám [16]. V této práci je využita varianta označována autory jako „Unified-Richards model“ a má v tomto případě tvar [17] :

$$A \left(1 + (d - 1) e^{\frac{-K(t-T_i)}{d^{(1-d)}}} \right)^{\frac{1}{(1-d)}} \quad (10)$$

kde:

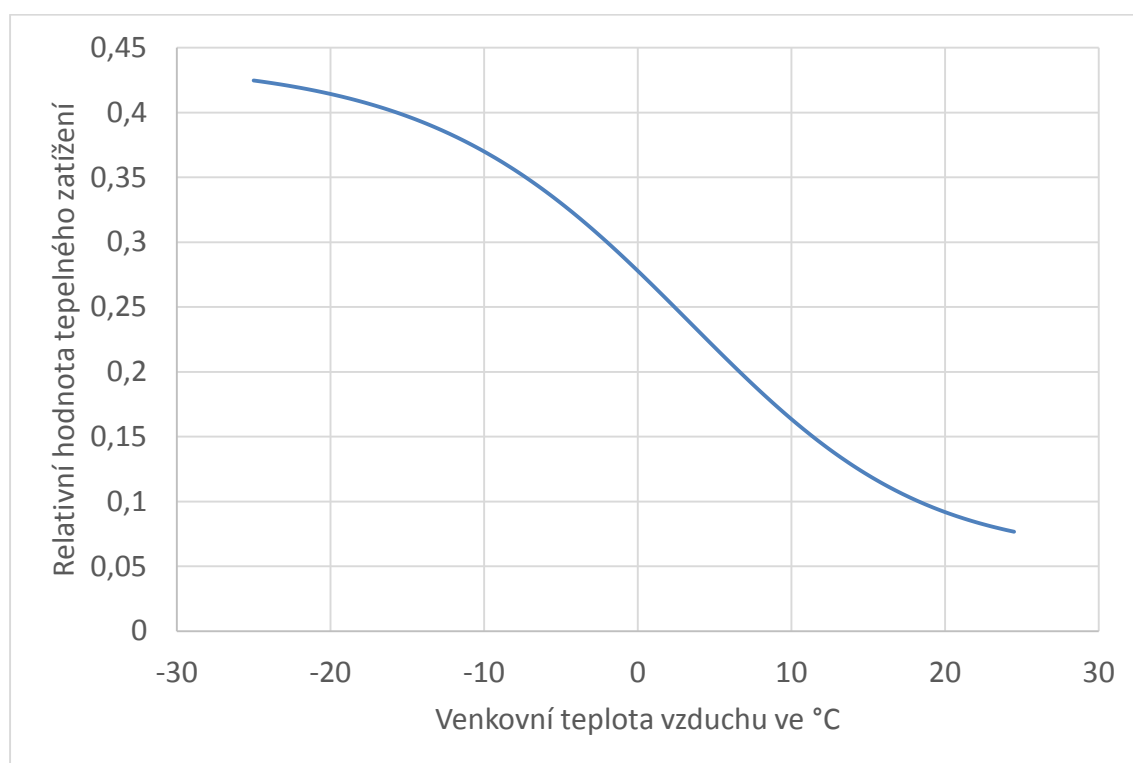
A	je hodnota horní asymptoty,
K	je sklon v inflexním bodu,
T_i	je čas inflexního bodu,
$d^{\frac{d}{(1-d)}}$	je relativní podíl horní asymptoty v čase inflexního bodu.

Protože hodnota dolní asymptoty by byla nulová, což neodpovídá realitě, je v následujícím vztahu použita konstanta Q_{min} reprezentující minimální hodnotu tepelného zatížení.

Protože v našem případě nereprezentuje křivka růst v čase, ale závislost na venkovní teplotě ϑ_{ex} respektive teplotě ϑ_{ex}^i , má použitý vztah následující tvar:

$$f_{GLC}(\vartheta_{ex}) = Q_{min} + A \left(1 + (d - 1)e^{\frac{-K(\vartheta_{ex} - \vartheta_{ex}^i)}{d}} \right)^{\frac{1}{1-d}} \quad (11)$$

Obrázek 4 znázorňuje ukázkou Richardsovy křivky s parametry získanými v kapitole měření pro SCZT A, období 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011: $A = 46345, K = -0,04, \vartheta_{ex}^i = 4,60, d = 1,07, Q_{min} = 14859$.



Obrázek 4: Ukázkou Richardsovy křivky

4.5.2 Polynomiální funkce

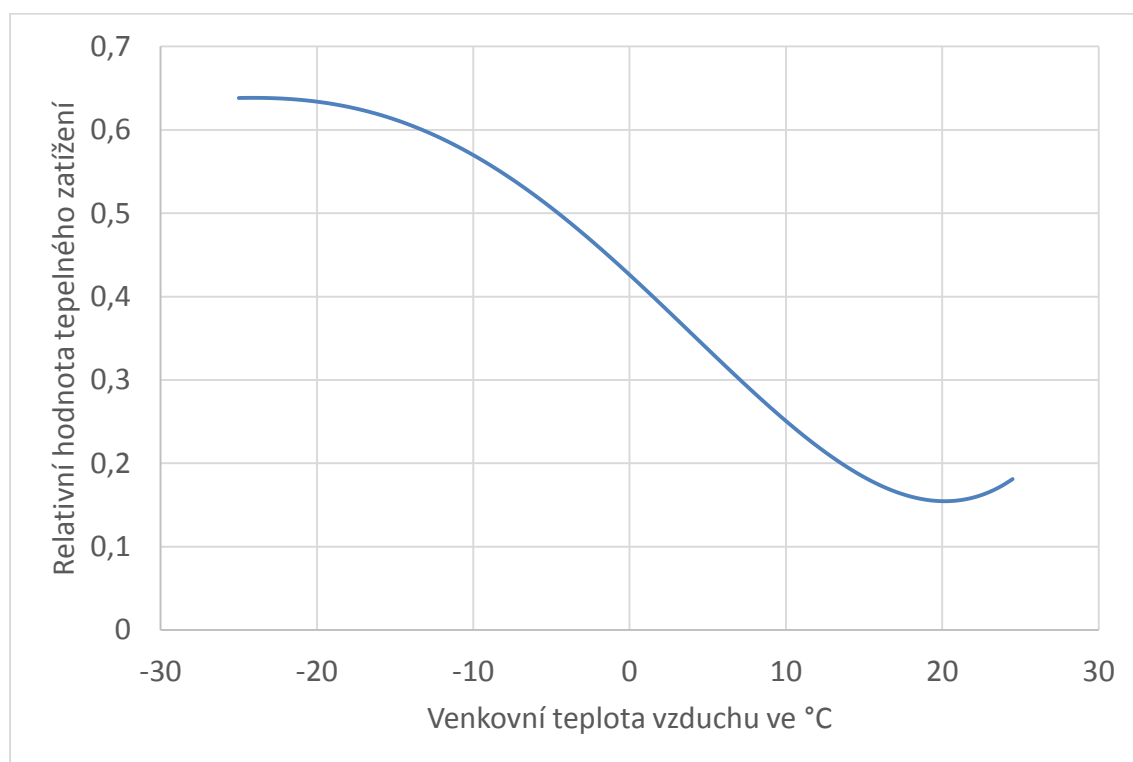
Další testovaná funkce použitá pro aproximaci závislosti tepelného zatížení na venkovní teplotě vzduchu je polynom čtvrtého stupně ve tvaru:

$$f_{P4}(\vartheta_{ex}) = a_0 + a_1\vartheta_{ex} + a_2\vartheta_{ex}^2 + a_3\vartheta_{ex}^3 + a_4\vartheta_{ex}^4 \quad (12)$$

kde a_1, a_2, a_3, a_4 jsou koeficienty polynomu.

Výhodou je možnost použití lineární regrese, nevýhodou je, že není zaručena konvergence k horní nebo dolní asymptotě.

Obrázek 5 znázorňuje ukázkou polynomiální funkce s parametry získanými v kapitole měření pro SCZT A, období 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011: $a_0 = 39238,33$ $a_1 = -1587,30$ $a_2 = -35,94$ $a_3 = 1,06$ $a_4 = 0,11$. Jak je patrné ze zobrazeného průběhu funkce, tak od teploty vyšší než $15\text{ }^\circ\text{C}$, tedy mimo topnou sezónu, polynomiální funkce opět roste, takže není možné ji v tomto intervalu použít.



Obrázek 5: Ukázkou polynomiální funkce

4.5.3 Po částech lineární funkce

Pro aproximaci závislosti tepelného zatížení na venkovní teplotě vzduchu je možné také použít po částech lineárních funkcí [18] kdy následující vztah definuje segment j – tý segment lineární funkce:

$$f_{PLC_i}(\vartheta_{ex}) = \frac{(y_{j+1} - y_j)\vartheta_{ex} + y_j x_{j+1} - y_{j+1} x_j}{x_{j+1} - x_j} \quad (13)$$

kde:

- j je index segmentu $j = 1 \dots m - 1$,
- m je počet segmentů,
- (x_j, y_j) souřadnice prvního koncového bodu segmentu,
- (x_{j+1}, y_{j+1}) souřadnice druhého koncového bodu segmentu.

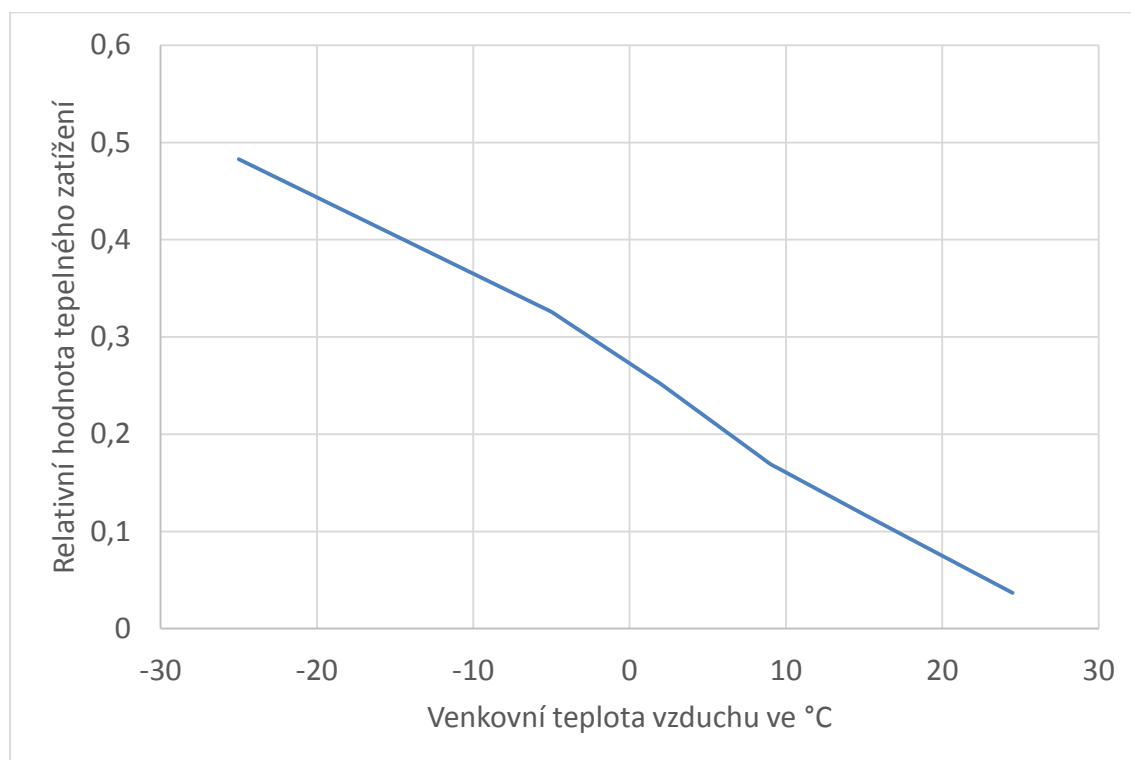
Výhodou funkce je, že pokud jsou zadané souřadnice x jako konstanty, je možné nalézt zbývající parametry pomocí lineární regrese. Obrázek 6 znázorňuje ukázkou po částech spojitě funkce s indexy získanými v kapitole měření pro SCZT A, období 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011 a uvedenými v Tabulce 4 a Tabulce 5.

Tabulka 4: Ukázkové souřadnice x funkce PCL

Souřadnice	Hodnota
x_0	-25
x_1	-5
x_2	2
x_3	9
x_4	15
x_5	25

Tabulka 5: Ukázkové souřadnice y funkce PCL

y_0	137040,48
y_1	88366,90
y_2	64047,56
y_3	32480,06
y_4	14407,28
y_5	-8442,04



Obrázek 6: Ukázka po částech lineární funkce

4.6 Funkce koeficientů závislosti tepelného zatížení na hodině dne

Druhou komponentou aproximace tepelného zatížení je komponenta závislosti na hodině ve dni. Ta zachycuje také přípravu teplé užitkové vody a dodatečnou spotřebu v pracovních dnech.

Na základě studia literatury [13][15][19][20][21] a výsledků experimentů prezentovaných v kapitole měření se ukázalo vhodné rozlišovat z důvodu zvýšení přesnosti aproximace dvě kategorie dnů – pracovní dny a dny pracovního klidu. To znamená, že se použijí dvě aproximační funkce a jejich parametry se určí samostatně:

$$f_{\text{čas}}(h, \text{daycat}) = \begin{cases} f_{\text{free}}(h) & \text{když } \text{daycat} = \text{free} \\ f_{\text{work}}(h) & \text{když } \text{daycat} = \text{work} \end{cases} \quad (14)$$

kde:

$f_{\text{free}}(h)$ je funkce koeficientu závislosti na hodině dne a typu dne aproximace zatížení pro pracovní den,

$f_{\text{work}}(h)$ je funkce koeficientu závislosti na hodině dne a typu dne aproximace tepelného zatížení pro den pracovního klidu,

daycat je typ dne $\text{daycat} = \{\text{work}, \text{free}\}$, kde work označuje pracovního volna a free označuje den pracovního volna.

Jako aproximační funkce $f_{\text{free}}(h)$ nebo $f_{\text{work}}(h)$ byly zvoleny a testovány:

- funkce označované jako EGH (Hybrid of Gaussian and truncated exponential functions) [37] a
- hodinové koeficienty zatížení (Hourly Coefficients - HRS).

4.6.1 Aproximační funkce Hybrid of Gaussian and truncated exponential

Funkce Gaussian and truncated exponential function (EGH) je definována následujícím vztahem [37]:

$$f_{EGH} = \begin{cases} H \exp\left(\frac{-(h - h_m)^2}{2\sigma^2 + \tau(h - h_m)}\right), & 2\sigma^2 + \tau(h - h_m) > 0 \\ 0, & 2\sigma^2 + \tau(h - h_m) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

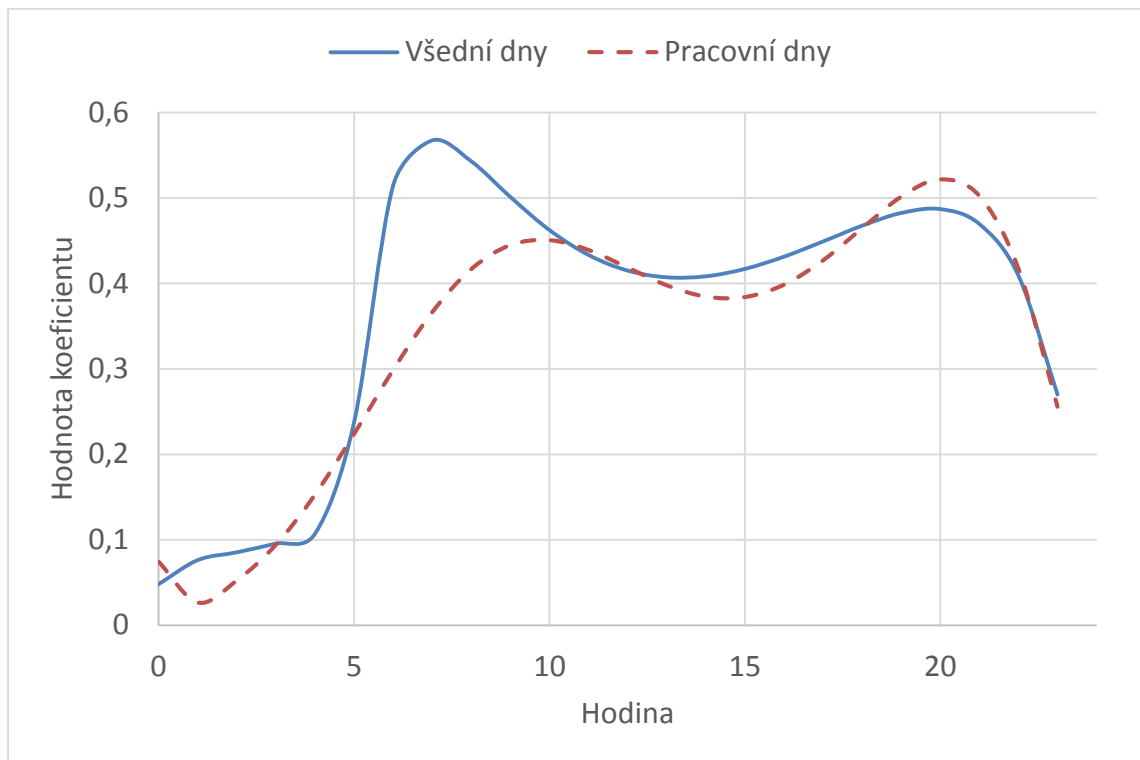
kde:

- H je výška vrcholu,
- σ je směrodatná odchylka rodičovského Gaussova rozdělení,
- τ je časová konstanta definující exponenciální pokles,
- h_m je hodina ($h = h_m$) v němž má funkce vrchol H .

Funkce závislosti na hodině dne je potom aproximována sumou dvou EGH funkcí, kdy první aproximuje ranní špičku tepelného zatížení a druhá aproximuje večerní špičku. Obrázek 7 znázorňuje ukázkou funkce EGH s parametry získanými v kapitole měření pro SCZT A, období 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011 a uvedeným v tabulce 6.

Tabulka 6: Ukázkové parametry funkce EGH

Parametr	Hodnoty			
	Pracovní den		Den pracovního klidu	
	Ranní špička	Večerní špička	Ranní špička	Večerní špička
H	0,29	0,47	0,43	0,48
σ	2,83	4,68	-2,21	4,81
h_m	6,08	19,17	5,70	19,00
τ	6,19	-9,60	4,28	-9,61



Obrázek 7: Ukázka funkce EGH při aproximaci tepelného zatížení

4.6.2 Hodinové koeficienty tepelného zatížení

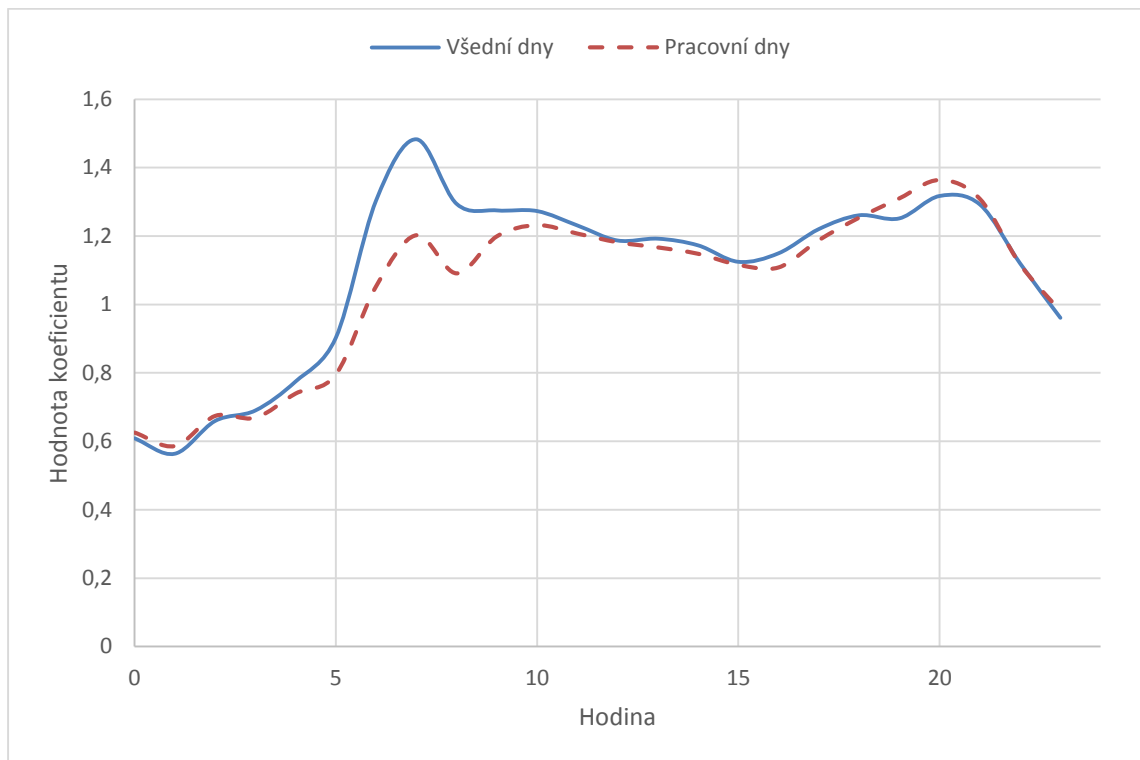
Další možností aproximace tepelného zatížení v závislosti na hodině dne jsou hodinové koeficienty tepelného zatížení podobně jako ve [13], kde autor ovšem nerozděloval typy dne na pracovní a dny pracovního klidu, ale určoval 168 hodinových hodnot pro celý týden.

V této práci je navržen původní postup, kdy je pro oba typy dne určeno 24 hodinových koeficientů tepelného zatížení $f_{HRS}(h, daycat) = l_{g,daycat}$, kde $g = 1, 2, \dots, 24$ je index hodiny určený funkcí $g = GetIndex(h)$ a $daycat = \{work, free\}$ je typ dne, kde w označuje pracovního volna a f označuje den pracovního volna.

Obrázek 8 znázorňuje ukázkou funkce hodinových koeficientů tepelného zatížení s parametry získanými v kapitole měření pro SCZT A, období 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011 a uvedenými v Tabulce 7.

