



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

CHYTRÁ DOMÁCNOST: UČÍCÍ SE ŘÍZENÍ VYTÁPĚNÍ

SMART HOME: LEARNING CONTROL OF HEATING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MATEJ PAROBEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK MATERNA, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Student: **Parobek Matej**
Program: Informační technologie
Název: **Chytrá domácnost: učící se řízení vytápění**
Smart Home: Learning Control of Heating
Kategorie: Vestavěné systémy

Zadání:

1. Proveďte rešerši existujících řešení pro řízení zdroje tepla a jednotlivých termostatických ventilů.
2. Navrhněte hardwarovou i softwarovou část vlastního řešení umožňující zlepšování řízení v čase.
3. Realizujte navržené řešení.
4. Ověřte funkčnost řešení dlouhodobým testem.
5. Vytvořte video prezentující vaši práci, její cíle a výsledky.

Literatura:

- Zhang, Zhiang, and Khee Poh Lam. "Practical implementation and evaluation of deep reinforcement learning control for a radiant heating system." *Proceedings of the 5th Conference on Systems for Built Environments*. 2018.
- Katić, Katarina, et al. "Neural network based predictive control of personalized heating systems." *Energy and Buildings* 174 (2018): 199-213.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Materna Zdeněk, Ing., Ph.D.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 29. července 2022

Datum schválení: 6. července 2022

Abstrakt

Práca sa zaoberá inteligentným riadením vykurovania s radiátormi. Cieľom práce je nájsť a implementovať algoritmus umelej inteligencie, ktorý umožní efektívnejšie riadenie teploty a úsporu energie. Práca implementuje algoritmus na predikciu vnútorných teplôt, založený na umelej inteligencii.

Abstract

The work deals with an intelligent control of radiator central heating. Its goal is to find and implement an AI algorithm that will enable more effective temperature control and energy savings. The work implements an algorithm based on the AI in order to predict indoor temperatures.

Klíčové slová

vykurovanie, smart home, ANN, python, keras simulink

Keywords

heating, smart home, ANN, python, keras, simulink

Citácia

PAROBK, Matej. *Chytrá domácnost: učící se řízení vytápění*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Materna, Ph.D.

Chytrá domácnost: učící se řízení vytápění

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Zdeňka Materny, Ph.D. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....
Matej Parobek
29. júla 2022

Podakovanie

Ďakujem Ing. Zdeňkovi Maternovi, Ph.D. za pomoc a podporu pri tvorbe bakalárskej práce.

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 3 |
| 2 | Použité technológie | 4 |
| 2.1 | Databázy časových radov | 4 |
| 2.1.1 | InfluxDB | 4 |
| 2.2 | Node-RED | 5 |
| 2.3 | MQTT | 5 |
| 2.3.1 | Architektúra | 5 |
| 2.3.2 | Prenos správ | 6 |
| 2.4 | ESP8266 | 6 |
| 2.4.1 | Wemos D1 Mini | 7 |
| 2.5 | Sensirion SHT3x | 7 |
| 2.6 | Auriol Z31915-TX | 7 |
| 3 | Neurónové siete | 9 |
| 3.1 | Topológia neurónových sietí | 10 |
| 3.1.1 | NARX | 12 |
| 3.1.2 | LSTM | 12 |
| 3.2 | Keras | 12 |
| 4 | Vykurovací systém | 13 |
| 4.1 | Centrálne zásobovanie teplom | 13 |
| 4.1.1 | Výroba tepla | 13 |
| 4.1.2 | Distribúcia tepla tepelnými rozvodmi | 14 |
| 4.1.3 | Odovzdávacie stanice tepla | 14 |
| 4.2 | Ekvitermná regulácia vykurovania | 15 |
| 4.3 | Vykurovanie radiátormi | 15 |
| 4.3.1 | Doskový radiátor | 15 |
| 4.3.2 | Článkový radiátor | 16 |
| 4.3.3 | Princíp vykurovania | 16 |
| 4.4 | Riadenie vykurovania | 17 |
| 4.4.1 | Termostatická hlavica | 17 |
| 4.4.2 | Termoelektrický pohon Honeywell MT4-024 | 18 |
| 4.5 | Prediktívne riadenie vykurovania | 19 |
| 4.5.1 | Model Predictive Control | 19 |
| 4.5.2 | Neurobat | 19 |
| 4.6 | Analýza dát | 20 |
| 4.6.1 | Korelácia | 24 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Implementácia | 27 |
| 5.1 | Senzor teploty a vlhkosti | 27 |
| 5.1.1 | SHT30 | 27 |
| 5.1.2 | Z31915-TX | 27 |
| 5.2 | Kontrolér vykurovania | 28 |
| 5.2.1 | Riadenie termoelektrického pohonu | 28 |
| 5.2.2 | ON/OFF regulácia | 28 |
| 5.3 | Zber dát | 29 |
| 5.3.1 | Funkcionalita | 29 |
| 5.4 | Dashboard | 30 |
| 5.5 | Predikcia | 31 |
| 5.5.1 | NARX | 31 |
| 5.5.2 | Dopredná neurónová sieť | 32 |
| 5.5.3 | LSTM | 34 |
| 6 | Simulácia | 37 |
| 6.1 | Simscape™ | 37 |
| 6.1.1 | Simscape Fluids | 37 |
| 6.2 | Tepelné straty miestnosti | 37 |
| 6.2.1 | Obvodové steny | 38 |
| 6.2.2 | Plastové okná | 38 |
| 6.2.3 | Tepelná akumulácia | 39 |
| 6.3 | Vykurovanie miestnosti | 39 |
| 6.3.1 | Model vykurovacieho telesa | 40 |
| 6.3.2 | Model termostatickej hlavice | 40 |
| 6.3.3 | Modelovanie dodávky tepla | 41 |
| 7 | Záver | 43 |
| | Literatúra | 44 |