Tabulka 7: Ukázkové parametry funkce HRS

Hodina	Pracovní den	Den pracovního klidu
0	0,94	0,91
1	0,88	0,85
2	0,97	0,96
3	0,97	0,99
4	1,06	1,10
5	1,15	1,27
6	1,52	1,75
7	1,63	1,93
8	1,47	1,71
9	1,60	1,71
10	1,66	1,72
11	1,64	1,67
12	1,61	1,62
13	1,60	1,60
14	1,56	1,58
15	1,52	1,53
16	1,52	1,57
17	1,60	1,63
18	1,67	1,65
19	1,73	1,65
20	1,79	1,72
21	1,71	1,68
22	1,52	1,50
23	1,35	1,31



Obrázek 8: Ukázka funkce hodinových koeficientů tepelného zatížení

4.7 Rozdíl teplot a průtok v primární síti

Rozdíl vstupní a výstupní teploty vody v těžišti primární sítě je možné vyjádřit ze vztahu (6):

$$\Delta\vartheta^{\text{těžiště}}(t) = \vartheta_{\text{vstup}}^{\text{těžiště}}(t) - \vartheta_{\text{výstup}}^{\text{těžiště}}(t) = \frac{Q_{\text{zatížení}}(t)}{c_p \dot{m}(t)} \quad (16)$$

kde $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot vody na vstupu a výstupu do těžiště primární sítě SCZT.

Průtok v primární síti je potom určený jako:

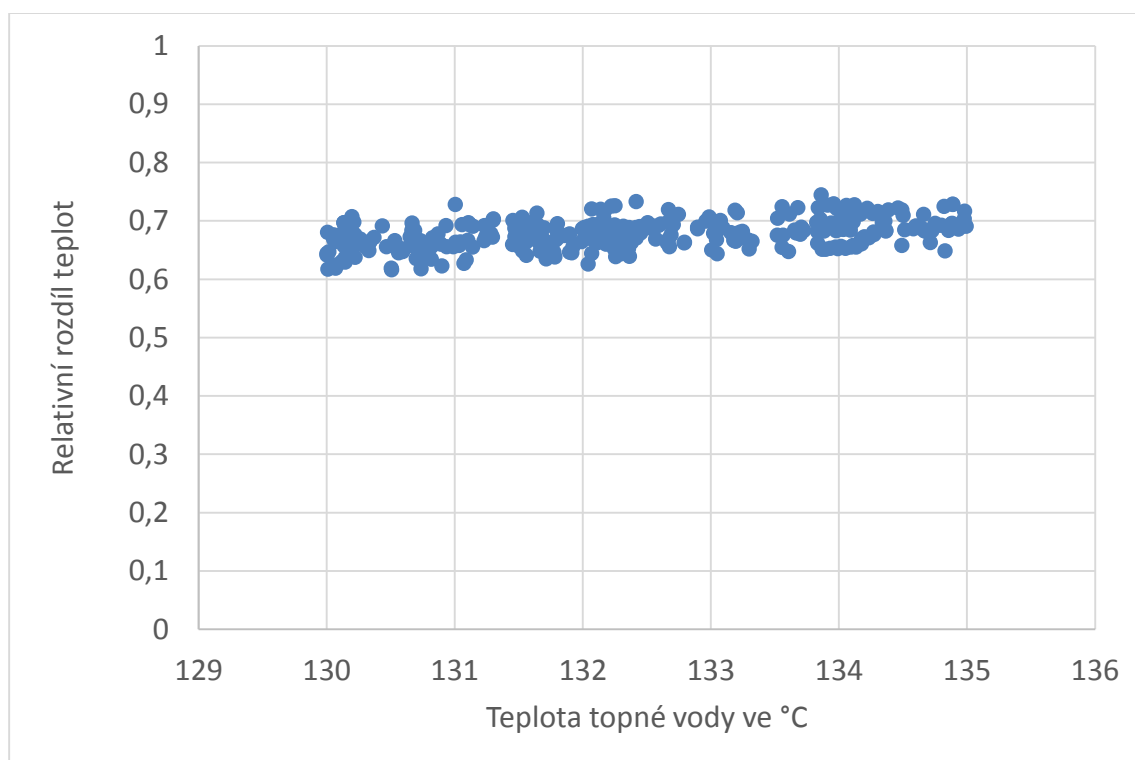
$$\dot{m}(t) = \frac{Q_{\text{zatížení}}(t)}{c_p \Delta\vartheta^{\text{těžiště}}(t)} \quad (17)$$

4.7.1 Aproximace rozdílu teplot v primární síti

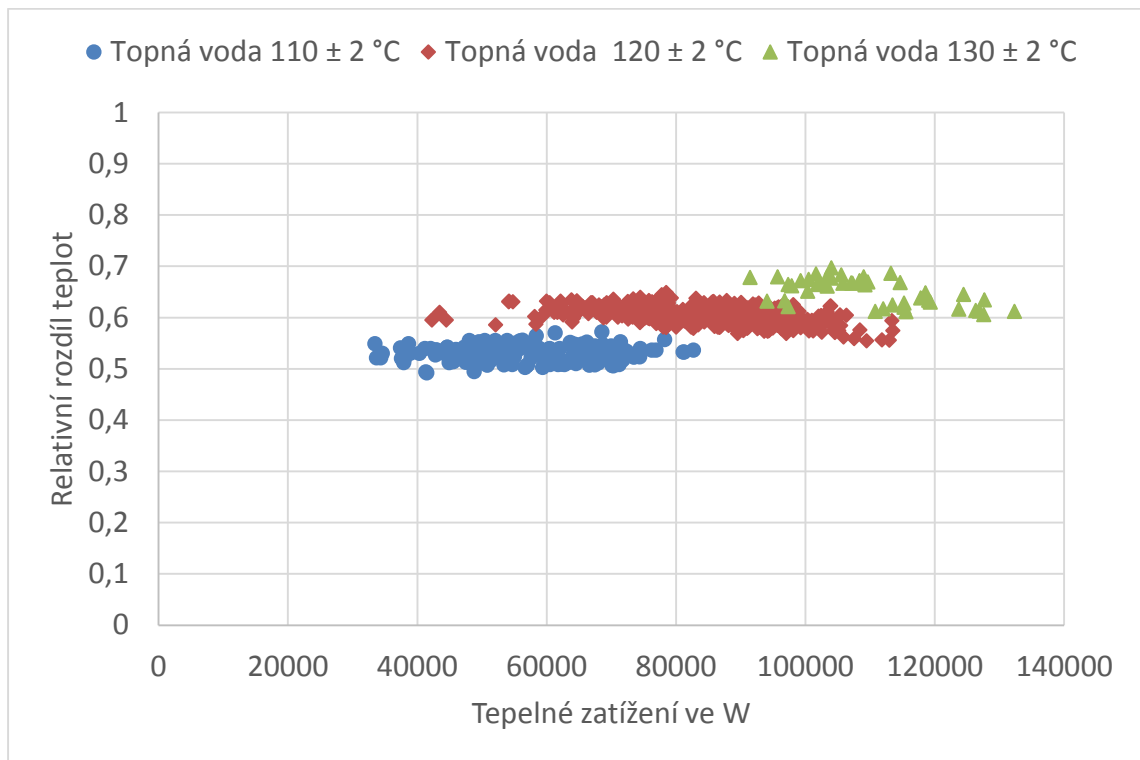
Vzhledem k tomu, že v získaných datech z SCZT nebyla dostupná potřebná data z předávacích stanic, tak bylo nutné určit závislost $\Delta\vartheta^{\text{těžiště}}$ jiným způsobem. Na základě zkoumání průběhu závislosti rozdílu teplot na tepelném zatížení a teplotě vody na vstupu do těžiště v různých topných sezónách u dvou nezávislých SCZT byla určena následující aproximační funkce:

$$f_{\Delta\vartheta^{\text{těžiště}}}(t, q) = p_0 + p_1\vartheta_{1,i}(t) + p_2\vartheta_{1,i}(t)^2 + p_3q \quad (18)$$

Zde q je tepelné zatížení a p_0, p_1, p_2, p_3 jsou neznámé reálné koeficienty funkce, které je možné určit lineární regresí. Závislost na teplotě vody je aproximována kvadratickou funkcí a závislost na hodnotě tepelného zatížení funkcí lineární. Obrázek 9 znázorňuje ukázkou vypočítaného rozdílu teplot dle vztahu (16) pro SCZT A, období 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011 zobrazeného v závislosti na teplotě topné vody. Obrázek 10 zobrazuje závislost rozdílu teplot na tepelném zatížení pro stejné období.



Obrázek 9: Závislost rozdílu teplot na teplotě topné vody



Obrázek 10: Závislost rozdílu teplot na tepelném zatížení

4.8 Určení koeficientů aproximačních funkcí

Pro aproximaci a predikci je nutné pomocí optimalizačních metod najít neznámé parametry zvolených aproximačních funkcí. Tabulka 8 obsahuje všechny testované kombinace metod pro aproximaci tepelného zatížení v závislosti na venkovní teplotě a v závislosti na hodině dne.

Tabulka 8: Kombinace funkcí pro aproximaci tepelného zatížení

Číslo	$f_{work}(h)$	$f_{temp}(\vartheta_{ex})$
I	EGH	URM
II	EGH	P4
III	EGH	PCL
IV	HRS	URM
V	HRS	P4
VI	HRS	PCL

4.8.1 Účelová funkce

Jako účelová funkce byla zvolena funkce střední čtvercové chyby (Root Mean Squared Error - RMSE):

$$f_{\text{účelová}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(f_{Q_{\text{zatížení}}}(t_i) - Q_{\text{zatížení}}(t_i) \right)^2}{n}} \quad (19)$$

kde n je počet vzorků a $i = 1, 2, \dots, n$.

Jako optimalizační algoritmy byly zvoleny Standard Particle Swarm Optimization [44], Diferencial Evolution (SPSO), Differential Evolution (DE) [48][49][50] a Self Organizing Migration Algorithm (SOMA) [64].

4.8.2 Standard Particle Swarm Optimization

Jako vhodná numerická metoda pro optimalizaci s využitím výpočetní techniky byl zvolen algoritmus Particle Swarm Algorithm (PSO) [44]. Obrázek 11 zobrazuje vývojový diagram algoritmu SPSO.

Konkrétně byla použita varianta Standard Particle Swarm Algorithm (SPSO) s *lbest* topologií [45]. Zatímco v případě *gbest* komunikační topologie se pozice nejlepší částice určuje ze všech částí (Obrázek 12), tak v případě *lbest* kruhové komunikační topologie se určují pozice nejlepší částice pouze ze sousedících částic (Obrázek 13). *Lbest* kruhová komunikační topologie je vhodnější pro paralelizace algoritmu [46][57].

Populace částic je inicializována náhodnými čísly. Při aktualizaci nové pozice částice není ověřováno, zda jsou pozice částice v platných mezích pro danou účelovou funkci. V případě že pozice nejsou v platných mezích, tak je hodnotě účelové funkce přiřazena velmi vysoká hodnota, čímž jsou tyto řešení znevýhodněna vůči ostatním. Jde o strategii „letting the particles fly“ [45] a její výhodou je, že pozice částic nejsou nijak ovlivňovány.

Jako ukončovací kritérium bylo zvoleno *MaxDistQuick* [47] v kombinaci s maximální možným počtem iterací, kdy algoritmus je ukončen, pokud je dané procento částic blíže nejlepší částici, než je zadaný práh.

$$\varphi = c_1 + c_2 \quad (20)$$

$$\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}$$

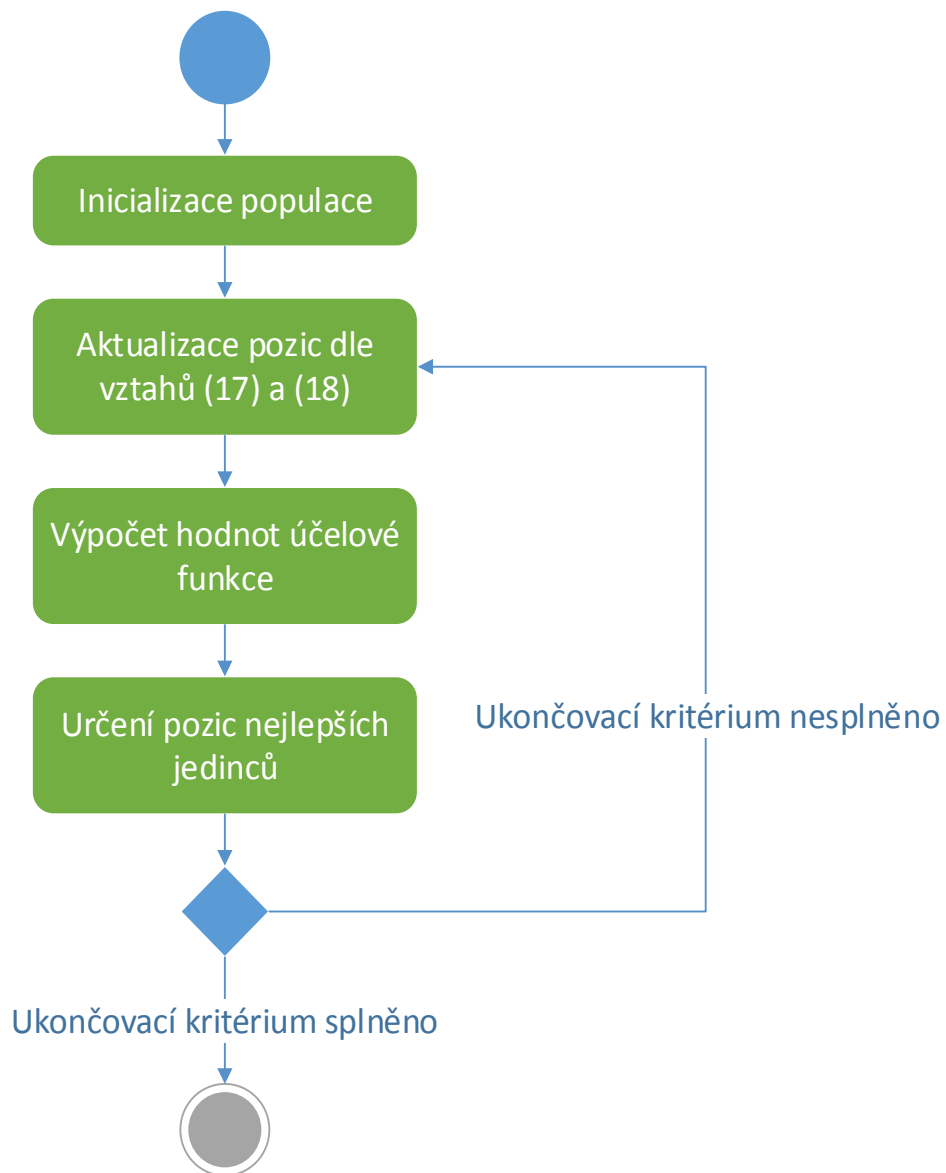
$$v_{id,G+1} = \chi \left(v_{id,G} + c_1 \epsilon_1 (p_{id,G} - x_{id,G}) + c_2 \epsilon_2 (p_{gd,G} - x_{id,G}) \right) \quad (21)$$

$$x_{id,G+1} = x_{id,G} + v_{id,G+1} \quad (22)$$

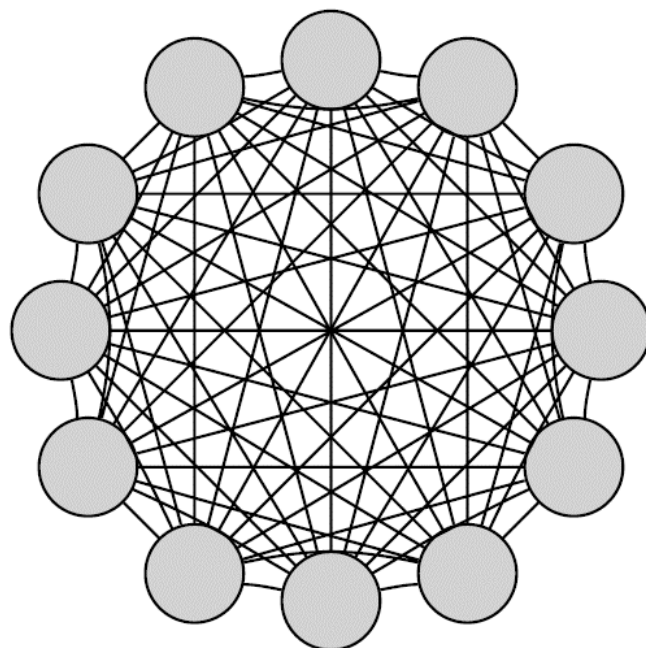
kde:

G	je iterace algoritmu,
χ	je constriction factor,
N	je počet částic,
i	je index částice, $i = 1, 2, 3, \dots, N$
D	je dimenze problému,
d	je index dimenze $d = 1, 2, 3, \dots, D$
x_i	je pozice částice,
v_i	je rychlost částice,
ω	je parametr zrychlení,
c_1	je parametr reprezentující sociální chování částice,
c_2	je parametr reprezentující poznávací chování částice,
ϵ_1, ϵ_2	jsou náhodná čísla s rovnoměrným rozdělením $\langle 0, 1 \rangle$,
p_i	je nejlepší dosažená pozice částice,
p_g	je nejlepší dosažená pozice ze sousedících částic.

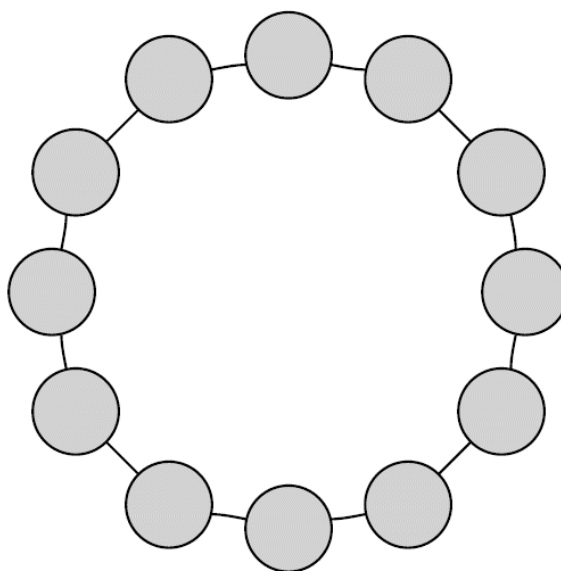
Doporučené hodnoty parametrů jsou dle [45] $\varphi = 4,1$ a $\chi = 0,72984$ a $c_1 = c_2 = 2,05$. Počet částic N není přímo určen, ale měl by být úměrný dimenzi problému. Obvykle je počet částic nastaven jako dvojnásobek dimenze.



Obrázek 11: Vývojový diagram algoritmu SPSO



Obrázek 12: Komunikace částic v gbest topologii [45]



Obrázek 13: Komunikace částic v lbest topologii [45]

4.8.3 Differential Evolution

Differential Evolution (Diferenciální evoluce) (DE) je heuristický algoritmus určený pro hledání globálního minima nelineárních a nediferencovatelných funkcí [48][49].

Pro každý vektor $x_{i,G}$, kde $i = 1, 2, 3, \dots, N$, je vygenerován šumový (mutační) vektor (mutant vector) dle následujícího vztahu, což odpovídá variantě DE/rand/1/bin:

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F (x_{r_2,G} - x_{r_3,G}) \quad (23)$$

kde:

N je počet jedinců, $N \geq 4$,

r_1, r_2, r_3 jsou náhodná vzájemně se lišící celá čísla $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N\}$ která se nerovnjí aktuálnímu indexu i ,

F je mutační konstanta, $F \in \langle 0; 2 \rangle$.

Potom je vygenerován zkušební vektor (trial vector) $u_{i,G+1} = (u_{i1,G+1}, u_{i2,G+1}, \dots, u_{iD,G+1})$:

$$u_{id,G+1} = \begin{cases} v_{id,G+1}, & \text{if } (\text{randb}(d) \leq CR) \text{ or } d = \text{rnbr}(i) \\ x_{id,G+1}, & \text{if } (\text{randb}(d) > CR) \text{ and } d \neq \text{rnbr}(i) \end{cases} \quad (24)$$

kde:

D je dimenze problému,

d je index dimenze $d = 1, 2, 3, \dots, D$,

CR je definovaný práh křížení (crossover constant), $CR \in \langle 0, 1 \rangle$,

$\text{randb}(d)$ je ohodnocení generátoru náhodných čísel s rovnoměrným rozdělením $\langle 0, 1 \rangle$, pro index d ,

$\text{rnbr}(i)$ je náhodně zvolený index $\text{rnbr}(i) \in 1, 2, \dots, D$.

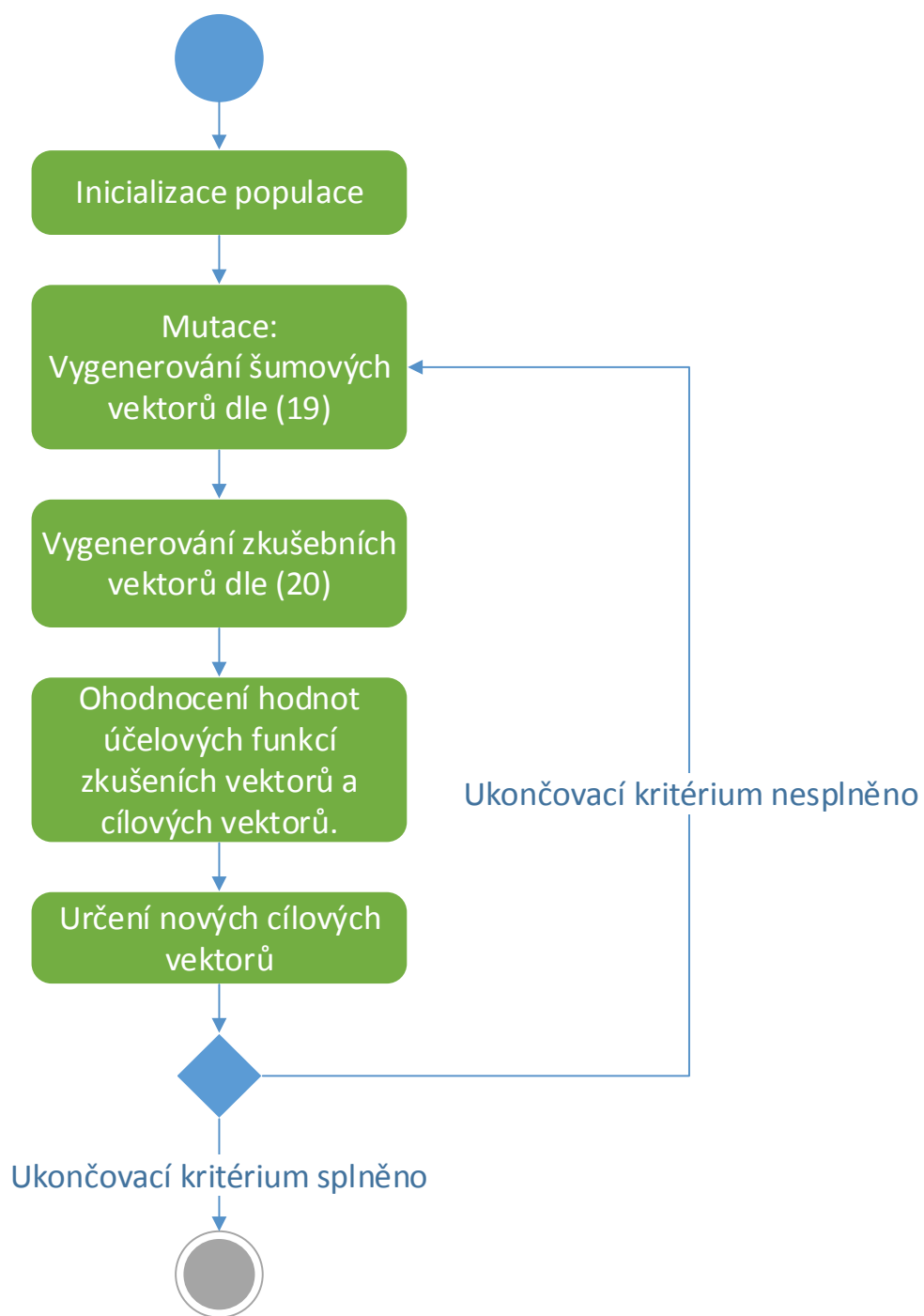
Cílem je s určitou pravděpodobností zajistit aby byl zvolený buď původní parametr jedince anebo nový parametr jedince ze šumového vektoru a přitom bylo zajištěno, aby aspoň jeden parametr byl zvolen ze šumového vektoru.

V závěrečné fázi je určena hodnota účelové funkce pro zkušební vektor $u_{i,G+1}$ a původní vektor $x_{i,G}$. Pokud je hodnota účelové funkce pro zkušební vektor $u_{i,G+1}$ menší než pro původní cílový vektor $x_{i,G}$, tak $x_{i,G+1} = u_{i,G+1}$ v opačném případě $x_{i,G+1} = x_{i,G}$.

Jednou z doporučených variant algoritmu je DE/best/2/bin:

$$v_{i,G+1} = x_{best,G} + F (x_{r_1,G} + x_{r_2,G} - x_{r_3,G} - x_{r_4,G}) \quad (25)$$

Další variantou je použití takzvaného exponenciálního křížení. Další varianty DE je možné nalézt například v [50]. Obrázek 14 zobrazuje vývojový diagram algoritmu DE.



Obrázek 14: Vývojový diagram algoritmu DE

4.8.4 Self – Organizing Migration Algorithm

Samo-organizující se migrační algoritmus (Self-Organizing Migrating Algorithm - SOMA) je evoluční algoritmus aplikovaný na množství reálných problémů [68]. V práci byla použita následující varianta strategie AlltoOne. Pro každý vektor $x_{i,G}$, kde $i = 1, 2, 3, \dots, N$ a N je počet jedinců jsou v každé generaci (migračním kole) G vygenerovány nové vektory $x_{i,G+1}$ jako nejlepší hodnoty jedinců dosažených při migraci k nejlepšímu jedinci $x_{g,G}$:

$$x_{id,G+1} = x_{id,G,start} + (x_{gd,G} - x_{id,G,start}) \text{path PRTVector}_d \quad (26)$$

$$\text{PRTVector}_d = \begin{cases} 1, & \text{if } (\text{randb}(d) \leq \text{PRT}) \\ 0, & \text{if } (\text{randb}(d) > \text{PRT}) \end{cases} \quad (27)$$

kde

D je dimenze problému,

d je index dimenze $d = 1, 2, 3, \dots, D$

path je násobek vzdálenosti od výchozí pozice k pozici nejlepšího jedince $x_{gd,G} - x_{id,G,start}$, path = 0, Step, 2 Step, ..., PathLength

PathLength je maximální násobek vzdálenosti $x_{gd,G} - x_{id,G,start}$

Path je velikost kroku,

PRTVector je perturbační vektor,

PRT je perturbační koeficient $\text{PRT} \in \langle 0; 1 \rangle$

$\text{randb}(d)$ je ohodnocení generátoru náhodných čísel s rovnoměrným rozdělením $\langle 0, 1 \rangle$, pro index d ,

5 POSTUP IDENTIFIKACE A PREDIKCE

Navržená metoda má následující dva základní kroky:

- Identifikace modelu – nalezení parametrů aproximační funkcí s využitím naměřených dat popsanych v následující kapitole.
- Predikce – na základě predikce venkovní teploty vzduchu se určí budoucí hodnoty vybraných parametrů popsanych v kapitole 5.2.

5.1 Identifikace modelu

Identifikací modelu se v tomto případě myslí nalezení parametrů aproximačních funkcí. Identifikace se provádí pro topnou sezónu, na začátku nové sezóny se vychází z minulé topné sezóny, s tím že je nutné vzít v úvahu možné změny proti minulé sezóně.

1. Pro aproximaci je nutné znát tato naměřená vstupní data:
 - objem poloviny primární sítě R ,
 - počáteční datum aproximace, konečné datum aproximace
 - kalendář dnů pracovního volna za dané období,
 - případné výpadky a nestandardní měření za dané období,
 - Vzorkovaná naměřená data v časech t_i kde $i = 1, 2, \dots, n$ a n je počet vzorků. Perioda vzorkování je většinou jedna hodina, ale často může dojít k výpadkům měření a délka periody je potom nerovnoměrná:
 - hmotností průtok primární sítě $\dot{m}(t_i)$,
 - teplota topné vody $\vartheta_{topná}(t_i)$,
 - teplota vratné vody $\vartheta_{vratná}(t_i)$,
2. Na základě vztahů (2),(3),(4),(5) a (6) jsou vypočteny:
 - dopravní zpoždění topné větve primární sítě $D_{topná}$,
 - dopravní zpoždění vratné větve primární sítě $T_{vratná}$,
 - teplota vody na vstupu do těžiště SCZT $\vartheta_{vstup}^{těžiště}(t_i)$,

- teplota vody na výstupu z těžiště SCZT $\vartheta_{výstup}^{těžiště}(t_i)$,
 - rozdíl vstupní a výstupní teploty vody v těžišti SCZT $\Delta\vartheta^{těžiště}(t_i)$,
 - tepelné zatížení $Q_{zatížení}(t_i, \vartheta_{ex})$,
3. Jsou nalezeny parametry funkcí aproximující zatížení $f_{Q_{zatížení}}(t_i, \vartheta_{ex})$ konkrétně funkce $f_{čas}(hour(t_i), day(t_i))$ a $f_{teplota}(\vartheta_{ex}(t_i))$,
 4. Jsou nalezeny parametry funkce $f_{\Delta\vartheta^{těžiště}}(t_i)$ aproximující rozdíl teplot v primární síti.

5.2 Predikce

Cílem predikce je určení potřebného hmotnostního průtoku primární sítě a potřebné teploty topné vody. Z důvodu dopravního zpoždění topné a vratné větve primární tepelné sítě je nutné postupovat v následujících krocích:

1. Na základě naměřených a vypočtených hmotnostních průtoků se určí dopravní zpoždění topné větve primární sítě.
2. S využitím dopravního zpoždění se určí teplota topného média na výstupu těžiště primární sítě.
3. Dále je určeno predikované tepelné zatížení pomocí aproximační funkce $f_{Q_{load}}(t, \vartheta_{ex})$.
4. Poté je určena predikce rozdílu teplot v primární síti pomocí aproximační funkce $f_{dif}(t, q)$.
5. Dle vztahu (6) je dopočítán predikovaný hmotnostní průtok.
6. Po výpočtu všech predikovaných hmotnostních průtoků se zpětně dopočítá dopravní zpoždění vratné vody primární sítě.
7. Na základě vypočteného dopravního zpoždění primární sítě se určí teplota vratné vody.

6 ŘEŠENÍ A JEHO IMPLEMENTACE

6.1 Metody implementace

6.1.1 Zdroje a formáty dat

Aplikace pro predikci parametrů distribuce tepla v systému centrálního zásobování teplem používá následující data a služby:

- Naměřená data, většinou uložená v interní relační databázi, kterou je možné zpřístupnit pro čtení v rámci intranetu přímo nebo v rámci internetu například prostřednictvím webových služeb.
- Predikce venkovní teploty vzduchu, většinou prostřednictvím webových služeb z veřejných nebo placených zdrojů třetích firem (meteorologické předpovědi).
- Koeficienty aproximačních funkcí uloženy na serveru v relační databázi, nebo serializované v XML souborech. Jsou pravidelně aktualizovány a archivovány. Dostupné mohou být pomocí webové služby, nebo lokálně.
- Služby kalendáře, které poskytují informace o pracovních dnech, dnech pracovního volna, plánovaných odstávkách atd. Mohou být uloženy v relační databázi nebo v lokálních souborech. Dostupné mohou opět být pomocí webové služby.
- Optimalizační servis, který slouží pro časově náročné výpočty, dostupný může být opět lokálně nebo prostřednictvím webových služeb.

6.1.2 Architektura aplikace

Při implementaci aplikace pro predikci parametrů distribuce tepla v systému centrálního zásobování teplem je nutné dodržet následující podmínky:

- Modularita aplikace – možnost měnit použité metody, zobrazení, vzdálené a lokální výpočty atd.
- Rozšiřitelnost aplikace – možnost přidávat novou funkčnost bez toho aby bylo nutné měnit již existující kód.
- Udržitelnost aplikace – aplikace musí být navržena tak, aby ji bylo možné po celou dobu udržovat a opravovat případné nalezené chyby.
- Testovatelnost aplikace – jednotlivé moduly aplikace musí být nezávisle testovatelné, tak aby bylo možné jak při tvorbě, tak údržbě nebo rozšíření aplikace testovat zda byla zachována požadovaná funkčnost aplikace.

V práci je využito následujících metod:

- návrhový vzor Dependency injection (DI) [58],
- technika Inversion of Control (IoC) [58].
- Architektonický vzor Model View ViewModel (MVVM) [59].

Základním metodou v architektuře aplikace je vícevrstvá architektura aplikace klient-server (multi-tier architecture), kdy program je rozdělený na více vzájemně nezávislých vrstev, nejběžnější je třívrstvá (Three-tier) architektura, kde je aplikace rozdělena na následující vrstvy:

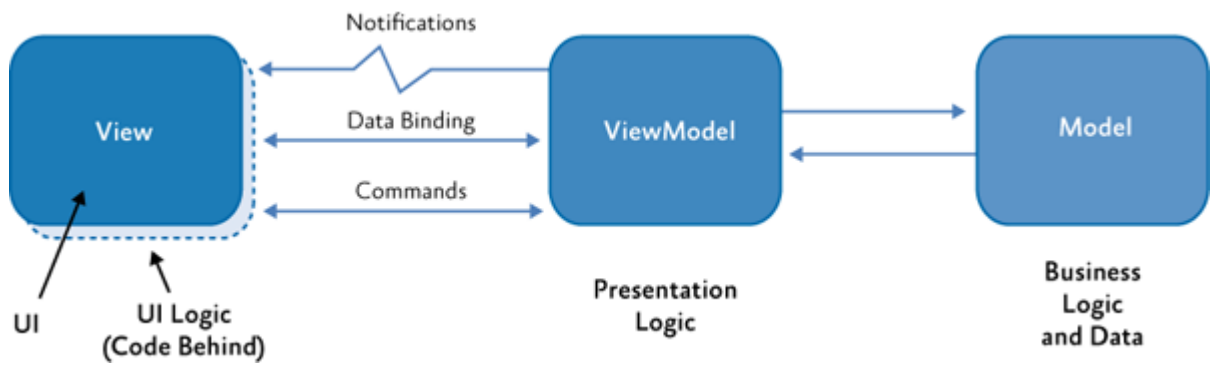
- Prezentační vrstva (Presentation tier),
- Aplikační vrstva (Application tier)
- Datová vrstva (Data tier)

Pojem třívrstvé architektury vznikl na začátku 90. let s rozvojem síťových aplikací. Ještě dříve, na počátku 70. let vznikl pojem Model View Controller (MVC), který se týkal především oddělení grafického uživatelského rozhraní

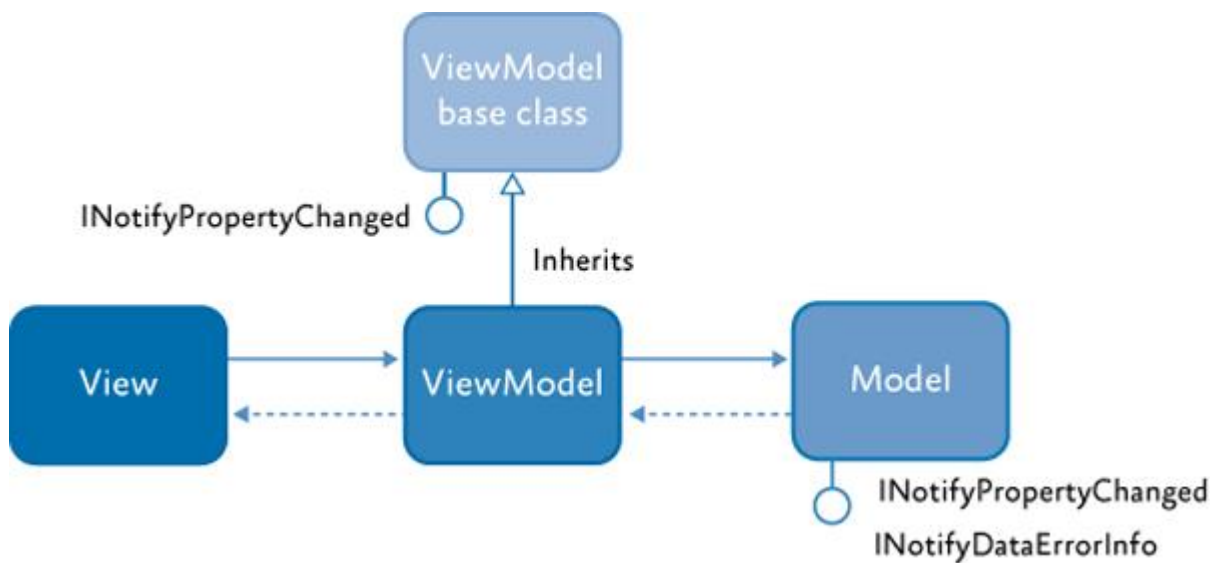
(Graphical User Interface - GUI). Poprvé byl publikován v roce 1979 [60] a později byl implementován v jazyce Smalltalk firmou Xerox PARC [61]. Postupně vzniklo více variant, například pro webové stránky web MVC a Passive View, které více odděluje GUI od modelu reprezentujícího data a jejich chování [62] [63].

Jedním z nejnovějších architektonických vzorů je Model View ViewModel (MVVM) představený firmou Microsoft [64]. MVVM je založen na jazyce XAML, data bindingu, návrhovém vzoru Command (rozhraní *ICommand*) a dalších postupech [65][66]. Tento architektonický vzor je použit v experimentální části pro implementaci aplikace. Obrázek 15 a obrázek 16 schematicky zobrazuje komunikaci a implementaci architektonického vzoru MVVM.

Jak bylo prakticky prezentováno například v [67] je možné díky aplikaci vzoru MVVM vytvářet i multiplatformní aplikace pro většinu významných mobilních operačních systémů.



Obrázek 15: Komunikace mezi View, ViewModel a Model [65]



Obrázek 16: Ukázka implementace MVVM [66]

6.1.3 Paralelní programování heterogenních systémů

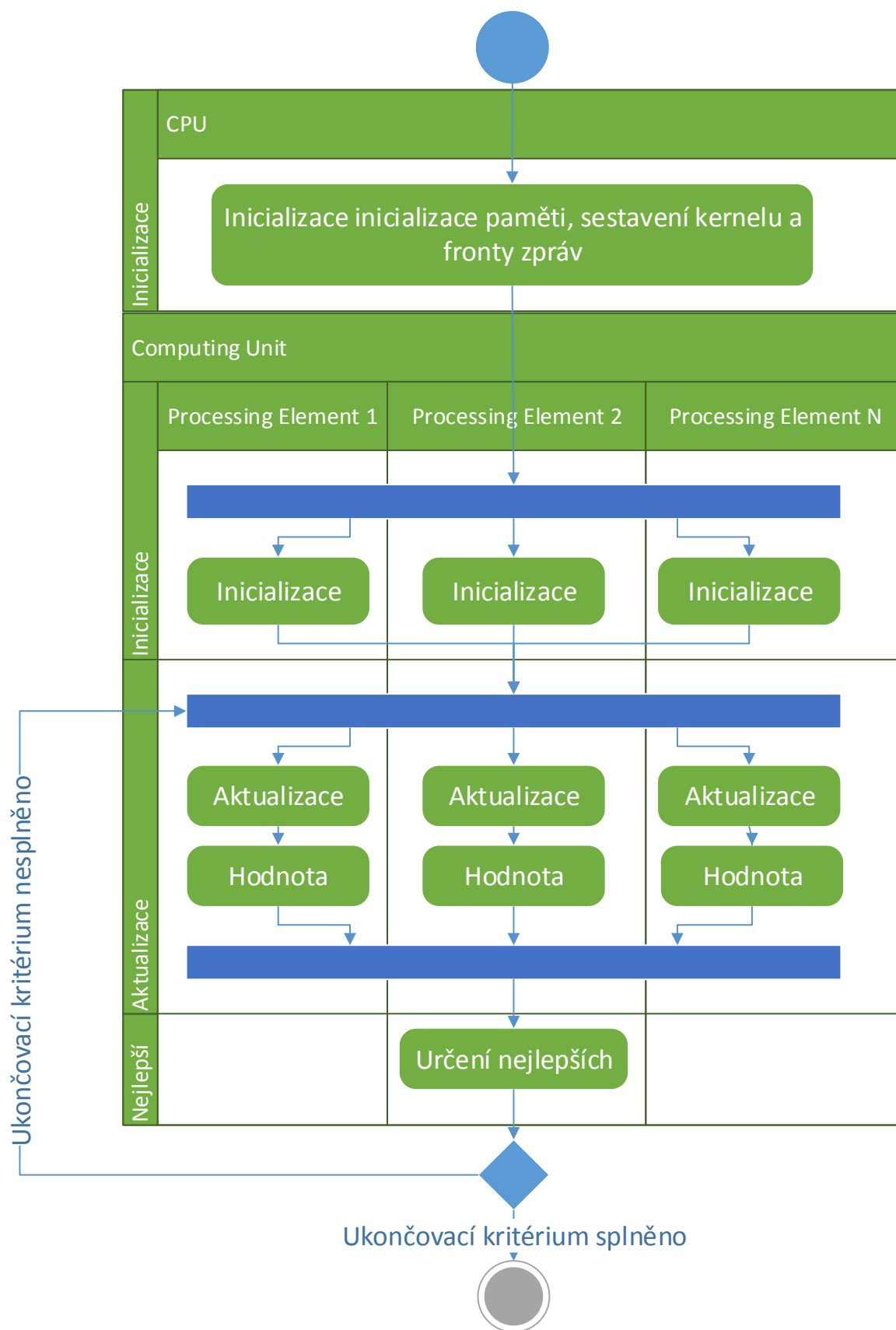
V rámci práce bylo nutné paralelizovat optimalizační výpočty. Pro vysoký výkon je nutné optimalizovat výpočty pro využití výpočetních jednotek Central Processing Unit (CPU) a Graphics Processing Unit (GPU), případně dalších procesorových architektur. I když některé kompilátory poskytují auto-vektorizaci a auto-paralelizaci [51], je stále podmínkou navrhnout algoritmus tak, aby jej bylo možné paralelizovat.

Jedním z vhodných nástrojů pro paralelní programování heterogenních počítačových systémů jsou následující platformy a standardy [46]:

- Otevřený standard Open Computing Language (OpenCL) [53].
- Proprietární technologie firmy NVIDIA Compute Unified Device Architecture (CUDA) [55].
- Knihovna firmy Microsoft C++ Accelerated Massive Parallelism (C++ AMP) [54].

Jako nejvhodnější byl zvolen otevřený standard OpenCL, který je nezávislý na platformě a výrobci a byla vypracována a ověřena paralelní implementace algoritmu PSO pro určování parametrů funkcí aproximujících tepelné zatížení [56][57].

Obrázek 17 schematicky znázorňuje implementaci PSO vytvořenou pomocí standardu OpenCL. Základem je rozdělení práce na jednotlivé Processing Elements (PE). V tomto případě probíhají na jednotlivém PE jak jednotlivé iterace PSO, tak také ohodnocení účelové funkce.



Obrázek 17: Paralelní implementace PSO v OpenCL

6.2 Základní struktura implementace

Aplikace byla implementovaná v prostředí Microsoft Visual Studio 2012 (MVS 2012) s využitím .NET Framework a dalších technologií firmy Microsoft.

Aplikace je rozdělená do dvou projektů (terminologie MSV 2012):

- HeatLoadExcel – doplněk aplikace Microsoft Excel 2010 a vyšší.
Projekt obsahuje následující jmenné prostory:
 - Common – společné třídy,
 - Kernels – OpenCL kernely,
 - Model – třídy pro práci s daty,
 - Service – třídy reprezentující služby (předpověď počasí atd.)
 - View – uživatelské rozhraní a prezentační logika,
 - ViewModel – aplikační logika.

- HeatLoadLibrary – PortableClass library obsahující základní třídy a metody pro výpočty. Projekt obsahuje následující jmenné prostory:
 - DataClass – třídy reprezentující data,
 - Function – implementace funkcí z kapitol 4.5 až 4.7,
 - Optimization – implementace funkcí z kapitoly 4.8,
 - Static – pomocné třídy a metody.

6.3 Implementace aproximačních funkcí

Obrázek 18 schematicky zobrazuje implementace metod z kapitol 4.5 a 4.6. Tyto třídy implementují rozhraní *IFunction1*, kde číslo jedna značí, že funkce má jeden parametr.

6.3.1 Implementace jednotlivých funkcí

Základní aproximační funkce jsou implementací rozhraní *IFunction1*, které reprezentuje funkci jedné proměnné. Tabulka 9 přiřazuje názvy implementací jednotlivým aproximačním funkcím. Příloha I zobrazuje diagram třídy implementující aproximaci tepelného zatížení.