Kapitola 1

Úvod

Vykurovanie je v našich klimatických podmienkach dôležitou súčasťou nášho života, hlavne počas zimných mesiacov. Aby sme udržali naše domovy teplé, musíme vynaložiť nemalé množstvo energie. Pri vykurovaní sa spotrebúva veľký objem neobnoviteľných zdrojov a vypúšťajú skleníkové plyny, čo má negatívny dopad na životné prostredie. Preto je na mieste sa zamyslieť nad tým ako efektívnejšie vykurovať a znížiť spotrebu tepla.

K dispozícii máme pritom množstvo inteligentných zariadení a senzorov na monitorovanie domácnosti. Stav techniky nám umožňuje vytvárať systémy, ktoré dokážu tieto dáta využiť na ceste za šetrnejším vykurovaním.

Na rozdiel od klasického termostatu, ktorý riadi vykurovanie len na základe aktuálnej teploty, inteligentné vykurovacie systémy využívajú aj poznatky o správaní vykurovacieho systému, vďaka čomu dokážu robiť optimálnejšie rozhodnutia pri dosahovaní žiadaných teplôt.

Práca je zameraná na systém inteligentného vykurovania pre domácnosť. Navrhovaný systém vykurovania má za úlohu čo najpresnejšie modelovať domácnosť a jej vykurovanie a na základe vybraných kritérií nájsť vhodný spôsob vykurovania. Správanie domácnosti sa systém pritom dokáže naučiť z vopred nazbieraných dát z vykurovacej sezóny.

Na úvod sú popísané použité technológie a senzory pre zber dát. Práca sa stručne zaoberá vykurovaním domácností a analýzov meraní. Z tohoto som vychádzal pri vytváraní simulácie a návrhu modelu pre vykurovanie.

Kapitola 2

Použité technológie

2.1 Databázy časových radov

V súčasnej dobe sa používa množstvo prístrojov a aplikácií, ktoré zbierajú periodické dáta a vytvárajú z nich časové rady. Údaje časových radov sa vyskytujú naprieč mnohými odvetvami a stali sa súčasťou každodenného života. Vyskytujú sa nielen v technických odboroch, ale aj v ekonomike, meteorológii, a medicíne.

Dáta časových radov sú merania alebo udalosti sledované, zaznamenávané a agregované v priebehu času. [7]

Databázy časových radov sú databázy navrhnuté a optimalizované na ukladanie a spracovanie dát časových radov a meranie zmien v čase. Databázy časových radov podporujú správu životného cyklu dát a sumarizáciu dát. [7]

2.1.1 InfluxDB

InfluxDB je open-source databázový systém na ukladanie časových radov od spoločnosti Influx. Je to najpoužívanejšia databáza časových radov. [1]

Databáza používa od verzie 2.x funkcionálny skriptovací jazyk Flux, navrhnutý pre dotazovanie a analyzovanie dát. [9]

InfluxDb na rozdiel od relačných databáz orgnizuje dáta do pevnej štruktúry. Nasledujúca tabuľka ilustruje štruktúru databázy.[9]

| _time | _measurement | room | device | _field | _value |
|----------------------|--------------|-----------|-------------------|-------------|--------|
| 2022-01-25T12:01:01Z | ambient | bedroom_1 | esp_32 | temperature | 22 |
| 2022-01-25T12:01:01Z | ambient | bedroom_1 | esp_32 | humidity | 55 |
| 2022-01-25T12:05:00Z | heating | bedroom_1 | heating_controler | heating | True |
| 2022-01-25T12:05:00Z | heating | bedroom_1 | heating_controler | thermostat | 22 |

Tabuľka 2.1: Príklad dátovej schémy v InfluxDB.