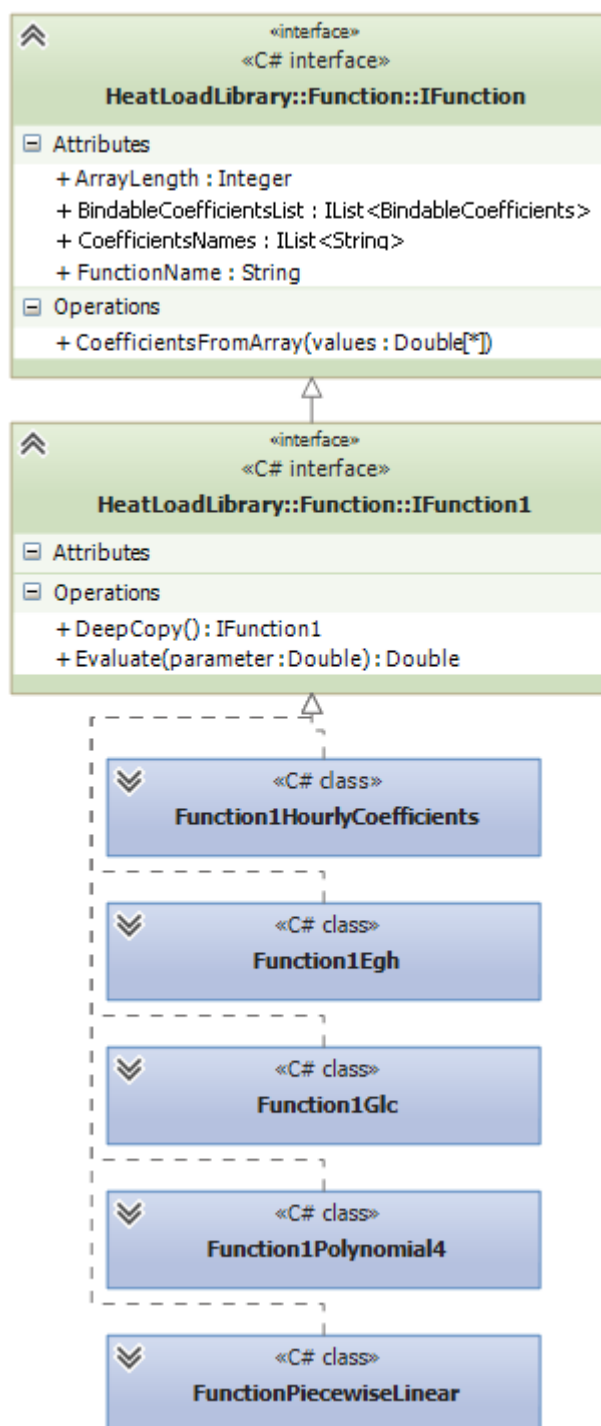
Tabulka 9: Implementace základních aproximačních funkcí.

Funkce	Implementace
HRS	<i>Function1HourlyCoefficients</i>
EGH	<i>Function1EGH</i>
P4	<i>Function1Polynomial4</i>
URM	<i>Function1URM</i>
PCL	<i>Function1PeacewiseLinear</i>

6.3.2 Implementace funkce aproximující tepelné zatížení

Funkce tepelného zatížení je implementována jako potomek rozhraní *IFunction3* a má asociaci na následující objekty:

- *TemperatureDependent* – objekt reprezentující funkci závislosti tepelného zatížení na venkovní teplotě vzduchu.
- *TimeDependedFree* – objekt reprezentující funkci závislosti tepelného zatížení na hodině dne pro dny pracovního volna.
- *TimeDependedWorking* – objekt reprezentující funkci závislosti tepelného zatížení na hodině dne pro pracovní dny.



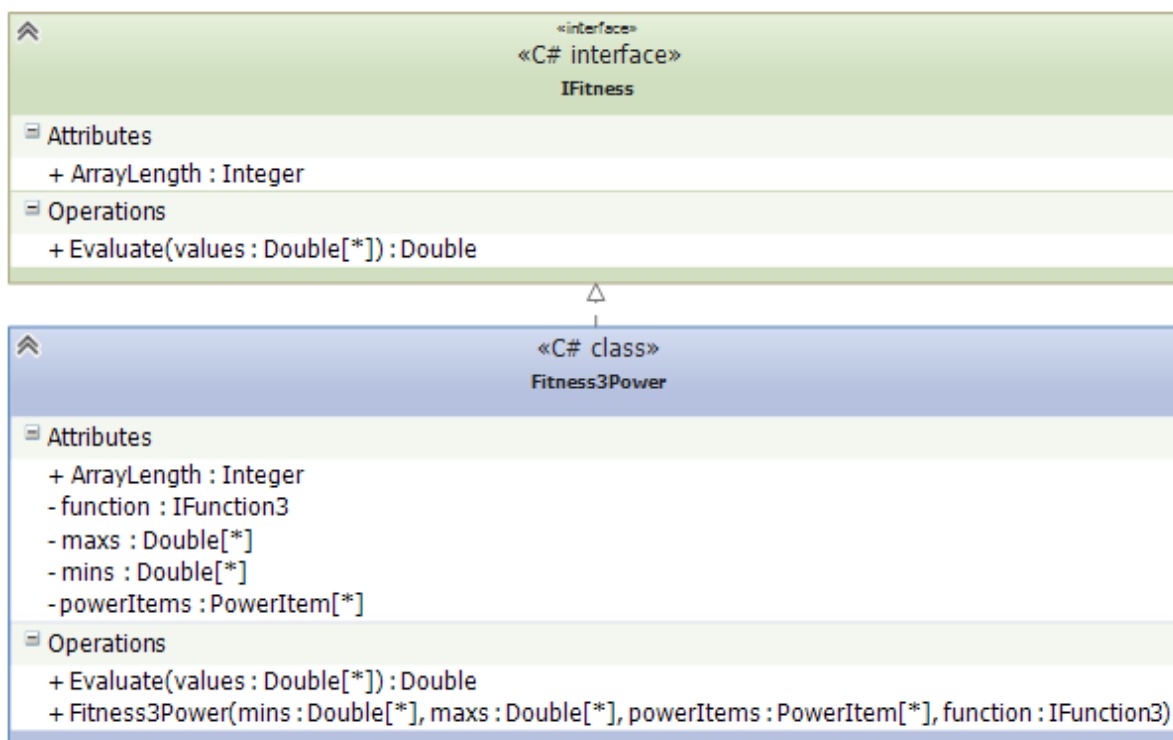
Obrázek 18: Implementace aproximačních funkcí

6.4 Implementace optimalizačních metod

V aplikaci jsou implementovány všechny optimalizační algoritmy z kapitoly 4.8. Nejprve bude popsána implementace účelové funkce, poté evolučních algoritmů a na závěr ukončovacích kritérií. Optimalizační metody jsou využívány optimalizační službou, která je popsána v následující kapitole. V příloze II je potom zobrazen sekvenční diagram výpočtu hodnoty účelové funkce (metoda *Evaluate*).

6.4.1 Účelová funkce

Účelová funkce implementuje rozhraní *IFitness*. Tato třída vypočítá hodnotu účelové funkce dle vzorce popsaného v kapitole 4.8.1. Obrázek 19 zobrazuje diagram tříd implementace účelové funkce a souvisejících tříd.



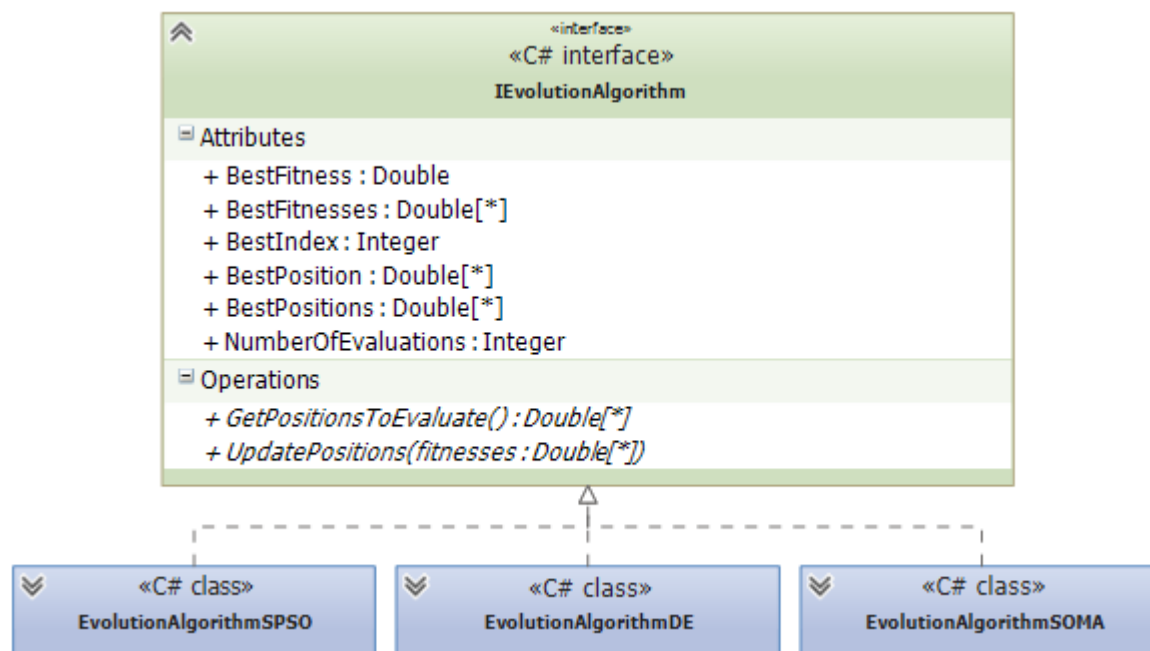
Obrázek 19: Implementace účelové funkce

6.4.2 Evoluční algoritmy

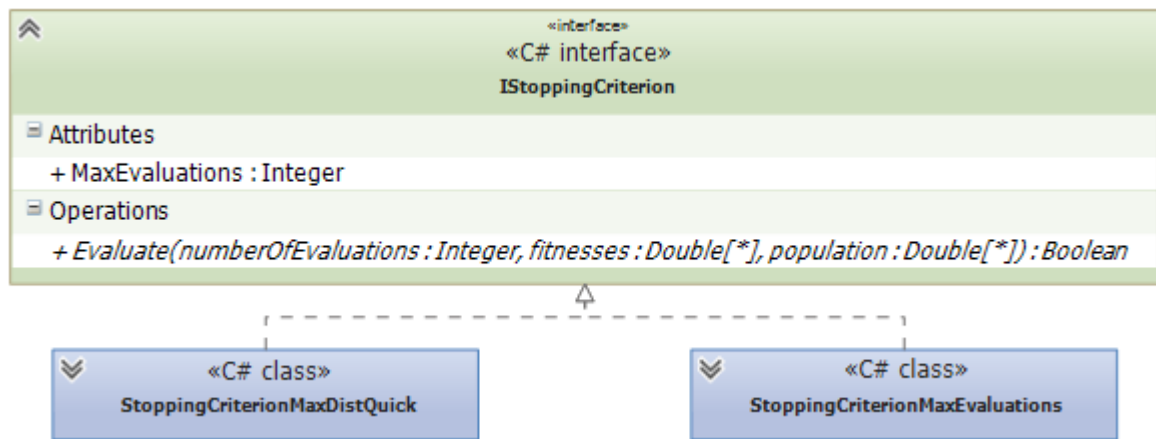
Třídy reprezentující evoluční algoritmy implementují rozhraní *IEvolutionAlgorithm*. Tabulka 10 přiřazuje názvy implementací k názvům evolučních algoritmů. Obrázek 20 potom zobrazuje diagram tříd implementace evolučních algoritmů. Implementace vycházela z [73] ale byla upravena tak, aby byl zcela oddělen evoluční algoritmus od účelové funkce. To přináší výhody především z hlediska snadnější paralelizace výpočtů. Obrázek 21 popisuje implementaci ukončovacího kritéria.

Tabulka 10: Implementace evolučních algoritmů.

Funkce	Implementace
SPSO	<i>EvolutionAlgorithmSPSO</i>
DE	<i>EvolutionAlgorithmDE</i>
SOMA	<i>EvolutionAlgorithmSOMA</i>



Obrázek 20: Implementace evolučních algoritmů



Obrázek 21: Implementace ukončovacích kritérií

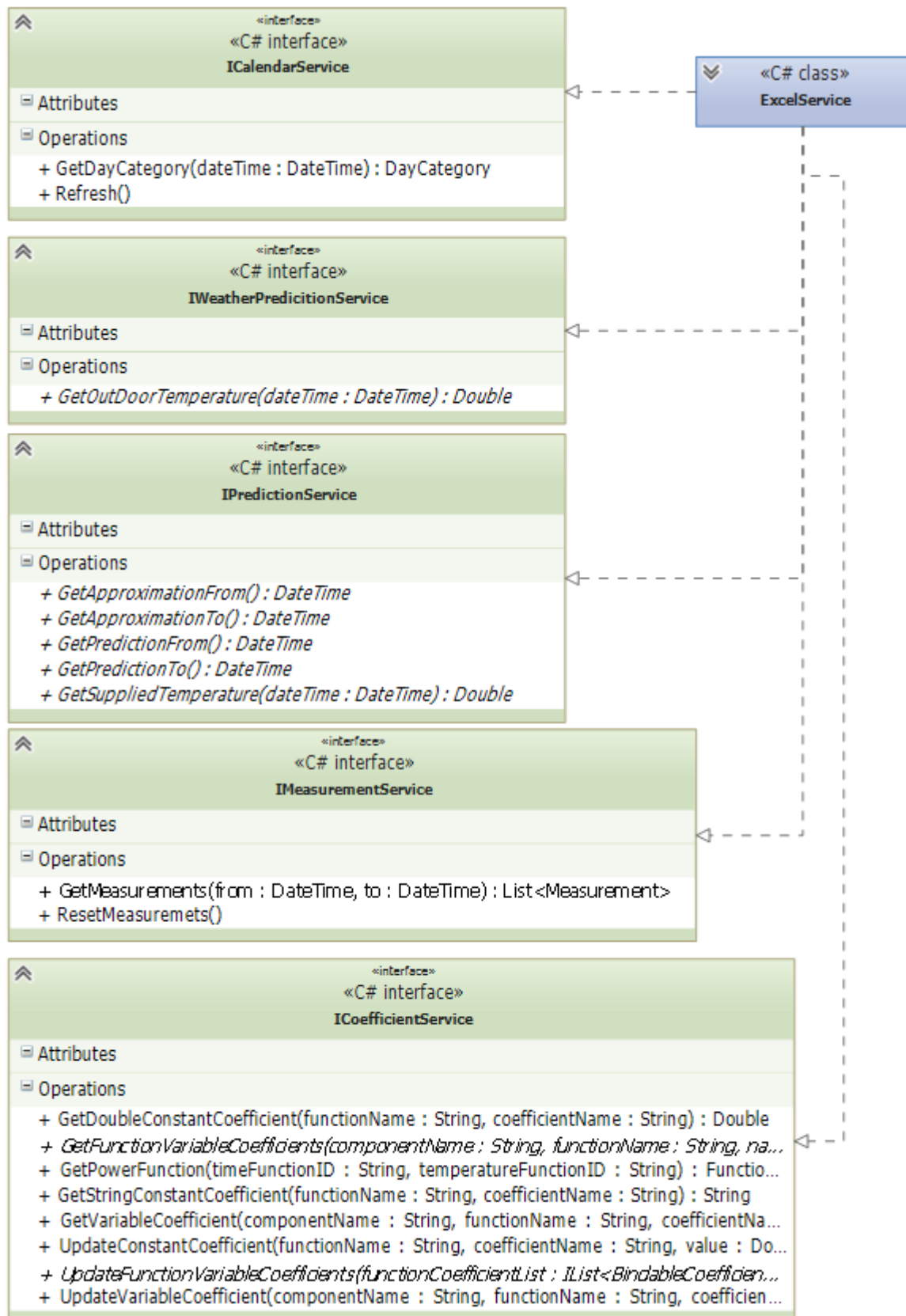
6.5 Implementace služeb

6.5.1 Datové služby

Následující Tabulka 11 přiřazuje názvy implementací k jednotlivým službám identifikovaným v kapitole 6.1.1 a službu která sdružuje výpočty aproximací a predikce. Vzorová implementace je vytvořena jako doplněk pro Microsoft Excel 2010 a vyšší. Díky využití rozhraní a aplikaci návrhových a architektonických vzorů je možné změnit implementace jednotlivých služeb například pro relační databázi, webovou službu a další zdroje dat. Obrázek 22 zobrazuje implementaci datových služeb.

Tabulka 11: Datové služby a jejich rozhraní

Zdroj dat (služba)	Rozhraní
Poskytovatel naměřených dat	<i>IMeasurementService</i>
Predikce meteorologických dat	<i>IWeatherPredictionService</i>
Správce koeficientů funkcí	<i>ICoefficientService</i>
Služby kalendáře	<i>ICalendarService</i>
Optimalizační služba	<i>IOptimizationService</i>
Služba aproximace a predikce	<i>IPredictionService</i>



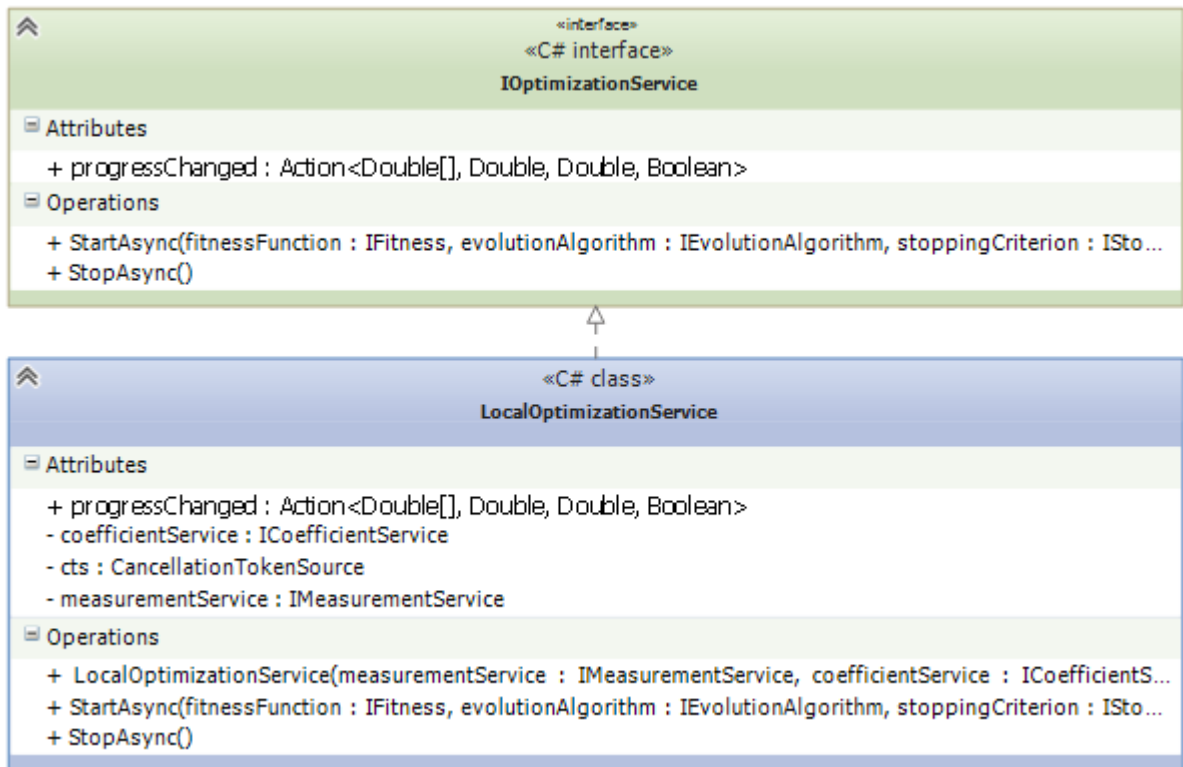
Obrázek 22: Implementace datových služeb

6.5.2 Optimalizační služba

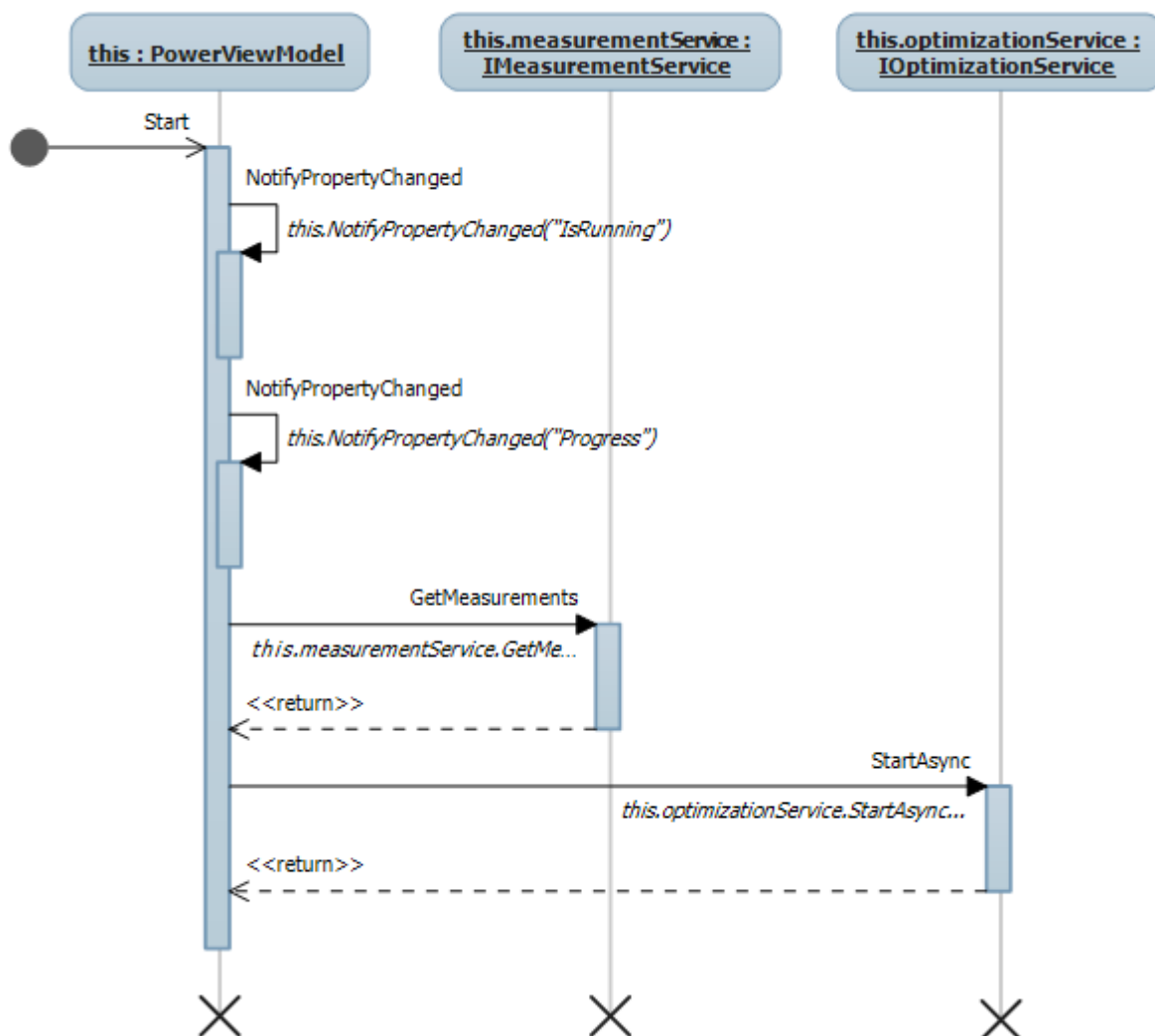
Optimalizační služba provádí vlastní hledání parametrů účelové funkce. Využívá tříd popsaných v minulých kapitolách, konkrétně implementaci účelové funkce, evolučního algoritmu a ukončovacího kritéria. Obrázek 23 pomocí diagramu tříd popisuje implementaci lokální optimalizační služby.

Optimalizační služba je navržena s využitím vzoru Event-based Asynchronous Pattern (EAP) [69][70]. Klient spouští optimalizační službu asynchronně a postupně je informován o průběhu optimalizace a o konečném výsledku, což znázorňuje Obrázek 24.

Po spuštění optimalizační služby probíhá vlastní výpočet, který je popsán sekvenčním diagramem v příloze III. Při ohodnocování hodnot účelové funkce pro jednu populaci může být využito buď metod paralelního programování heterogenních počítačových systémů popsaných v kapitole 6.1.3 nebo klasických metod paralelního programování CPU. V rámci disertační práce byla otestována implementace s využitím OpenCL [53] a výsledky byly publikovány [56][57]. V ukázkové implementaci bylo využito knihovny Parallel LINQ (PLINQ) [70].



Obrázek 23: Implementace lokální optimalizační služby



Obrázek 24: Sekvenční diagram spuštění optimalizační služby

6.6 Implementační moduly

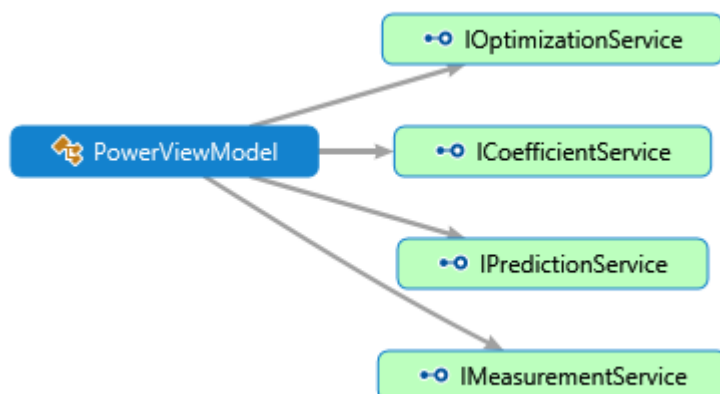
V následujících kapitolách budou popsány implementační moduly, které se skládají z uživatelského rozhraní View, které určuje i prezentační logiku a tříd ModelView, které reprezentuje aplikační logiku. Důležitou vlastností zvoleného návrhu je nezávislost uživatelského rozhraní na aplikační logice, což umožňuje znovuvyužití již vytvořené aplikační logiky pro jiné platformy.

6.6.1 Modul tepelného zatížení

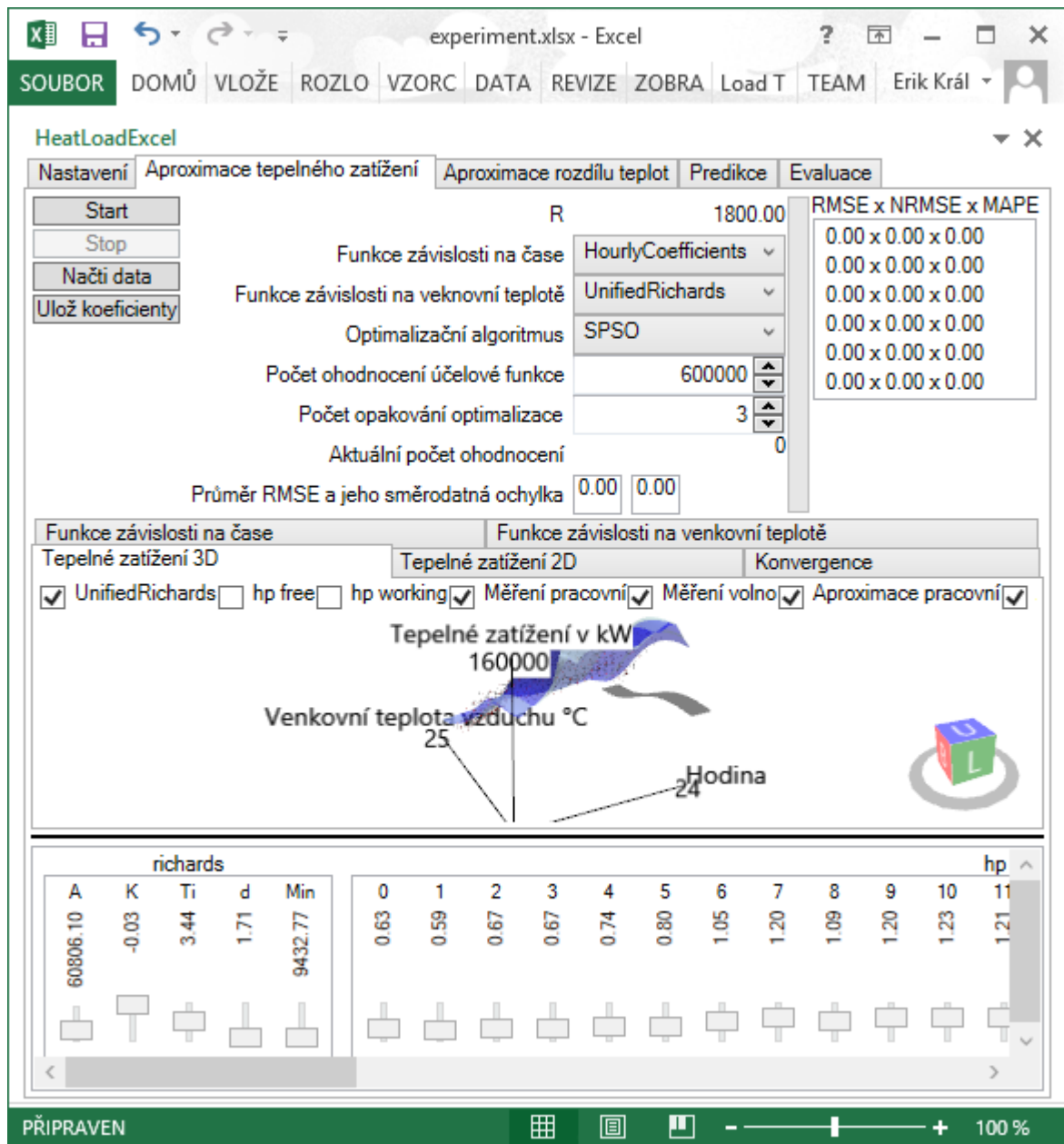
Modul tepelného zatížení poskytuje uživatelské rozhraní a aplikační logiku pro výpočet a aproximaci tepelného zatížení a určení parametrů souvisejících funkcí. Modul tepelného zatížení má závislost na následující služby:

- poskytovatel naměřených dat,
- správce koeficientů funkcí,
- optimalizační služba,
- služba aproximace a predikce.

Obrázek 25 zobrazuje závislosti modulu tepelné zatížení a Obrázek 26 znázorňuje jeho uživatelské rozhraní.



Obrázek 25: Závislosti modulu tepelné zatížení



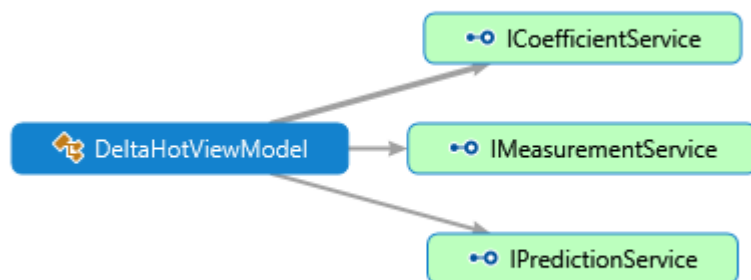
Obrázek 26: Uživatelské rozhraní modulu tepelného zatížení

6.6.2 Modul rozdílu teplot

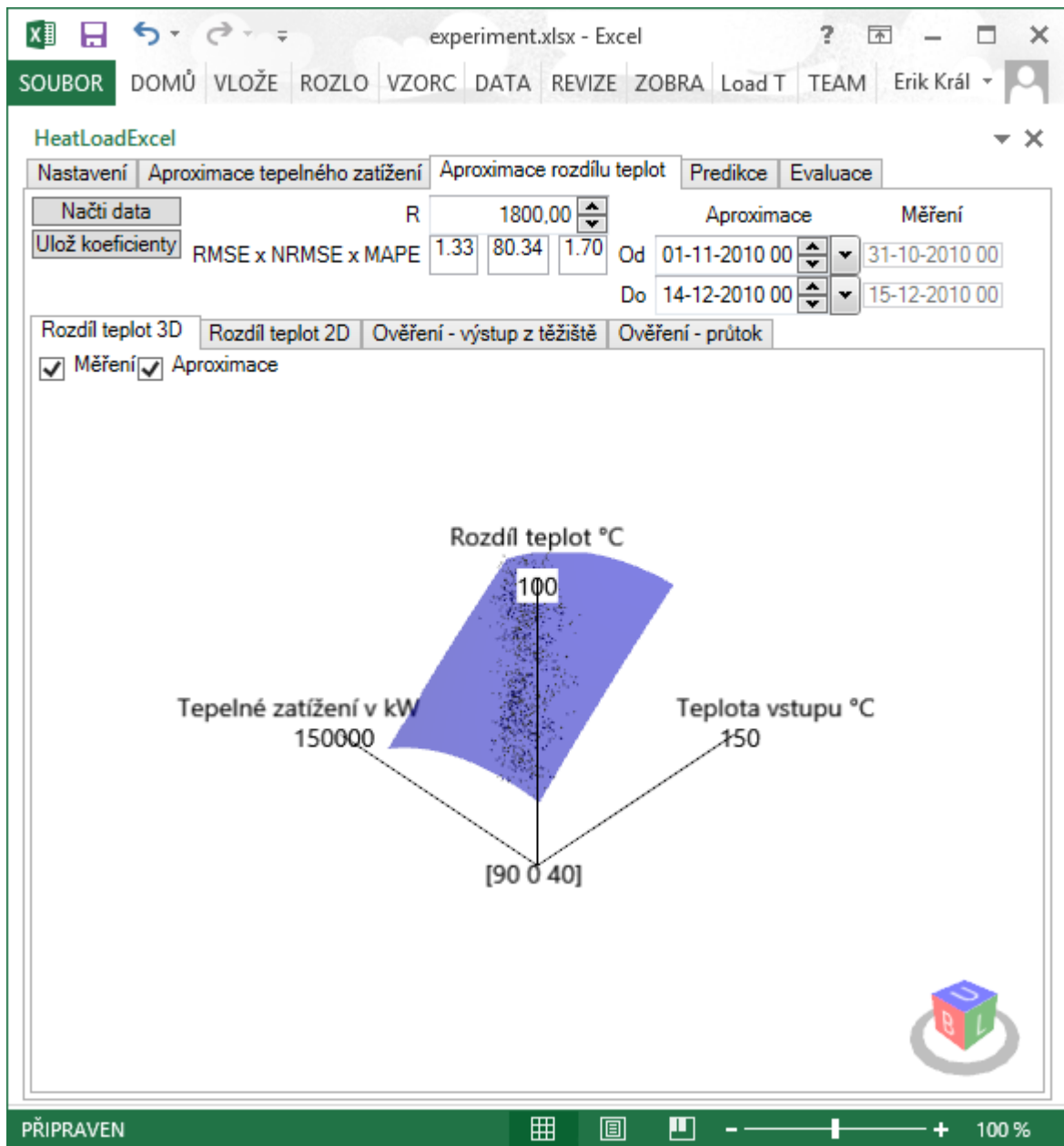
Modul rozdílu teplot poskytuje uživatelské rozhraní a aplikační logiku pro výpočet a aproximaci rozdílu teplot na vstupu do a výstupu z těžiště systému a určení parametrů souvisejících funkcí. Modul rozdílu teplot má závislosti na následující služby:

- poskytovatel naměřených dat,
- správce koeficientů funkcí,
- služba aproximace a predikce.

Obrázek 27 zobrazuje závislosti modulu rozdílu teplot a Obrázek 28 znázorňuje jeho uživatelské rozhraní.



Obrázek 27: Závislosti modulu rozdílu teplot



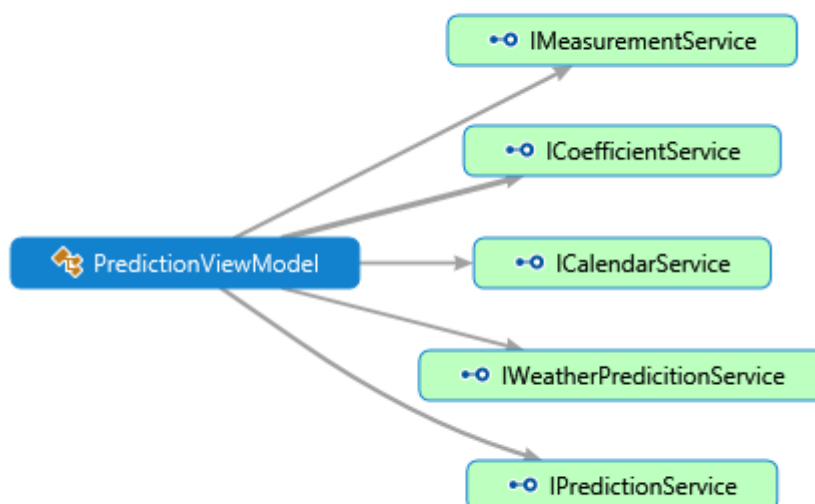
Obrázek 28: Uživatelské rozhraní modulu rozdílu teplot

6.6.3 Modul predikce

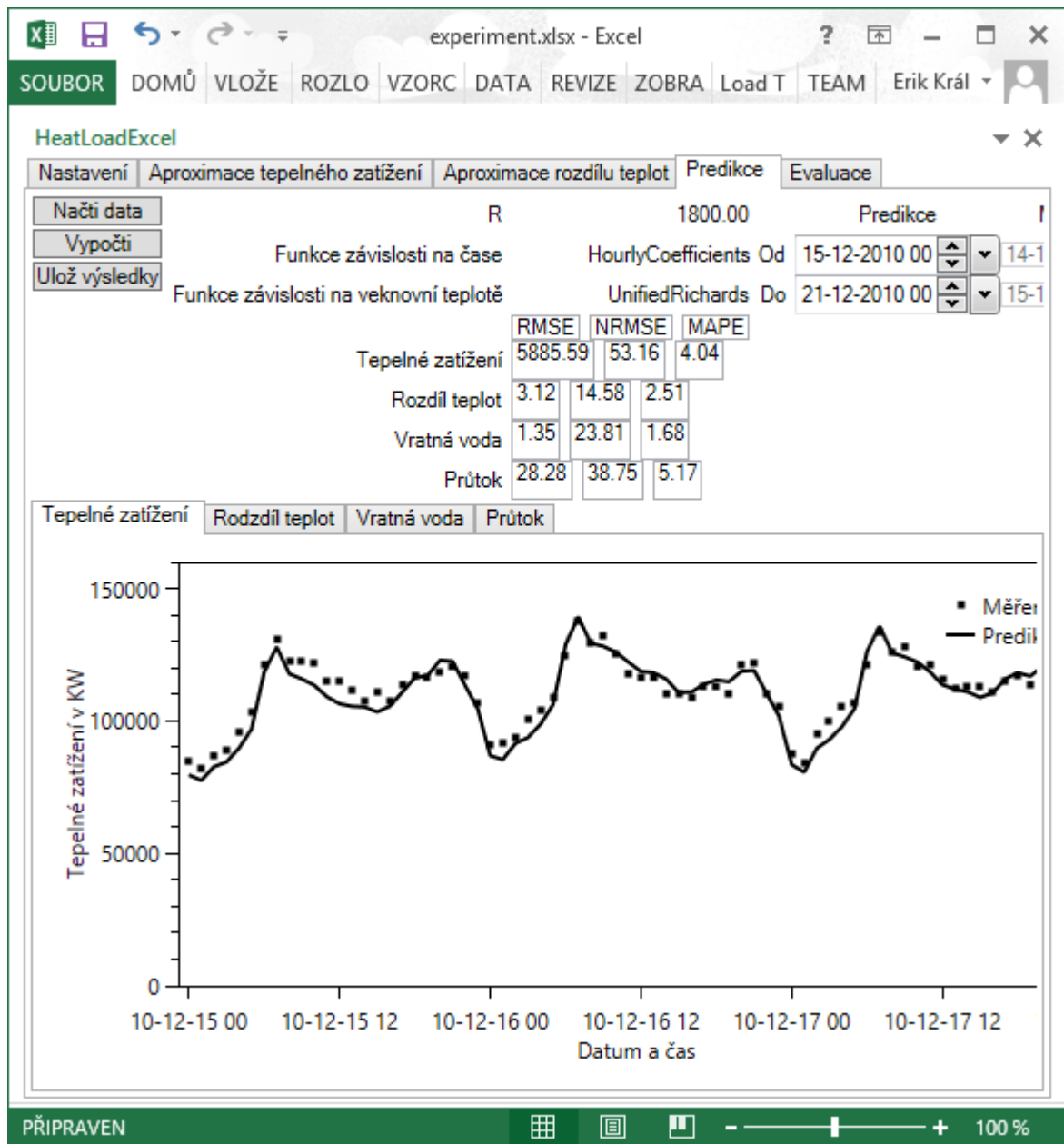
Modul predikce poskytuje uživatelské rozhraní a aplikační logiku pro predikci, jejíž postup je popsán v kapitole 5. Predikovanými parametry je teplota vratné vody a hmotnostního průtoku. Vstupními parametry predikce žádaná teplota topné vody a predikce venkovní teploty vzduchu. Součástí predikce je i určení hodnot tepelného zatížení. Modul predikce má závislosti na následující služby:

- poskytovatel naměřených dat.
- predikce meteorologických dat,
- správce koeficientů funkcí,
- služby kalendáře
- služba aproximace a predikce.

Obrázek 29 zobrazuje závislosti modulu predikce a Obrázek 30 znázorňuje jeho uživatelské rozhraní.



Obrázek 29: Závislosti modulu predikce



Obrázek 30: Uživatelské rozhraní modulu predikce

7 MĚŘENÍ A DISKUSE

V následujících kapitolách budou popsány experimenty na dvou SCZT. Z důvodu utajení informací, není možné zveřejnit jejich identitu ani absolutní hodnoty měřených údajů, a proto budou identifikovány v následujícím textu jako SCZT A respektive SCZT B a některé údaje budou uváděny jako relativní vůči jejich maximální hodnotě. Nejprve bude popsáno nastavení parametrů evolučních algoritmů, poté nastavení mezí aproximačních funkcí a následně budou vyhodnoceny výsledky experimentů s danými parametry pro různá časová období aproximace a predikce. Dále bude ověřena kvalita aproximace pomocí aproximačních funkcí a optimalizačních algoritmů a bude zvolena nejvhodnější funkce pro aproximaci tepelného zatížení a rozdílu teplot a také nejefektivnější optimalizační algoritmus. V kapitole predikce bude ověřena predikce pro každý týden jednoho topného období SCZT A a SCZT B. Na základě technické dokumentace byla pro SCZT A stanovena konstantní hmotnost vody odpovídající polovině objemu primární sítě $R = 6\,480\,000\text{ kg}$ a pro SCZT B $R = 504\,000\text{ kg}$.

7.1 Zvolené parametry

7.1.1 Optimalizační algoritmy

Tabulka 12 popisuje nastavení parametrů algoritmu SPSO,

Tabulka 13 nastavení parametrů algoritmu DE a Tabulka 14 nastavení parametrů algoritmu SOMA.

Tabulka 12: Nastavení parametrů algoritmu SPSO

Parametr	Hodnota
N	75
χ	0,72984
c_1	2.05
c_2	2.05

Tabulka 13: Nastavení parametrů algoritmu DE

Parametr	Hodnota
N	300
CR	0,8
F	0.3

Tabulka 14: Nastavení parametrů algoritmu SOMA

Parametr	Hodnota
N	75
$PathLength$	3
Step	0.22
PRT	0.1

7.1.2 Aproximační funkce

V této kapitole budou popsány zvolené parametry aproximačních funkcí závislosti na venkovní teplotě vzduchu a poté aproximační funkce závislosti na hodině dne. Tabulka 15 popisuje nastavení mezí aproximační funkce URM,

Tabulka 16 popisuje meze parametrů aproximační funkce P4 a konečně Tabulka 17 obsahuje meze aproximační funkce PCL a Tabulka 18 konstanty (x -ové souřadnice) aproximační funkce PCL.

Tabulka 15: Meze parametrů Richadsovy křivky

Parametr	Dolní mez	Horní mez
A	0	200000
K	-1	0
T_i	-10	15
d	1	10
Q_{min}	0	120000

Tabulka 16: Meze parametrů funkce P4

Parametr	Dolní mez	Horní mez
a_0	0	200000
a_1	-20000	0
a_2	-100	0
a_3	-20	20
a_4	-0,1	0,1

Tabulka 17: Meze parametrů funkce PCL

Parametr	Dolní mez	Horní mez
y_0	0	200000
y_1	0	200000
y_2	0	200000
y_3	0	200000
y_4	-200000	200000
y_5	-200000	200000

Tabulka 18: Nastavení konstant funkce PCL

Parametr	Hodnota
x_0	-25
x_1	-5
x_2	2
x_3	9
x_4	15
x_5	25

Tabulka 19 popisuje meze aproximační funkce EGH pro ranní špičku, která je definována hodinovým intervalem parametru $h_m \in \langle 0; 10 \rangle$. Tabulka 20 obsahuje nastavení mezí aproximační funkce EGH pro večerní špičku, která je definována hodinovým intervalem parametru $h_m \in \langle 12; 24 \rangle$. Poslední Tabulka 21 definuje rozsah hodnot parametrů funkce HRS, kdy $l_{g,daycat} \in \langle 0; 80000 \rangle$.