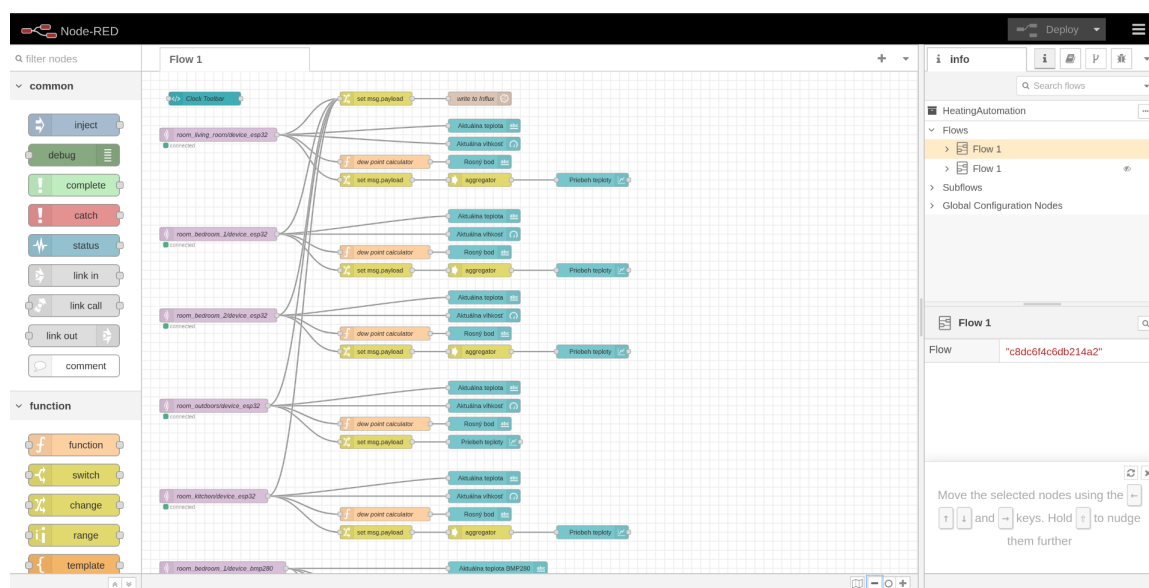
Všetky záznamy ukladané v InfluxDB musia mať časovú známku. Záznam obsahuje na najvyššej úrovni názov merania, stĺpec `_measurement`, ktorý tvorí kontajner pre položky tag, field a časovú známku. Množinu kľúčovaných hodnôt nazývaných tagy používame na zaznamenávanie metadát. Ako príklad sú uvedené tagy `room` a `device`, ktoré som používal pri zaznamenávaní údajov pre vykurovanie. Namerané dáta sa ukladajú do stĺpca `_value`

spolu s kľúčom, ktorý sa ukladá do stĺpca `_field`. Databáza umožňuje dotazovanie podľa meraní, tagov, fields spolu s časovými dotazmi. [9]

2.2 Node-RED

Node-RED je nástroj na flow-based programovanie napísaný v node.js. Pri flow-based programovaní sa popisuje správanie aplikácie sieťou prepojených uzlov. Každý uzol má definovanú funkcionálnosť. Uzol spracováva vstupné dáta a transformuje ich na výstupné. Prenos dát medzi uzlami zabezpečuje sieť.

V Node-RED je k dispozícii veľké množstvo uzlov na spracovanie dát, prezentáciu dát a príjem a odosielanie dát z protokolov a služieb ako napr. MQTT a InfluxDB. Aplikácie je možné vytvárať v grafickom editore cez webové rozhranie. [17]



Obr. 2.1: Webový grafický editor Node-RED

2.3 MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) je otvorený komunikačný protokol s vlastnosťami vhodnými pre riešenia v IoT. Protokol je definovaný štandardom OASIS. Medzi jeho výhody patrí jeho nenáročnosť a efektívnosť pri prenose správ. MQTT je ideálny transportný protokol pre zariadenia s malým zdrojovým kódom a vyžaduje minimálne sieťové pásmo. [16]

2.3.1 Architektúra

Protokol je založený na návrhovom vzore Publish/Subscribe na výmenu správ medzi klientami pomocou centrálného bodu. Návrhový vzor odstraňuje priame spojenie medzi odosielateľmi a príjmateľmi a klienti komunikujú s centrálnym bodom, ktorý sa nazýva **MQTT broker**. MQTT broker zodpovedá za prenos správ, filtruje správy a odosiela ich klientom prihláseným

k odberu. [22] Najznámejším a najpoužívanejším MQTT brokerom je Eclipse Mosquitto, ktorý je voľne dostupný a open-source.