Tabulka 19: Meze parametrů funkce EGH pro ranní špičku

Parametr	Dolní mez	Horní mez
H	0	1
σ	0,01	5
τ	0	10
h_m	0	10

Tabulka 20: Meze parametrů funkce EGH pro večerní špičku

Parametr	Dolní mez	Horní mez
H	0	1
σ	1	10
τ	-15	1
h_m	12	24

Tabulka 21: Meze parametrů funkce HRS

Parametr	Dolní mez	Horní mez
$l_{g,daycat}$	0	2

7.2 Ověření optimalizačních algoritmů

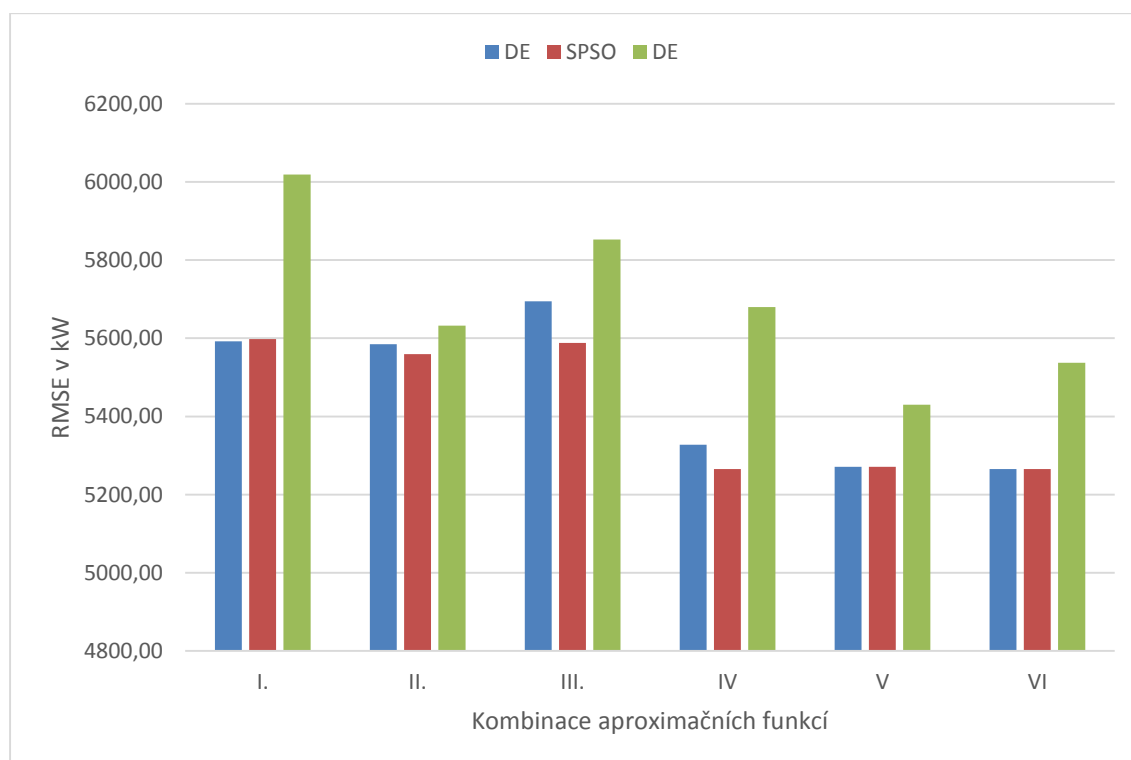
Úvodní srovnání účelové funkce bylo provedeno v [72]. Pro potřeby této práce byl zvolen počet ohodnocení účelové funkce 600000 a každý optimalizační algoritmus byl spuštěn 30 krát. Byly otestovány všechny kombinace aproximačních funkcí a evolučních algoritmů. Výsledky byly vyhodnoceny s pomocí ukazatelů Root Mean Squared Error (RMSE) a Standard Error of the Mean (SEM) - střední chyba průměru. Tabulka 22 přiřazuje identifikační číslo kombinaci funkcí, tak aby se usnadnila jejich identifikace v textu. Tabulka 23 a Obrázek 31 zobrazují výsledky aproximace pro SCZT A v období od 1. 11. 2010 do 31. 3. 2011. Tabulka 23 a obrázek 32 potom zobrazují výsledky aproximace pro SCZT B v období od 1. 11. 2006 do 31. 3. 2007.

Tabulka 22: Kombinace aproximačních funkcí

Číslo	$f_{čas}(hour(t_i), day(t_i))$	$f_{teplota}(\vartheta_{ex}(t_i))$
I	EGH	URM
II	EGH	P4
III	EGH	PCL
IV	HRS	URM
V	HRS	P4
VI	HRS	PCL

Tabulka 23: Výsledky aproximace v kW pro SCZT A 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011

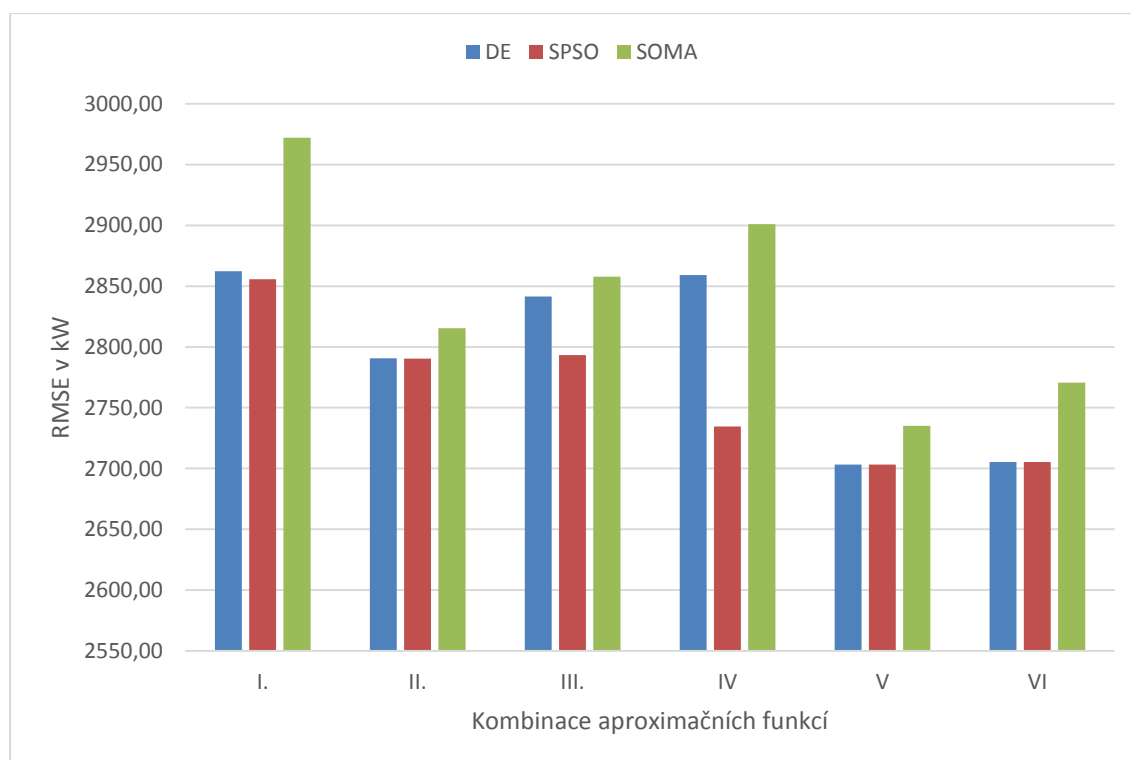
Kombinace	DE		SPSO		SOMA	
	RMSE	SEM	RMSE	SEM	RMSE	SEM
I.	5591,93	109,06	5597,71	98,89	6018,78	599,04
II.	5584,88	70,84	5559,46	18,13	5632,16	78,55
III.	5694,86	137,23	5587,99	30,81	5852,34	475,14
IV	5327,90	49,70	5265,03	0,52	5679,43	248,97
V	5271,20	0,00	5271,22	0,01	5430,13	196,76
VI	5265,43	0,55	5265,39	0,40	5537,21	316,62



Obrázek 31: Výsledky aproximace SCZT A 1. 11. 2010 až 31. 3. 2011

Tabulka 24: Výsledky aproximace v kW pro SCZT B 1. 11. 2006 až 31. 3. 2007

Kombinace	DE		SPSO		SOMA	
	RMSE	SEM	RMSE	SEM	RMSE	SEM
I.	2862,33	26,21	2855,58	34,84	2972,02	201,41
II.	2790,66	17,42	2790,50	11,61	2815,51	23,16
III.	2841,56	25,42	2793,35	22,17	2857,86	113,24
IV	2859,14	1,70	2734,55	27,63	2900,87	111,58
V	2703,26	0,00	2703,29	0,01	2735,16	16,40
VI	2705,29	0,00	2705,29	0,00	2770,57	38,95



Obrázek 32: Výsledky aproximace SCZT B 1. 11. 2006 až 31. 3. 2007

Na základě výpočtů lze konstatovat, že kombinace s aproximací závislosti na hodině dne pomocí funkce EGH dosahují horších výsledků než aproximace pomocí funkce HRS. Z hlediska evolučních algoritmů dosahuje nejlepších výsledků algoritmus SPSO. Z hlediska aproximačních funkcí dosahuje nejlepší výsledky kombinace funkcí IV tedy Richardsovy funkce a hodinových hodnot tepelného zatížení. Richardsova funkce je také nejvhodnější funkcí závislosti na venkovní teplotě díky konvergenci k dolní a horní asymptotě.

Na základě výsledků byla jako nejvhodnější pro identifikaci zvolena následující kombinace Richardsovy funkce a funkce HRS (označována v předchozím textu jako varianta IV):

$$f_{Q_{load}}(t, \vartheta_{ex}) = (1 + l_{g, daycat}) \left(A + \frac{K - A}{(1 + Qe^{-B(-\vartheta_{ex} - M)})^{\frac{1}{v}}} \right) \quad (28)$$

kde $g = 1, 2, \dots, 24$ je index hodiny dne určený funkcí $g = GetIndex(h)$. Dále $daycat = \{w, f\}$ je typ dne, kde w označuje pracovního volna a f označuje den pracovního volna.

7.3 Ověření identifikace a predikce

Predikce je ověřena na jednotlivých týdnech topného období. Nejprve jsou identifikovány parametry modelu na naměřených 12 kalendářních měsících. Z identifikace jsou ale vynechány měsíce mimo topnou sezónu, konkrétně měsíce duben až říjen. Například pro predikci parametrů v týdnu od 7.11.2011 do 13.11.2011 je model identifikován na naměřených datech z 6.11.2010 až 31.3.1.11. a 1.11. až 6.11.2011. Tabulky 25 až 28 obsahuje závěrečné srovnání predikce. V tabulkách jsou srovnány jak výsledky predikce tepelného zatížení, rozdílu teplot, teploty vratné vody a průtoku. Predikované výsledky jsou porovnávány se skutečně naměřenými výsledky pomocí RMSE a střední absolutní procentuální chyby (Mean Absolute Percentage error - MAPE).

Tabulka 25: Výsledky identifikace SCZT A, topná sezóna 2011/2012

Období identifikace		Tepelné zatížení		Rozdíl teplot	
		RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
Od	Do	kW	%	°C	%
1.11.2010	30.10.2011	5265,1	5,6	1,3	1,7
8.11.2010	6.11.2011	5294,7	5,5	1,3	1,7
15.11.2010	13.11.2011	5454,8	5,6	1,3	1,7
22.11.2010	20.11.2011	5731,6	5,8	1,3	1,7
29.11.2010	27.11.2011	5837,7	5,9	1,3	1,7
6.12.2010	4.12.2011	6073,4	6,2	1,3	1,7
13.12.2010	11.12.2011	5807,1	6,0	1,3	1,7
20.12.2010	18.12.2011	5768,1	6,1	1,2	1,7
27.12.2010	25.12.2011	5622,8	6,0	1,2	1,7
3.1.2011	1.1.2012	5535,4	6,0	1,2	1,6
10.1.2011	8.1.2012	5398,4	5,9	1,2	1,6
17.1.2011	15.1.2012	5248,1	5,8	1,2	1,6
24.1.2011	22.1.2012	5175,5	5,7	1,2	1,6
31.1.2011	29.1.2012	5135,7	5,7	1,2	1,6
7.2.2011	5.2.2012	4892,6	5,3	1,2	1,6
14.2.2011	12.2.2012	4873,4	5,2	1,3	1,7
21.2.2011	19.2.2012	4912,5	5,3	1,3	1,7
28.2.2011	26.2.2012	4806,8	5,2	1,3	1,7
7.3.2011	4.3.2012	4756,7	5,3	1,3	1,7
14.3.2011	11.3.2012	4775,5	5,3	1,2	1,7

Tabulka 26: Výsledky predikce SCZT A, topná sezóna 2011/2012

Období predikce		Tepelné zatížení		Rozdíl teplot		Teplota vratné vody		Průtok	
		RMSE	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
Od	Do	kW	%	°C	%	°C	%	m ³ /h	%
31.10.2011	6.11.2011	4992,2	7,3	1,2	1,5	0,5	0,6	24,2	7,6
7.11.2011	13.11.2011	8209,8	9,5	1,7	2,4	1,0	1,4	36,9	9,9
14.11.2011	20.11.2011	8675,6	8,6	1,6	2,3	1,3	1,7	35,6	8,1
21.11.2011	27.11.2011	6601,3	6,8	1,4	1,6	0,8	1,1	29,1	7,3
28.11.2011	4.12.2011	9458,6	9,3	2,3	2,7	1,2	1,5	43,4	9,7
5.12.2011	11.12.2011	4613,5	5,2	1,2	1,4	0,7	0,9	21,0	5,6
12.12.2011	18.12.2011	4014,9	4,3	1,2	1,4	0,7	1,0	17,8	4,8
19.12.2011	25.12.2011	5016,7	5,2	1,5	2,0	1,1	1,5	21,8	5,6
26.12.2011	1.1.2012	5025,1	5,5	1,2	1,6	1,0	1,6	22,5	5,9
2.1.2012	8.1.2012	3622,6	4,4	0,9	1,2	0,6	0,9	15,2	4,3
9.1.2012	15.1.2012	3946,1	4,6	1,1	1,3	0,7	1,0	16,2	4,4
16.1.2012	22.1.2012	4167,2	4,2	1,1	1,4	0,9	1,2	17,1	4,3
23.1.2012	29.1.2012	5140,4	4,3	1,7	2,0	1,1	1,4	18,8	4,2
30.1.2012	5.2.2012	6974,5	5,3	2,5	3,2	2,1	2,4	28,7	5,7
6.2.2012	12.2.2012	6341,6	4,4	3,0	4,1	2,8	3,3	41,2	7,5
13.2.2012	19.2.2012	7490,1	7,5	3,6	3,1	1,3	1,6	40,7	8,3
20.2.2012	26.2.2012	3468,6	4,1	1,2	1,8	1,0	1,4	14,6	3,8
27.2.2012	4.3.2012	4596,4	6,3	1,2	1,9	1,1	1,5	20,8	5,8
5.3.2012	11.3.2012	6776,0	8,6	1,6	2,2	0,8	1,2	30,8	8,0
12.3.2012	18.3.2012	4300,0	6,1	1,3	2,1	1,1	1,8	21,7	6,5

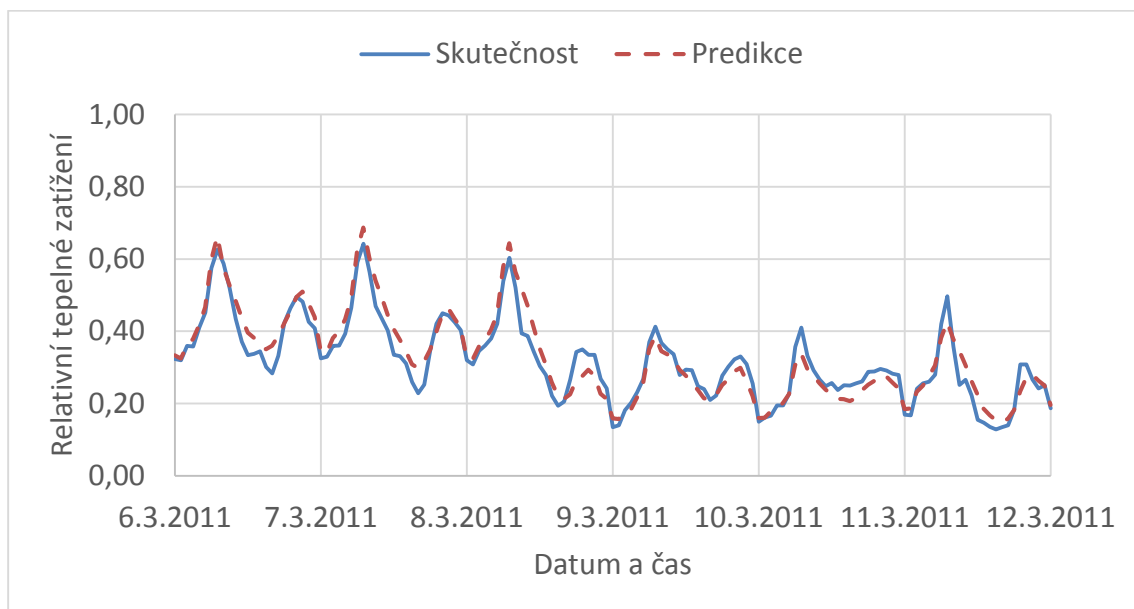
Tabulka 27: Výsledky identifikace SCZT B, topná sezóna 2006/2007

Období identifikace		Tepelné zatížení		Rozdíl teplot	
		RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
Od	Do	kW	%	°C	%
30.10.2006	28.10.2007	2722,4	9,9	1,4	2,2
6.11.2006	4.11.2007	2739,4	10,1	1,4	2,2
13.11.2006	11.11.2007	2741,8	10,0	1,5	2,3
20.11.2006	18.11.2007	2647,1	9,4	1,5	2,4
27.11.2006	25.11.2007	2591,7	9,0	1,6	2,4
4.12.2006	2.12.2007	2483,3	8,5	1,6	2,4
11.12.2006	9.12.2007	2471,4	8,3	1,6	2,4
18.12.2006	16.12.2007	2469,0	8,2	1,6	2,4
25.12.2006	23.12.2007	2498,6	8,3	1,6	2,5
1.1.2007	30.12.2007	2610,1	8,6	1,6	2,5
8.1.2007	6.1.2008	2621,8	8,5	1,6	2,4
15.1.2007	13.1.2008	2642,3	8,5	1,6	2,4
22.1.2007	20.1.2008	2572,9	7,8	1,6	2,3
29.1.2007	27.1.2008	2565,8	7,9	1,6	2,3
5.2.2007	3.2.2008	2500,7	7,8	1,6	2,3
12.2.2007	10.2.2008	2508,9	7,8	1,5	2,2
19.2.2007	17.2.2008	2510,1	7,7	1,5	2,2
26.2.2007	24.2.2008	2527,9	7,9	1,5	2,2
5.3.2007	2.3.2008	2559,8	8,1	1,5	2,2
12.3.2007	9.3.2008	2531,5	7,8	1,5	2,1

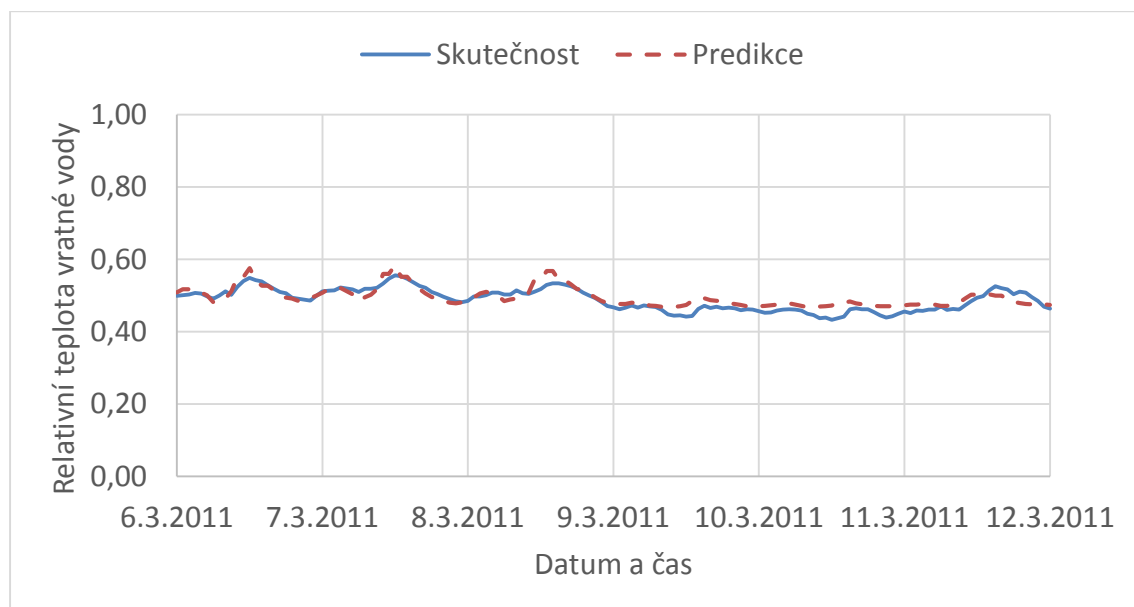
Tabulka 28: Výsledky predikce SCZT B, topná sezóna 2006/2007

Období predikce		Tepelné zatížení		Rozdíl teplot		Teplota vratné vody		Průtok	
		RMSE	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
Od	Do	kW	%	°C	%	m ³ /h	°C	m ³ /h	%
29.10.2007	4.11.2007	2109,7	9,8	1,1	2,0	1,1	1,7	10,0	8,6
5.11.2007	11.11.2007	2056,3	5,9	2,3	3,7	2,3	3,6	9,0	6,1
12.11.2007	18.11.2007	2291,4	5,6	2,8	5,0	2,8	4,2	13,6	6,9
19.11.2007	25.11.2007	3192,5	10,5	2,2	3,1	2,0	3,1	13,5	9,7
26.11.2007	2.12.2007	1883,8	5,3	2,0	2,8	1,9	2,9	9,9	6,7
3.12.2007	9.12.2007	2233,4	7,1	1,7	2,8	1,5	2,4	11,6	7,3
10.12.2007	16.12.2007	1320,2	3,7	1,9	3,0	1,9	3,1	6,7	4,8
17.12.2007	23.12.2007	2777,8	7,0	1,7	2,0	1,6	2,3	11,8	8,0
24.12.2007	30.12.2007	4509,8	9,8	4,1	4,0	2,6	3,4	17,6	9,6
31.12.2007	6.1.2008	3690,2	7,9	1,6	2,0	1,6	2,2	14,3	8,8
7.1.2008	13.1.2008	2548,2	7,6	1,7	2,4	1,7	2,5	12,1	8,6
14.1.2008	20.1.2008	2446,1	8,0	1,4	2,0	1,3	1,9	11,0	7,8
21.1.2008	27.1.2008	2059,3	6,4	1,4	2,0	1,4	2,0	10,1	6,6
28.1.2008	3.2.2008	1795,0	5,1	1,5	2,1	1,4	2,1	8,0	5,3
4.2.2008	10.2.2008	1951,4	6,3	1,3	2,0	1,3	2,0	8,5	6,2
11.2.2008	17.2.2008	2202,8	5,3	2,5	2,5	1,4	2,0	10,0	6,1
18.2.2008	24.2.2008	2294,7	7,2	1,3	1,9	1,2	1,9	10,2	6,9
25.2.2008	2.3.2008	3052,0	12,4	1,8	3,2	1,6	2,8	17,2	13,5
3.3.2008	9.3.2008	2533,4	9,1	1,8	2,5	1,6	2,6	13,2	10,4
10.3.2008	16.3.2008	2865,6	12,0	2,0	3,2	1,8	3,1	17,0	14,1

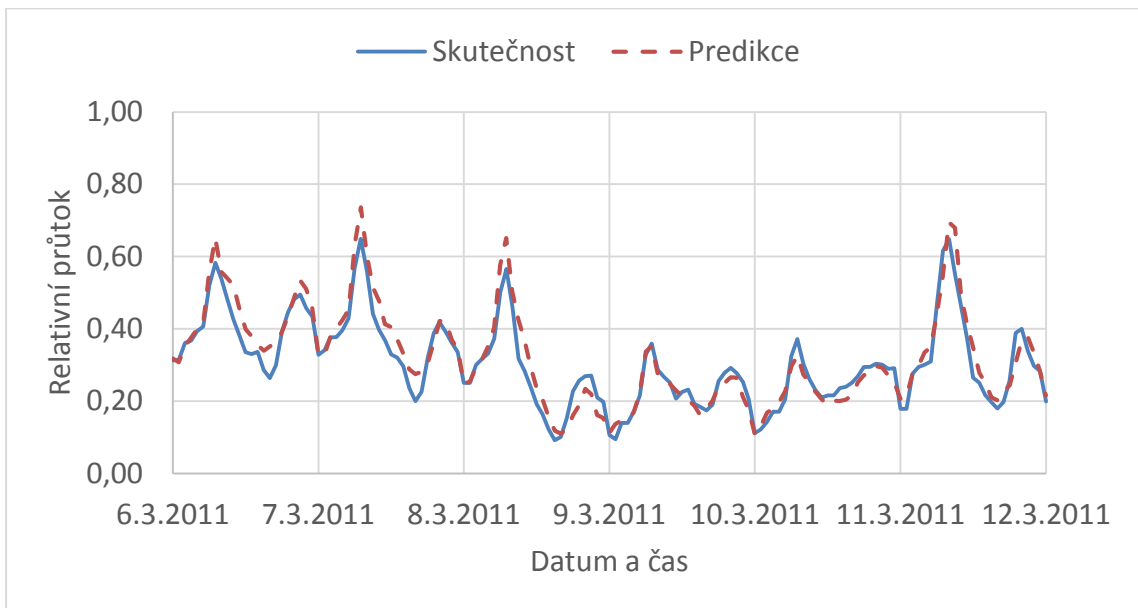
Obrázky 33 až 38 zobrazují ukázkou tepelného zatížení, rozdílu teplot v těžišti a průtoku ve vybraném týdnu SCZT A respektive SCZT B.