Klientom môžu byť rôzne druhy zariadení, keďže protokol je veľmi jednoduchý a je dostupných veľké množstvo knižníc. Klientov rozdeľujeme na MQTT publishers, ktorí odosiľajú správy a MQTT subscribers, ktorí prijímajú správy. Klient môže byť zároveň prijímateľom aj odosielateľom. [22]

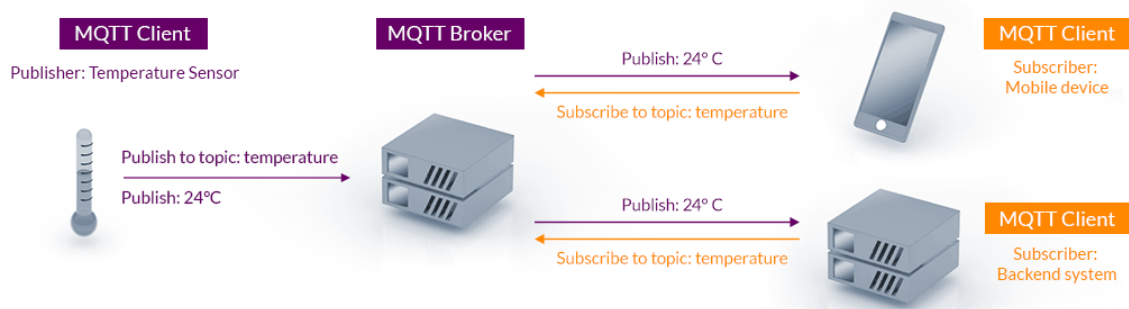
MQTT vyžaduje prenos cez spoľahlivý bezstratový transportný protokol medzi klientom a serverom. Najčastejšie sa používa prenos cez Internet, pomocou WiFi alebo Ethernetu. Spoľahlivý bezstratový prenos zabezpečuje protokol TCP. MQTT štandardne používa port 1883 pre nešifrovaný prenos dát. [22]

2.3.2 Prenos správ

Správy v protokole MQTT sú zaradné v takzvaných topic alebo témach, ktoré sú hierarchické a oddelené lomítkom. Každá správa musí mať topic. Obsah správy nie je presne definovaný. [22]

Pri odosiľaní MQTT publisher zvolí topic, ktorý pošle spolu so správou MQTT brokeru. Napríklad v prípade teplomeru zvolíme tému obývačka/teplota a telo správy napr. 22 °C.

MQTT subscriber sa prihlasuje k odberu správ o ktoré má záujem tým, že MQTT brokeru odošle špeciálnu správu "subscribe"s názvom topicu, ktorý bude odoberať. [22]



Obr. 2.2: Mqtt architektúra. Zdroj obrázka [16]

2.4 ESP8266

ESP8266 je dostupný čínsky mikročip s Wi-Fi a vstavanou softwarovou podporou TCP/IP od výrobcu Espressif Systems. Mikročip má operačné napätie 3,3 V. Použitý je 32-bitový RISC mikroprocesor L106 s frekvenciou 80 MHz a 80 KiB RAM pre užívateľské dáta. Mikročip podporuje flash pamäť veľkosti 512 KiB – 4 MiB. Najväčšou výhodou je vstavané Wi-Fi 802.11 b/g/n.

Rozhranie mikročipu tvorí 17 GPIO pinov a 10-bitový analógovo-digitálny prevodník. Mikročip ďalej podporuje zbernice SPI, I2C, UART.

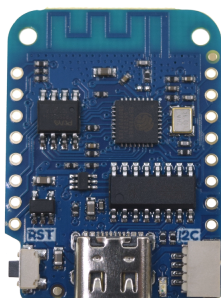
Na programovanie môžeme použiť známe Arduino štúdio, kde je možné pridať podporu pre esp8266 ako modul.

Na trhu existuje veľké množstvo vývojových dosiek na báze ESP8266 s rôznou veľkosťou, rôznym počtom pinov a funkcionalitou.

2.4.1 Wemos D1 Mini

Jedná sa o malú wifi dosku založenú na mikročipe ESP-8266EX. Procesor je taktovaný na 80 MHz a na doske je vstavaných 4MB flash pamäte. Na doske je vyvedených 11 digitálnych vstupno-výstupných pinov a 1 analógový vstup. Na doske sa nachádza micro usb port. Doska podporuje prerušenia, PWM a zbernice I2C a one-wire.

Na doske je integrovaný prevodník USB-UART, ktorý umožňuje komunikáciu USB zariadení s UART rozhraním mikrokontroléru. Doska obsahuje aj regulátor napätia, ktoré dodávame cez USB port alebo pinom Vcc.



Obr. 2.3: Wemos D1 Mini

2.5 Sensirion SHT3x

Sensirion SHT3x je kalibrovaný digitálny senzor teploty a vlhkosti. Senzor komunikuje cez rozhranie I2C. Výrobca udáva rozsah merania teploty od 0°C do 65°C a vlhkosti od 0 do 100 %RH. Presnosť merania teploty je $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ a vlhkosti max. $\pm 8\% \text{RH}$.



Obr. 2.4: Sensirion SHT30

2.6 Auriol Z31915-TX

Z31915-TX je bezdrôtové vonkajšie čidlo meteostanice Auriol. Čidlo vysiela údaje na frekvencii 433MHz. Výrobca udáva teplotný rozsah od -20°C do 65°C a rozsah vlhkosti od 20 %RH do 95 %RH. Presnosť senzoru nie je výrobcom špecifikovaná.

Pre potreby zberu dát je potrebné zostrojiť prijímač a dekodovať signál zo senzora.