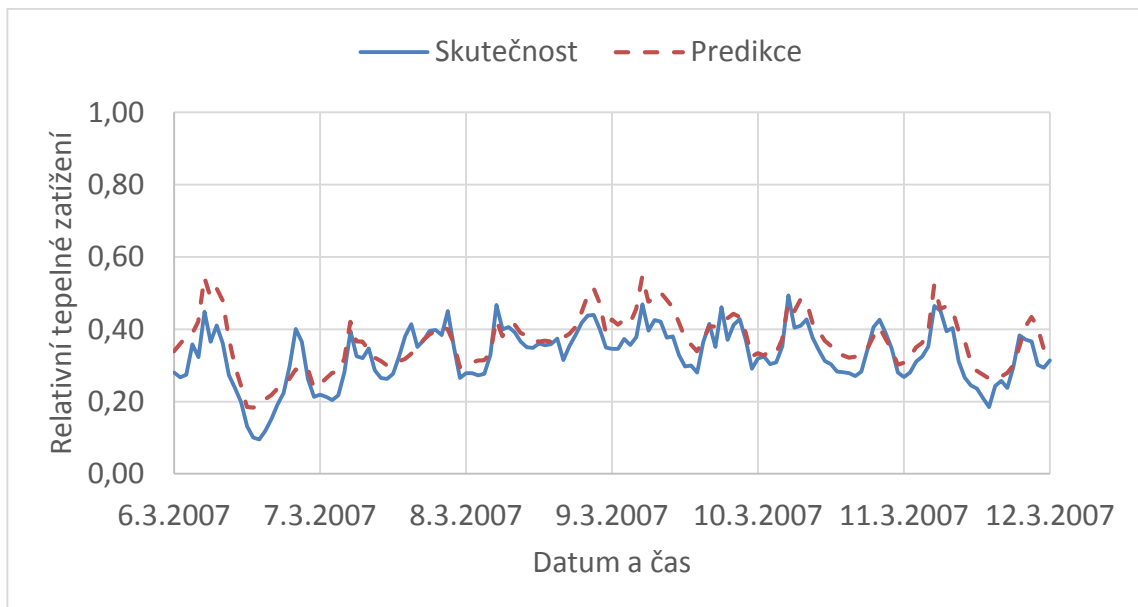
Obrázek 33: Predikce tepelného zatížení SCZT A od 6. 3. 2011 do 12. 3. 2011



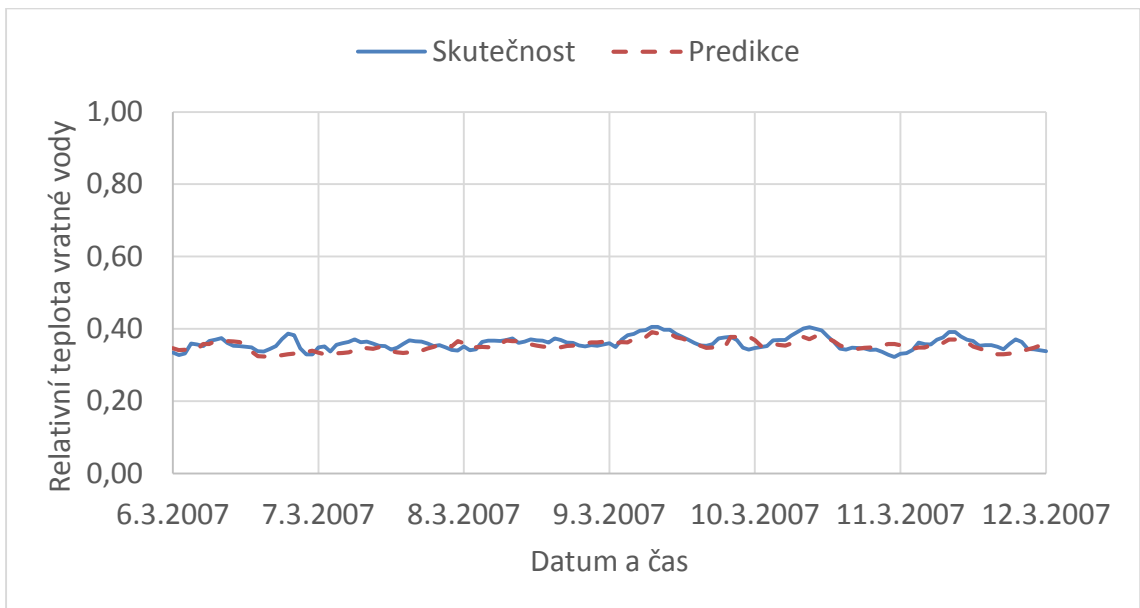
Obrázek 34: Predikce teploty vratné vody SCZT A od 6. 3. 2011 do 12. 3. 2011



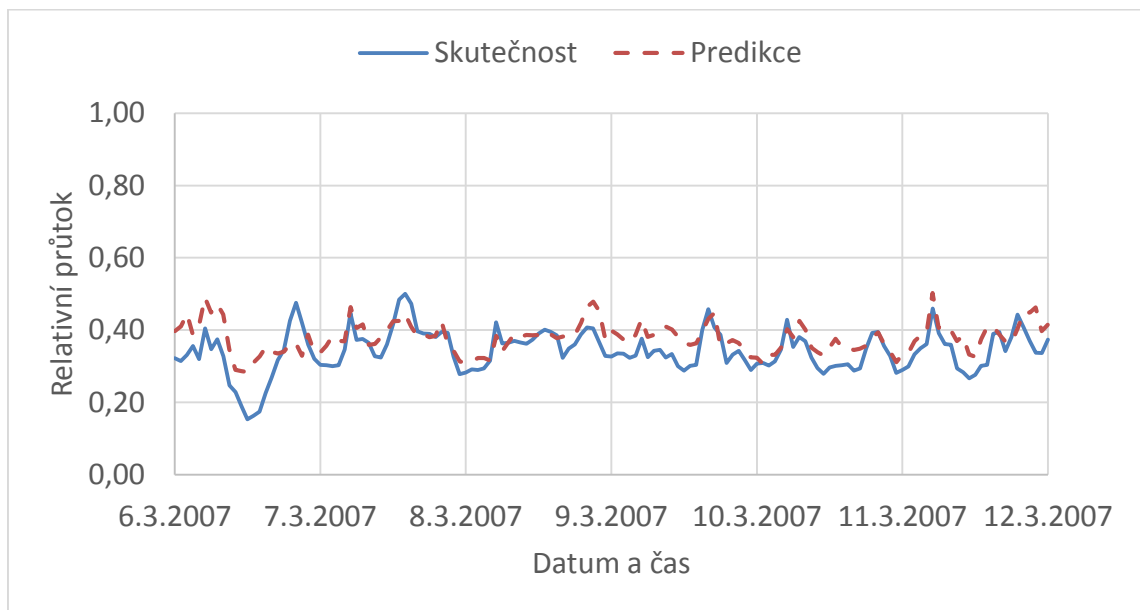
Obrázek 35: Predikce průtoku v SCZT A od 6. 3. 2011 do 12. 3. 2011



Obrázek 36: Predikce tepelného zatížení SCZT B od 6. 3. 2007 do 12. 3. 2007



Obrázek 37: Predikce teploty vratné vody SCZT B od 6. 3. 2007 do 12. 3. 2007



Obrázek 38: Predikce průtoku v SCZT B od 6. 3. 2007 do 12. 3. 2007

Při srovnání výsledků vychází aproximace i predikce lépe pro SCZT A než pro SCZT B, což je výraznější především u průtoku. Naopak nejnižší rozdíly v kvalitě predikce (dle vypočtených hodnot RMSE a MAPE) jsou u teploty vratné vody. Průtok SCZT A se liší od SCZT B svým průběhem, kdy SCZT B má menší ranní a večerní špičky, což může způsobovat horší kvalitu predikce.

Z hlediska aproximace tepelné zátěže byla nejnižší střední absolutní procentuální chyba (MAPE) pro celou topnou sezónu SCZT A 5,2 % a nejvyšší 6,2 %. U SCZT B byla nejnižší MAPE aproximace tepelného zatížení pro celou topnou sezónu 7,1 % a nejvyšší 10,1 %. Nejnižší MAPE predikce tepelného zatížení pro jeden týden topné sezóny pro SCZT A byla 4,1 % a nejhorší 9,5 % a pro SCZT B 3,7 % až 12,3 %. Naproti tomu výsledky aproximace a predikce rozdílu teplot jsou výrazně lepší. Stejně tak predikce teploty vratné vody je z hlediska ukazatele MAPE kvalitnější než predikce průtoku, což platí především pro SCZT B (konkrétní data jsou uvedeny v Příloze I).

Pokud porovnáme výsledky se zdrojem [13], tak autor srovnává predikci pro celé čtvrtletí a pro topnou sezónu (druhé a třetí čtvrtletí) uvádí relativní chybu 13,03 až 15,22. Zdroj [15] uvádí procentuální fit (bohužel bez uvedení konkrétní metody) jako 48 % až 70 % v závislosti na konkrétních podmínkách v tepelné síti. Zdroj [20] uvádí v práci průměrnou relativní chybu (Average Relative Error) řádově 5 až 10 %. Zdroj [30] uvádí RMSE vratné vody 3,8 až 4,2 %. Pro podrobnější srovnání by bylo nutné testování metod na stejných datech, ve stejných intervalech a s použitím stejných ukazatelů kvality predikce

ZÁVĚR

Základními výstupy práce jsou původní metody a postupy pro predikci vybraných parametrů distribuce tepla v systému centrálního zásobování teplem (SCZT). Konkrétně jde o metody a postup aproximace, predikce a o návrh znovupoužitelných modulů softwarové implementace. Důraz byl kladen na jednoduché nasazení, bez nutnosti znalosti podrobných informací o SCZT. Vstupními veličinami predikce jsou proto pouze teplota topné vody, hmotnostní průtok a venkovní teplota vzduchu. Aplikace je určena operátorům SCZT jako simulátor pro plánování teploty topné vody a také vedoucím pracovníkům jako nástroj pro podporu jejich rozhodování.

V práci je popsán současný stav problematiky, metody výpočtu dopravního zpoždění, dodávaného výkonu a tepelného zatížení primární sítě. Dále jsou popsány navržené metody výpočtu aproximace tepelného zatížení a rozdílu teplot na vstupu a výstupu do těžiště systému. Následně je navržen postup predikce teploty vratné vody a hmotnostního průtoku vzhledem k zadané teplotě topné vody a venkovní teplotě vzduchu. Součástí predikce je i určení hodnot tepelné zatížení.

Metody byly úspěšně ověřeny na datech ze dvou SCZT a byla zvolena nejvhodnější kombinace aproximačních a optimalizačních funkcí. Ukázková implementace byla vytvořena jako doplněk pro Microsoft Excel 2010 a vyšší. Ovšem základní moduly jsou navrženy tak, aby byly přenositelné i pro jiné platformy, například webové aplikace, mobilní telefony nebo tablety. Návrh také umožňuje spouštění výpočtu na vzdáleném serveru, nezávisle od logiky aplikace.

Další práce se zaměří na testování vlivů dalších faktorů, především meteorologických a sociálních na tepelné zatížení. Dále bude prozkoumána možnost automatického určování těžiště SCZT a možnosti zpřesnění předpovědi v přechodovém období na začátku a konci topného období.

HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Hlavními výsledky práce jsou:

- Vytvoření a ověření původních metod pro predikci následujících parametrů distribuce tepla v systému centrálního zásobování teplem (SCZT). Důraz je kladen na jednoduché nasazení metod v praxi bez nutnosti znalosti podrobných informací o SCZT.
 - Predikované veličiny
 - Tepelné zatížení.
 - Teplota vratné vody.
 - Hmotnostní průtok topného média.
 - Vstupní veličiny:
 - Plánovaná teplota topné vody.
 - Venkovní teplota vzduchu.
- Vytvoření softwarového nástroje, sloužícího operátorům SCZT jako simulátor pro plánování teploty topné vody a také vedoucím pracovníkům jako nástroj pro podporu jejich rozhodování.
- Vytvoření vzorových aplikačních modulů, které je možné díky použitým návrhovým a architektonickým vzorům a technikám znovu využít v desktopových, webových nebo mobilních aplikacích a to jak ve variantě tlustého i tenkého klienta architektury klient-server. Návrh umožňuje také agregaci zdrojů dat od různých poskytovatelů a v různých formátech bez nutnosti změny vlastní aplikační a prezentační vrstvy.
- Návrh implementace evolučních algoritmů umožňujících paralelizaci jak na homogenních, tak heterogenních výpočetních systémech.

PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Přínosem pro vědu je vytvoření a ověření původních metod pro predikci vybraných parametrů distribuce tepla v systému centrálního zásobování teplem (SCZT). Konkrétně jde o metody predikce teploty vratné vody a hmotnostního průtoku. Vstupními parametry predikce je žádaná teplota topné vody a predikce venkovní teploty vzduchu. Součástí predikce je i určení hodnot tepelného zatížení. Důraz je kladen na jednoduché nasazení metod v praxi bez nutnosti znalosti podrobných informací o SCZT

Přínosem pro praxi je vytvoření softwarového nástroje, sloužícího operátorům SCZT jako simulátor pro plánování teploty topné vody a také vedoucím pracovníkům jako nástroj pro podporu jejich rozhodování. Zvolené metody architektury aplikace, návrhové vzory a techniky umožňují znovuvyužití vytvořených vzorových aplikačních modulů v desktopových, webových nebo mobilních aplikacích a to jak ve variantě tlustého i tenkého klienta architektury klient-server. Návrh umožňuje také agregaci zdrojů dat od různých poskytovatelů a v různých formátech bez nutnosti změny vlastní aplikační a prezentační vrstvy.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MADSEN, Henrik, et al. On flow and supply temperature control in district heating systems. *Heat Recovery Systems and CHP*, 1994, 14.6: 613-620.
- [2] BENONYSSON, Atli, Benny BOHM a Hans RAVN. Operational Optimization in a District Heating System. *Energy Convers.* 1995, roč. 36, č. 5.
- [3] PÁLSSON, Halldór, Helge LARSEN, Benny BØHM, Hans RAVN a JiJun ZHOU. *Equivalent models of district heating systems for on-line minimization of operational costs of the complete district heating system.* Lyngby: Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark, 1999. ISBN 87-747-5221-9.
- [4] BENONYSSON, Atli. *Dynamic Modelling and Operational Optimization of District Heating Systems. Denmark*, 1991. PhD thesis. Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark.
- [5] ZHAO, Hongping. *Analysis, Modelling and Operational Optimization of District Heating Systems. Denmark*, 1995. PhD thesis. Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark.
- [6] IBLER, Zbyněk. *Technický průvodce energetika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.
- [7] HELLER, Alfred. *Demand Modelling for Central Heating System.* Lyngby, Denmark: Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, 2000. ISBN 87-7877-042-4.
- [8] WERNER, S.E. *The Heat Load in District Heating System.* Sweden: Chalmers University of Technology, 1984.
- [9] ARONSSON, Av Stefan. *Fjärrvärmekunders värme- och effektbehov: analys baserad på mätresultat från femtio byggnader = [Heat load of*

- buildings supplied by district heating*] : [an analysis based on measurements in 50 buildings]. Göteborg: Chalmers tekniska högsk, 1996. ISBN 91-719-7383-4. Thesis. Chalmers University of Technology
- [10] KARAFIÁT, Josef. *SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTRINY A TEPLA* [online]. Praha, 2006[cit. 2013-06-12]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>
- [11] LARSSON, Av Gunnar. *Dynamik i fjärrvärmesystem (On Dynamics in district Heating Systems)*. Göteborg: Chalmers tekniska högsk, 1999. ISBN 91-719-7814-3.
- [12] BØHM, Benny, et al. *Simple models for operational optimisation*. Netherlands Agency for Energy and the Environment, 2002.
- [13] DOTZAUER, Erik. Simple model for prediction of loads in district-heating systems. *Applied Energy*. 2002, 73, s. 277-284
- [14] ARVASTSON, L. *Stochastic modelling and operational optimization in district-heating systems*. Lund, Sweden, 2001. Disertační práce. Lund University.
- [15] SAARINEN, Linn. *Modelling and control of a district heating system*. Uppsala, 2008. 67 s. Diplomová práce. Uppsala University. ISSN 1650-8300.
- [16] HLUBINKA, Daniel. Metody pro prokládání křivek s použitím na reálných datech. In: *Robust*. 1998. p. 55-76.
- [17] TJØRVE, Even; TJØRVE, Kathleen. A unified approach to the Richards-model family for use in growth analyses: why we need only two model forms. *Journal of theoretical biology*, 2010, 267.3: 417-425.
- [18] GOLOVCHENKO, Nikolai. *Least-squares Fit of a Continuous Piecewise Linear Function*. 2004. Dostupné z: <http://www.golovchenko.org/docs/ContinuousPiecewiseLinearFit.pdf>

- [19] ŠÍPAL, Jaroslav. *Modelování dodávky tepelné energie do sítě centralizovaného zásobování teplem: Computer-based adaptive prediction of consumption in heat station networks : teze habilitační práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, 32 s. ISBN 978-80-7318-775-0.
- [20] CHRAMCOV, Bronislav. *Algoritmy řízení ve výrobě a rozvodu tepla - předpověď denního diagramu dodávky tepla*. Zlín, 2006. disertační práce (Ph.D.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky.
- [21] CHRAMCOV, Bronislav. Identification of time series model of heat demand using Mathematica environment. *In Recent Researches in Automatic Control. Montreux : WSEAS Press, 2011, s. 346-351. ISBN 978-1-61804-004-6.*
- [22] JENKINS, George E. P. Box and Gwilym M. *Time series analysis: forecasting and control*. rev. ed. Prentice Hall, 1976. ISBN 01-390-5100-7.
- [23] BALATE, Jaroslav, et al. Strategy evolution of control of extensive district heating systems. In: Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. *POWERENG 2007. International Conference on. IEEE, 2007. p. 678-683.*
- [24] BALATE, J.; NAVRATIL, P.; CHRAMCOV, B. Qualitatively-quantitative method of heat power in the hot water supply for the district heating system. *ARTEP 2008, 2008.*
- [25] BALATE J., NAVRATIL P., CHRAMCOV, B. Qualitatively-quantitative method of heat power in the hot water supply for the district heating system. In: *ARTEP 2008, TU Kosice.*
- [26] VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam. Simulation model of heat distribution and consumption in municipal heating network.

International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Science, 2010, roč. 4, č. 4, s. 240-248. ISSN 1998-0140.

- [27] VASEK, L.; DOLINAY, V. Simulation model of heat distribution and consumption in practical use. In: *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modeling and Simulation*, Lanzarote, WSEAS Press. 2011. p. 321-324.
- [28] DOLINAY V.; VASEK L. Municipal Heating Network Simulation Experiments Based on Days with Similar Temperature. *RECENT RESEARCHES in AUTOMATIC CONTROL: 13th WSEAS International Conference on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING & SIMULATION (ACMOS '11)*. 2011, 13, s. 404-407.
- [29] VAŘACHA, Pavel, JAŠEK, Roman. ANN Synthesis for an Agglomeration Heating Power Consumption Approximation. In *Recent Researches in Automatic Control. Montreux* : WSEAS Press, 2011, s. 239-244. ISBN 978-1-61804-004-6.
- [30] VAŘACHA, P. Impact of Weather Inputs on Heating Plant - Agglomeration Modelling. *Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Neural Network*. 2009
- [31] ZELINKA, Ivan. ANALYTIC PROGRAMMING BY MEANS OF NEW EVOLUTIONARY ALGORITHMS. In *New Trends in Physics. Brno: VUT*, 2001, s. 210 - 214. ISBN 80-214-1992-X.
- [32] ZELINKA, Ivan, VOLNÁ, Eva. Neural Network Synthesis by Means Of Analytic Programming - Preliminary Results. In *International Conference on Soft Computing Mendel'05*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, s. 60-66. ISBN 80-214-2135-5.
- [33] ZELINKA, Ivan, KOLOMAZNÍK, Karel. Analytic Programming by Means of SOMA Algorithm. In *Intelligent Computing and Information*

- Systems*. Cairo : Nubar Printing House, 2002, s. 149-154. ISBN 977-237-172-3.
- [34] LEHTORANTA, O., SEPPÄLÄ, J., KOIVISTO, H., KOIVO, H. (2000). Adaptive district heat load forecasting using neural networks. *Proceedings of Third international Symposium on Soft Computing for Industry*, Maui, USA, June, 2000.
- [35] HIPPERT, H.S., PEDREIRA, C.E., SOUZA, R.C. (2001). Neural networks for short-term forecasting: a review and evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 16, Issue 1, February 2001, pages 44–55, ISSN 0885-8950.
- [36] PRINC, Michal. *Algoritmy řízení ve výrobě a rozvodu tepla - výpočtový software pro simulaci provozu zokruhovaných tepelných sítí*. Zlín, 2006. disertační práce (Ph.D.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky.
- [37] HELGE L., BENNY B., MICHAEL W. *A comparison of aggregated models for simulation and operational optimisation of district heating networks*, Energy Conversion and Management, Volume 45, Issues 7-8, May 2004, pp. 1119-1139, ISSN 0196-8904
- [38] ČSN 38 3350. *Zásobování teplem, všeobecné zásady*. Praha: Český normalizační institut, 1989. Třídící znak 38 3350.
- [39] Vyhláška č. 193/2007 Sb. kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu. In: *Sbírka zákonů č. 62/2007.*
- [40] Vyhláška č. 194/2007 Sb. kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími dodávku tepelné energie konečným spotřebitelům. In: *Sbírka zákonů č. 62/2007.*

- [41] JIANWEI, Li. Comparison of the capability of peak functions in describing real chromatographic peaks. *Journal of Chromatography A*. 2002, 952, s. 63–70.
- [42] DEVENDRA, SAHAL. A Generalized Logistic Model for Technological Forecasting. *Technological forecasting and social change*. 1975, 7, s. 81-97.
- [43] KAY, J. M.; NEDDERMAN, R. M. *Fluid Mechanics and Transfer Processes*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 602 s.
- [44] KENNEDY, James; EBERHART, Russell. Particle swarm optimization. In: *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on. IEEE*, 1995. p. 1942-1948.
- [45] BRATTON, Daniel; KENNEDY, James. Defining a standard for particle swarm optimization. In: *Swarm Intelligence Symposium, 2007. SIS 2007. IEEE. IEEE*, 2007. p. 120-127.
- [46] Hala, Roman. *Srovnání paralelní implementace algoritmu PSO v OpenCL, CUDA a C++ AMP*. Zlín, 2013. diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky
- [47] MARTÍ L., GARCÍA J., BERLANGA, A., MOLINA, M. An approach to stopping criteria for multi-objective optimization evolutionary algorithms: the MGBM criterion. In *Proceedings of the Eleventh Conference on Congress on Evolutionary Computation*. Trondheim, Norway, May 18 - 21, 2009. IEEE Press, Piscataway, NJ, 1263-1270.
- [48] ZELINKA Ivan, In : G. ONWUBOLU, B.V.BABU, *New Optimization Techniques in Engineering*, Springer-Verlag, 2004, ISBN 3-540-20167X
- [49] STORN, K; PRICE, K. Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*. 1997, 11, s. 341-359.

- [50] PRICE, Kenneth V, Rainer M STORN a Jouni A LAMPINEN. *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Berlin: Springer, 2005, xix, 538 s. ISBN 35-402-0950-6
- [51] Auto-Parallelization and Auto-Vectorization. *MICROSOFT. MSDN Library* [online]. 2013 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh872235.aspx>
- [52] MUNSHI, Aaftab. *OpenCL programming guide*. 1. vyd. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2012, xliv, 603 p. ISBN 03-217-4964-2.
- [53] KHRONOS OPENCL WORKING GROUP. *The OpenCL Specification 1.2*. 2012. Dostupné z: <http://www.khronos.org/registry/cl/specs/opencl-1.2.pdf>
- [54] MICROSOFT CORPORATION. *C++ AMP : Language and Programming Model: Version 1.0*. 2012. Dostupné z: <http://download.microsoft.com/download/4/0/E/40EA02D8-23A7-4BD2-AD3A-0BFFFFB640F28/CppAMPLanguageAndProgrammingModel.pdf>
- [55] *Cuda Toolkit Documentation*. NVIDIA. [online]. [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://docs.nvidia.com/cuda/index.html>
- [56] KRÁL, Erik; ČÁPEK, Petr, VAŠEK, Lubomír;. Heat Load Modelling for District Heating Plants Using an OpenCL-based Algorithm, *International journal of applied mathematics and informatics*, Volume 6, 2012, 181-188, ISSN: 2074-1278.
- [57] JANOŠTÍK, Jakub. *Implementace vybraných evolučních algoritmů v OpenCL*. Zlín, 2012. bakalářská práce (Bc.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky
- [58] Inversion of Control Containers and the Dependency Injection pattern. *In: Martin Fowler.com [online]*. 2004 [cit. 2013-06-12]. Dostupné z: <http://www.martinfowler.com/articles/injection.html>

- [59] Implementing the MVVM Pattern. *Microsoft Developer Network [online]*. 2012. [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: [http://msdn.microsoft.com/enus/library/gg405484\(PandP.40\).aspx](http://msdn.microsoft.com/enus/library/gg405484(PandP.40).aspx)
- [60] REENSKAUG, Trygve. *Models-views-controllers*. Technical note, Xerox PARC, 1979, 32: 55.
- [61] BURBECK, Steve. *Applications programming in smalltalk-80 (tm): How to use model-view-controller (mvc)*. Smalltalk-80 v2. 5. ParcPlace, 1992.
- [62] FOWLER, Martin. GUI Architectures. *Martinfowler.com [online]*. 2006 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://martinfowler.com/eaDev/uiArchs.html>
- [63] GREER, Derek. Interactive Application Architecture Patterns. *Aspiringcraftsman.com [online]*. 2007 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://aspiringcraftsman.com/2007/08/25/interactive-application-architecture/>
- [64] SMITH, Josh. WPF apps with the model-view-ViewModel design pattern. *MSDN magazine*, 2009.
- [65] Implementing the MVVM Pattern. MICROSOFT. MSDN [online]. 2012 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: [http://msdn.microsoft.com/enus/library/gg405484\(v=pandp.40\).aspx](http://msdn.microsoft.com/enus/library/gg405484(v=pandp.40).aspx)
- [66] MVVM QuickStart. MICROSOFT. *MSDN [online]*. 2012 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: [http://msdn.microsoft.com/enus/library/gg430869\(v=pandp.40\).aspx](http://msdn.microsoft.com/enus/library/gg430869(v=pandp.40).aspx)
- [67] ČÁPEK, Petr. Návrh a implementace multiplatformní aplikace s využitím technologie Mono pro platformy iOS, Windows Phone a Android. In: *Studentská tvůrčí a odborná činnost STOČ 2013 [online]*. 2013 [cit. 2013-06-12]. Dostupné z: http://stoc.fai.utb.cz/PDF/capek_petr.pdf

- [68] ZELINKA, Ivan. *Umělá inteligence v problémech globální optimalizace*. Praha: BEN, 2002. 192 s. ISBN 80-7300-069-5.
- [69] Event-based Asynchronous Pattern (EAP). MICROSOFT. *MSDN [online]*. 2013 [cit. 2013-06-10]. Dostupné z: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms228969.aspx>
- [70] Task-based Asynchronous Pattern (TAP). MICROSOFT. *MSDN [online]*. 2013 [cit. 2013-06-12]. Dostupné z: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh873175.aspx>
- [71] Parallel LINQ (PLINQ). *MSDN [online]*. 2013 [cit. 2013-06-10]. Dostupné z : <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd460688.aspx>
- [72] MIKALA, Roman. *Srovnání výkonu algoritmů Particle Swarm Optimization, Self Organizing Migrating Algorithm a Differential Evolution na problému predikce dodávaného tepla v systému centrálního zásobování teplem Zlín*, 2013. bakalářská práce (Bc.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky
- [73] KRAMPL, Jakub. *Implementace vybraných evolučních algoritmů v prostředí .NET*. Zlín, 2011. bakalářská práce (Bc.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky
- [74] *Math.NET Numerics [online]*. 2013 [cit. 2013-06-12]. Dostupné z: <http://numerics.mathdotnet.com>

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

KRÁL, Erik, ČÁPEK, Petr, VAŠEK, Lubomír. Heat Load Modelling for District Heating Plants Using an OpenCL-based Algorithm, *International journal of applied mathematics and informatics. International Journal of Applied Mathematics and Informatics*, 2012, roč. 2012, č. 6, s. 181-188. ISSN 2074-1278.

KRÁL, Erik, ČÁPEK, Petr. OpenCL-based Algorithm for Heat Load Modelling of District Heating System. In *Recent Researches in Circuits, Systems, Control and Signals*. Florence : WSEAS Press, 2012, s. 400-404. ISBN 978-1-61804-035-0.

KRÁL, Erik, VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, ČÁPEK, Petr. The Use of Peak Functions in Heat Load Modeling of District Heating System. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Science*, 2011, roč. 5, č. 7, s. 1241-1248. ISSN 1998-0140.

KRÁL, Erik, VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, ČÁPEK, Petr. Usage of Peak Functions in Heat Load Modeling of District Heating System. In *Recent Researches in Automatic Control*. Montreux : WSEAS Press, 2011, s. 404-406. ISBN 978-1-61804-004-6.

VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, KRÁL, Erik. Prediction of Heat Consumption Parameters in Distribution Network. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulations*, 2012, roč. 6, č. 1, s. 169-176. ISSN 1998-0159.

VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, KRÁL, Erik. Methods for Prediction of Heat Distribution Parameters. In *Mathematical Methods and Techniques in Engineering and Environmental Science*. Venice : WSEAS Press (IT), 2011, s. 335-340. ISBN 978-1-61804-046-6.

DOLINAY, Viliam, VAŠEK, Lubomír, KRÁL, Erik. Heat Supplies Prediction Based on Similar Days. In *Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Interdisciplinary Solutions"*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2010, s. 227-228. ISBN 978-3-901509-73-5.

KRÁL, Erik, VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, VAŘACHA, Pavel. Usage of PSO Algorithm for Parameters Identification of District Heating Network Simulation Model. In *14th WSEAS International Conference on Systems. Latest Trends on Systems. Volume II*. Rhodes : WSEAS Press (GR), 2010, s. 657-659. ISBN 978-960-474-214-1.

KRÁL, Erik, DOLINAY, Viliam, VAŠEK, Lubomír, VAŘACHA, Pavel. Using PSO Algorithm for Parameter Identification of Simulation Model of Heat Distribution and Consumption in Municipal Heating Network. In *Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Interdisciplinary Solutions"*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2010, s. 1043 - 1044. ISBN 978-3-901509-73-5.

KRÁL, Erik. Optoelectronic sensor for the support of the control of the walking robot. In *Bezpečnostní technologie, systémy a management 2009*. Zlín : UTB, 2009, s. 1-5. ISBN 978-80-7318-864-1.

KRÁL, Erik. Optoelectronic Man-Operator Interface for Object Modeling in Virtual Reality. In *Proceedings International Conference with Elements of Scientific School for Youth*. Petrohrad, Ruská Federace : Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj politechničeskij universitet, 2009, s. 348-350. ISBN 978-5-904030-94-0.

KRÁL, Erik. Simple Optoelectronic Control of a Wheelchair for Quadriplegic Patients. In *Proceedings of XXXIIIrd Seminary ASR'08*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008, s. 24. ISBN 978-80-248-1727-9.

KRÁL, Erik. Simple optoelectronic exteroceptive sensor for controlling and learning the dynamical equilibrium of a walking robot. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*. Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008, s. 971-976. ISBN 978-981-283-576-5.

KVASNICA, Milan, VAŠEK, Vladimír, KRÁL, Erik, MAŇAS, Miroslav. Proof of the Accuracy of the Multi Component Sensory System for Robotics, Engineering Constructions and Human-Machine Interface. In *Proceedings of the 8th International Carpathian Conference ICC 2007*. Košice : SSAKI TU Košice, BERG Faculty, 2007, s. 393-396. ISBN 978-80-8073-805-1.

BRIŠ, Petr, KRÁL, Erik. Rozvoj výuky v oblasti managementu kvality pomocí simulace podnikových činností s využitím nástrojů pro počítačovou podporu řízení jakosti. In *sborník z konference Controlling a manažerstvo kvality v podnicích*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2006, s. 150-155. ISBN 80-228-1683-3.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Absolvovaná VŠ a profesní růst:

- 2005 - dosud, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně (UTB ve Zlíně), Fakulta aplikované informatiky, studijní program Chemické a procesní inženýrství, obor Technická kybernetika, kombinované doktorské studium.
- 2001 - 2006, UTB ve Zlíně, Fakulta technologická, studijní program Inženýrská informatika, obor Informační technologie, inženýrské studium. VŠ diplom s vyznamenáním.
- 1997 - 2002, UTB ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, studijní program Management a ekonomika, magisterské studium.

Průběh zaměstnání:

- 2008 - dosud - Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav počítačových a komunikačních systémů, asistent.
- 2003 - 2008, Profí, s. r. o. Zlín - vývojář software (MS SQL Server, MS Navision DB), smluvní programátor.

Vědeckovýzkumné aktivity:

- Národní program výzkumu II - Inteligentní systém pro řízení energetického systému městské aglomerace. Spoluřešitel, (2006 - 2010).
- FRVŠ 2793 - Zřízení Laboratoře procesní a asistenční robotiky, Spoluřešitel (2008).

Výuka:

- Objektové programování.
- Programování.
- Hradlová pole.
- Vedení více než 32 diplomových a bakalářských prací.

Software:

- VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, KRÁL, Erik, VAŘACHA, Pavel, PÁLKA, Jiří, SLOVÁK, Dalibor. Simulation model of heat distribution. 2010,
- KRÁL, Erik. District Heating System Approximation. 2010,
- VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, KRÁL, Erik, VAŘACHA, Pavel. ICSE pro provozovatele sekundární distribuční sítě – SD. 2011,
- VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, KRÁL, Erik, VAŘACHA, Pavel, PÁLKA, Jiří, SLOVÁK, Dalibor. Heat consumption predictor. 2010,
- KRÁL, Erik. Predikce dodávaného tepla do energetického systému městské aglomerace: doplněk Microsoft Excel. 2011,
- ČÁPEK, Petr, KRÁL, Erik. Informační systém pro podporu řízení, správu a zjišťování aktuálního stavu rozvrhované výuky. 2011,
- VAŠEK, Lubomír, DOLINAY, Viliam, KRÁL, Erik, VAŘACHA, Pavel. ICSE pro výrobce tepla a provozovatele primární distribuční sítě – VTaPD. 2011,

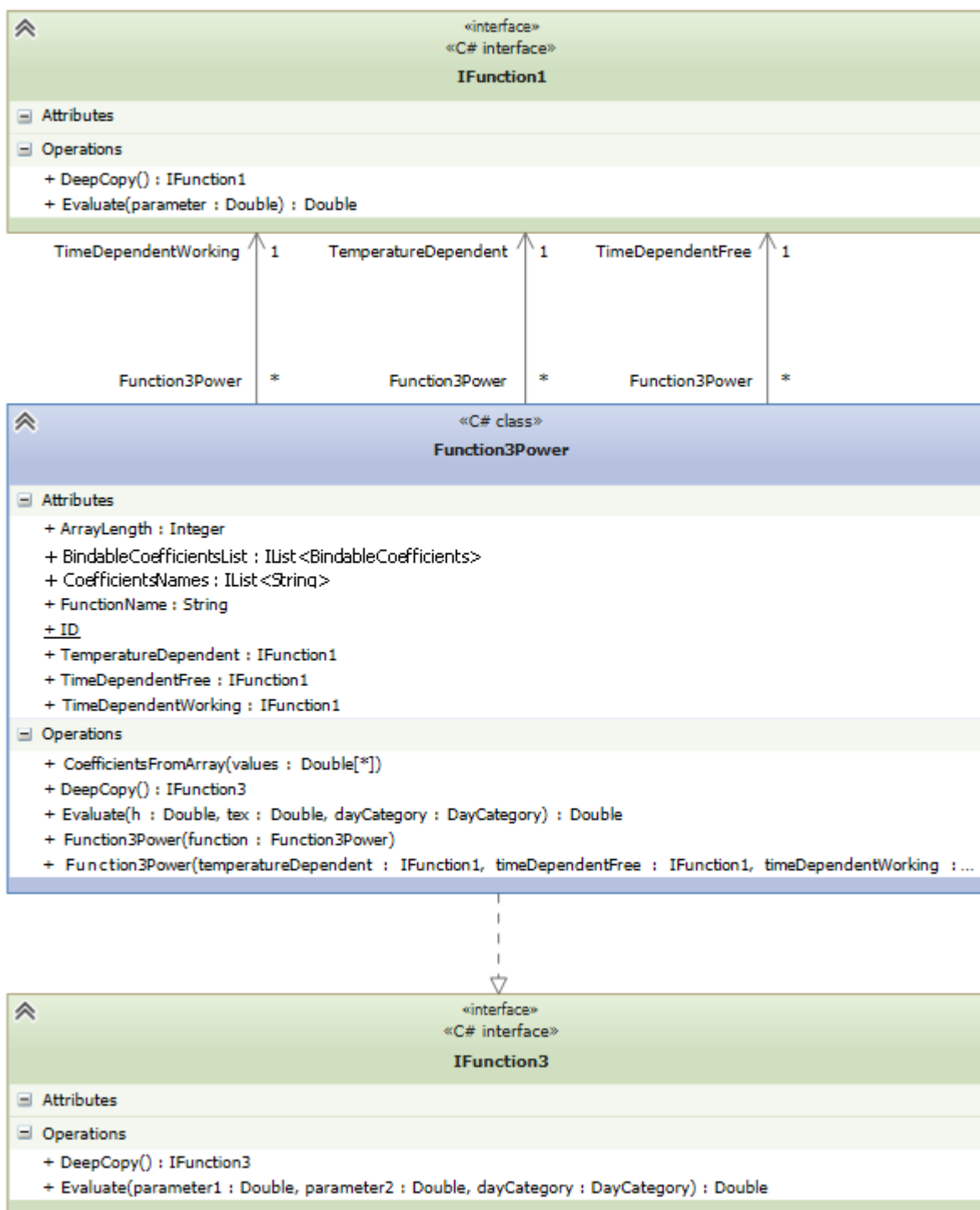
Odborné zájmy

- Predikce v systému centrálního zásobování teplem.
- Softwarové architektury.

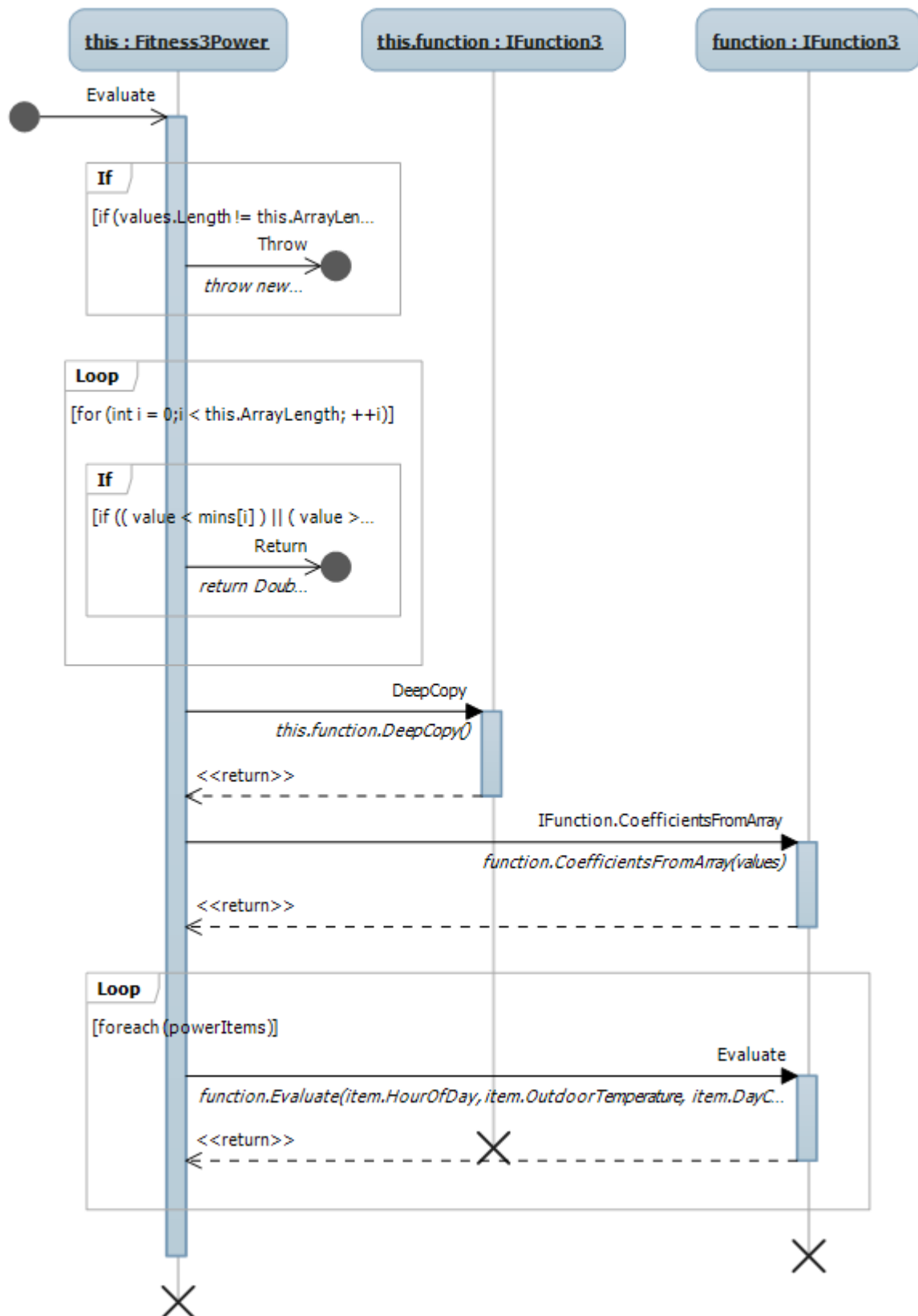
SEZNAM PŘÍLOH

- I. Diagram třídy implementující aproximaci tepelného zatížení.
- II. Sekvenční diagram výpočtu hodnoty účelové funkce (RMSE).
- III. Sekvenční diagram běhu optimalizační služby.

I. Diagram třídy implementující aproximaci tepelného zatížení



II. Sekvenční diagram výpočtu hodnoty účelové funkce (RMSE)



III. Sekvenční diagram běhu optimalizační služby