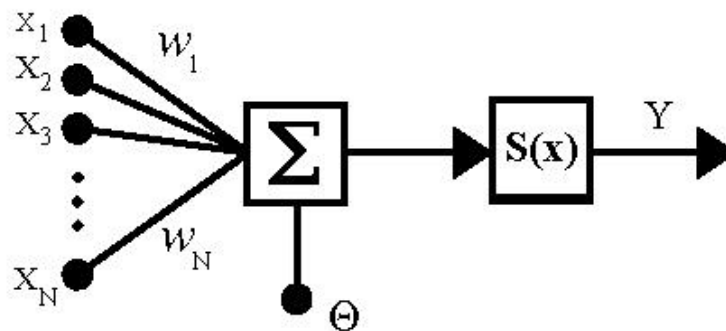


Obr. 2.5: Auriol Z31915-TX

Kapitola 3

Neurónové siete

Základným stavebným prvkom neurónových sietí je umelý neurón. Umelý neurón bol prvýkrát popísaný Warrenom McCullochom a Walterom Pittsom. Model umelého neurónu sa skladá z nasledujúcich častí:



Obr. 3.1: Model neurónu. Prevzaté zo [24]

- vstup neurónu (dendrit) x_i
- synaptické váhy w_i
- prah neurónu θ_i
- aktivačná funkcia neurónu $S(x)$
- výstupná funkcia neurónu Y

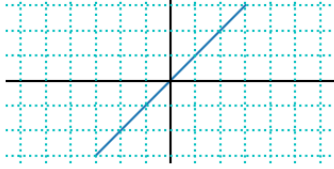
Neurón môžeme popísať vzťahom $y_i = S(\sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i) - \theta)$

- váha w_i vyjadruje skúsenosť neurónu
- vzťah $\sum(w_i \cdot x_i)$ určuje, či je neurón pasívny (inhibitovaný), alebo aktívny (excitovaný)

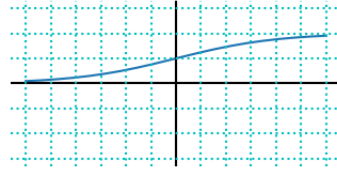
Neurón je pasívny (inhibitovaný), ak je menší ako prah θ_i alebo aktívny (excitovaný), ak je väčší ako prah θ_i . [19]

Existuje viacero typov aktivačných funkcií $S(x)$. Volíme ich podľa typu siete. Medzi najznámejšie patria:

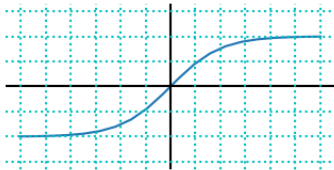
- **lineárna**



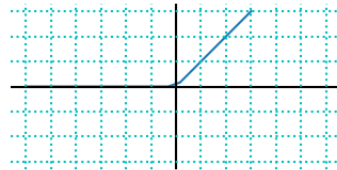
- **sigmoida** $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$



- **tanh** $\tanh(x)$



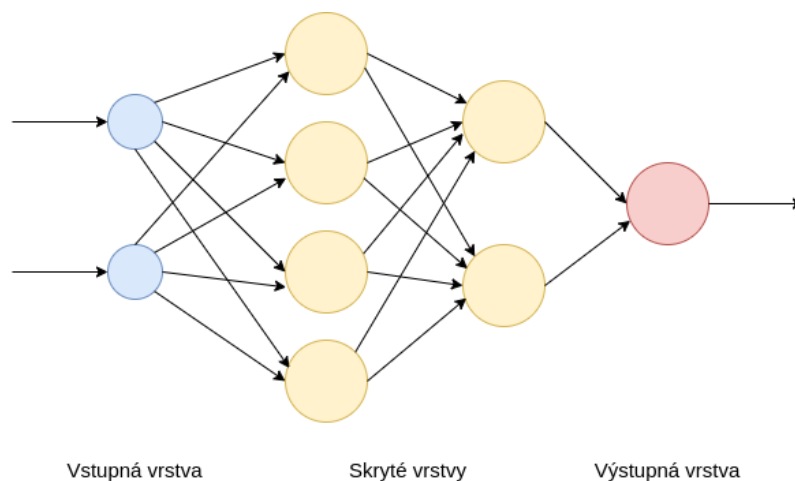
- **ReLU** $\max(0, x)$



3.1 Topológia neurónových sietí

Neuróny sa spájajú do zložitejších štruktúr a na základe umiestnenia v príslušnej vrstve ich delíme na:

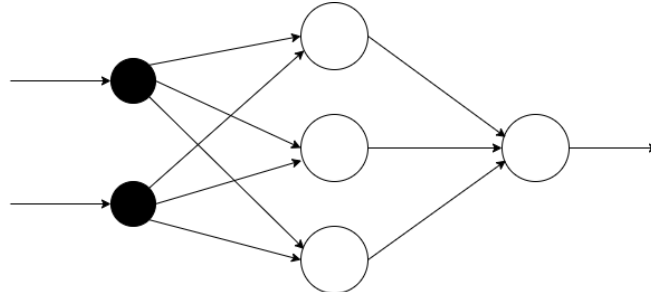
- vstupnú vrstvu, do ktorej vstupujú informácie z vonkajšieho prostredia
- skrytú vrstvu, v ktorej sú neuróny spojené s ostatnými neurónmi alebo aj zvonka cez prahové prepojenia a ich výstupy postupujú ďalej do siete
- výstupnú vrstvu, ktorá je podobná skrytej, ale informácie vystupujú do vonkajšieho sveta



Obr. 3.2: Vrstvy NN

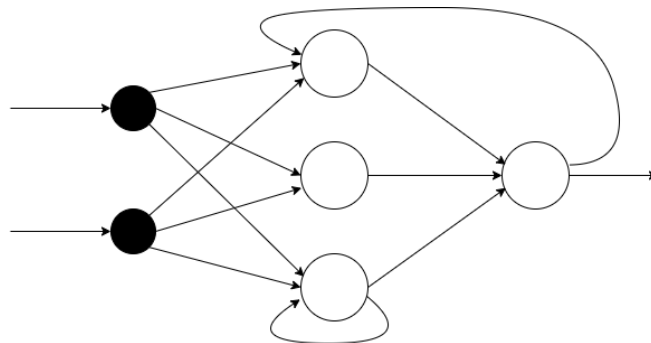
Podľa smeru šírenia signálu delíme neurónové siete na:

- Dopredné (feedforward FF) – signál sa šíri len po synaptických spojeniach jedným smerom



Obr. 3.3: Feedforward neural network

- Rekurentné (recurrent RC) – signál sa šíri veľmi rozmanite, rôznymi smermi. Je ťažko určiť rozdelenie vrstiev a neurónov na vstupné, skryté a výstupne.



Obr. 3.4: Recurrent neural network

Šírenie signálu môže byť rozmanité, napr.:

- Synchronne šírenie signálu - neuróny menia stav do taktu
- Sekvenčné – neuróny menia stav postupne
- Blok sekvenčné – podľa určenej stratégie sa aktivujú skupiny neurónov
- Asynchronne – neuróny menia svoj stav úplne nezávisle. [19]

Podľa spôsobu učenia rozlišujeme neurónové siete:

- S učiteľom (Supervised machine learning) – pri učení siete používame tréningový dataset, (dostatočné množstvo vzorov na učenie), na základe ktorého prebieha učenie
- Učenie bez učiteľa (Unsupervised machine learning) – používa sa pri neklasifikovaných údajoch, nemáme vzory pre učenie. Sieť sa snaží zaradiť údaje do príslušných kategórií

- Učenie formou odmeňovania (Reinforcement learning) – priebeh učenia je interpretovaliteľný na základe skúmania akcie a reakcie. Sieť je odmeňovaná za správne rozhodnutie a optimalizuje svoje výstupy, aby maximalizovala odmenu

3.1.1 NARX

Nonlinear Autoregressive Exogenous model je nelineárny autoregresný model s vonkajšími vstupmi. NARX model sa používa k modelovaniu časových rád. Je to dynamická rekurentná sieť so spätnú väzbou. NARX model je definovaný nasledovnou rovnicou podľa [12]:

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n_u))$$

Hodnota výstupného signálu je závislá na predchádzajúcich hodnotách výstupného signálu y a na predchádzajúcich hodnotách vonkajších vstupov u .

3.1.2 LSTM

Long Short-Term Memory je rekurentná neurónová sieť používaná v oblasti umelej inteligencie. Táto vrstva je variantou vrstvy SimpleRNN (Recurrent Neural Network). Pridáva spôsob prenosu informácie v mnohých časových úsekoch. LSTM ukladá informácie na neskoršiu dobu, čím bráni tomu, aby sa staršie signály strácali behom spracovania. [6]

3.2 Keras

Keras je open source framework na vytváranie hlbokých neurónových sietí. Je napísaný v Pythone a založený na Tensorflow.

Pomocou Kerasu je možné rýchlo a efektívne vyvíjať rôzne modely založené na neurónových sieťach. Je možné vytvárať ľubovoľné sieťové architektúry. Keras obsahuje aj podporu pre konvolučné a rekurentné siete. Bloky siete sú optimalizované a rýchle. Modely sa dajú vo frameworku následne jednoducho natrénovať. [6]

Kapitola 4

Vykurovací systém

4.1 Centrálné zásobovanie teplom

V bytových domoch sa často stretávame s centrálnym zásobovaním teplom. Predstavuje ekologický a spoľahlivý spôsob vykurovania. Teplo sa vyrába v centrálnych zdrojoch, teplárňach a pomocou vonkajších rozvodov sa distribuuje do jednotlivých objektov, spravidla v rámci celých mestských štvrtí.

Pre užívateľa predstavuje centrálné zásobovanie teplom bezstarostný spôsob dodávky energie. Centrálny zdroj tepla v rámci siete je v porovnaní s malým vykurovacím systémom používaným v jednotlivých domácnostiach omnoho praktickejší a efektívnejší. Účinné spaľovanie a pokročilé čistenie spodín znižuje negatívny dopad na životné prostredie.

Centrálné zásobovanie teplom môžeme rozdeliť podľa teplotnej látky na [8]:

- teplovodné diaľkové vykurovanie ($< 120\text{ °C}$)
- horúcovodné diaľkové vykurovanie ($> 120\text{ °C}$)
- parné diaľkové vykurovanie ($> 120\text{ °C}$)
- nízkotepelné diaľkové vykurovanie ($25\text{ °C} - 35\text{ °C}$)

Systém centrálného zásobovania teplom sa skladá z 3 hlavných častí [8]:

- výroba tepla
- distribúcia tepla teplotnými rozvodmi
- odovzdávacia stanica tepla

4.1.1 Výroba tepla

Výrobu tepla pre systém centrálného zásobovania teplom zabezpečujú teplárne, elektrárne a obecné či blokové kotolne, prípadne spaľovne odpadu. Škála použiteľných tepelných zdrojov, vrátane geotermálnej a solárnej energie, je veľmi široká. Najčastejšie sa však teplo vyrába spaľovaním tuhých, kvapalných alebo plyných palív. Medzi najčastejšie palivá na výrobu tepla patria zemný plyn alebo uhlie a ďalej biomasa. [3]

V teplárňach sa teplo odoberá po výrobe elektrickej energie. V elektrárňach vzniká teplo ako vedľajší produkt pri výrobe elektrickej energie.

4.1.2 Distribúcia tepla tepelnými rozvodmi

Rozvody teplonosného média sú realizované z tepelne izolovaných potrubí. Poznáme dva typy distribúcie tepelnými rozvodmi:

Štvorrúrový rozvod, pri ktorom sú použité 2 rúry, prívod a späťčeka rovnakého priemeru na prívod tepla pre ústredné kúrenie a 2 rúry na cirkuláciu teplej vody.

Dvojrúrový rozvod, ktorý distribuje teplonosné médium do domových odovzdávacích staníc. [10]

4.1.3 Odovzdávacie stanice tepla

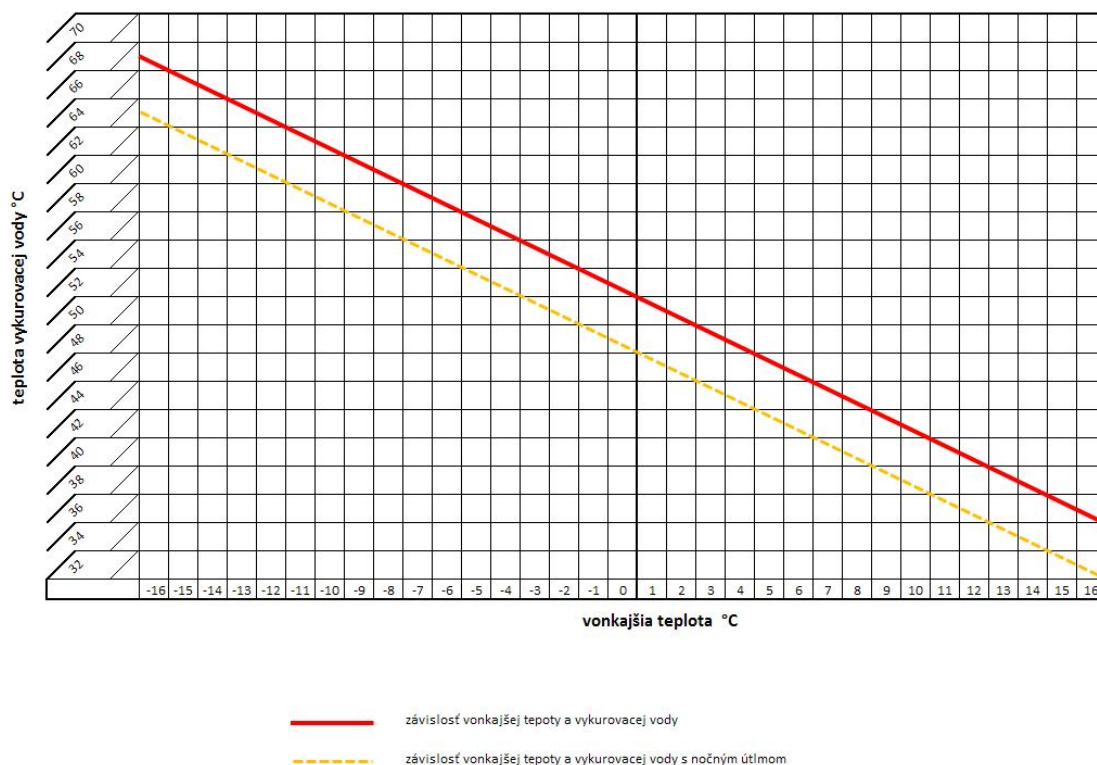
Odovzdávacie stanice tepla sú určené pre centrálny ohrev vykurovacej vody pre ústredné kúrenie a ohrev teplej úžitkovej vody dopravovanej ďalej do bytových domov a objektov štvorrúrkovým rozvodom.

Moderným trendom sú domové odovzdávacie stanice tepla umiestňované na mieste spotreby tepla, napr. v bytovom dome alebo inom objekte. Teplonosná látka je dopravovaná do objektu z kotolne alebo teplárne dvojrúrkovým rozvodom. strana [18]

4.2 Ekvitermná regulácia vykurovania

Úlohou ekvitermnej regulácie je nastavenie vykurovacieho výkonu podľa vonkajšej teploty. Vykurovacia krivka udáva závislosť teploty vykurovacej vody od vonkajšej teploty. Môžeme definovať niekoľko vykurovacích kriviek podľa vnútornej teploty.

Dodávateľ tepla Veolia používa v našom prípade lineárnu reguláciu teploty vykurovacej vody.



Obr. 4.1: Vykurovacia krivka Veolie Brezno

4.3 Vykurovanie radiátormi

Radiátory sú jedným z najpoužívanějších vykurovacích telies v našich domácnostiach. Môžeme sa s nimi stretnúť hlavne v starších domoch a bytoch, ale aj pri nových inštaláciách. Vhodným spôsobom vykurovania sú hlavne v budovách s vysokými tepelnými stratami a nárokmi na rýchly nábeh kúrenia. Výhodou sú aj nižšie obstarávacie náklady v porovnaní s podlahovým vykurovaním. [20]

Na trhu existuje viacero druhov radiátorov, ktoré sa odlišujú dizajnom a účinnosťou. V domácnostiach sa najčastejšie stretneme s modernejšími doskovými radiátormi alebo staršími článkovými radiátormi.

4.3.1 Doskový radiátor

V súčasnosti sú preferované doskové radiátory, pre ich menšie rozmery a minimalistický dizajn. Doskové radiátory sa skladajú z jednej alebo viacerých profilovaných dosiek, cez ktoré

prúdi vykurovacia voda, a konvekčných plechov, ktoré zlepšujú prenos tepla do vzduchu. V prípade dostatočného nadimenzovania si vystačia s nižšími prírodnými teplotami. [23]



Obr. 4.2: Doskový radiátor

4.3.2 Článkový radiátor

Článkové radiátory sú najstaršie typy radiátorov a v dnešnej dobe ich nájdeme v starších domoch a bytoch. Skladajú sa z rôzneho počtu spojených článkov cez ktoré prúdi vykurovacia voda. Články sú väčšinou vyrobené z ocele alebo z liatiny pri starších modeloch. Liatinové články potrebujú vyššiu prírodnú teplotu a väčší čas na rozohriatie v porovnaní s oceľovými článkami alebo doskovými radiátormi. [23]



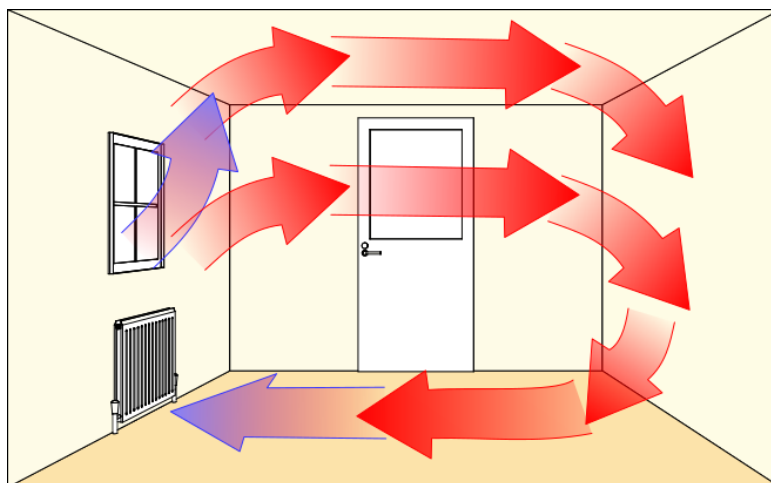
Obr. 4.3: Článkový radiátor

4.3.3 Princíp vykurovania

Radiátor odovzdáva vyrobené teplo z vykurovacej vody do okolitého vzduchu, keďže má vyššiu teplotu ako okolitý vzduch. Voda sa pri prechode radiátorom ochladí. Vzniknutý rozdiel teplôt vykurovacej vody medzi prívodom a odvodom nazývame tepelný spád a je dôležitým parametrom pri návrhu vykurovacej sústavy.

Množstvo tepla, ktoré je radiátor schopný odovzdať do miestnosti závisí najmä od teploty vykurovacej vody a veľkosti a typu radiátora. Radiátory odovzdávajú väčšinu tepelného

výkonu do okolia pomocou konvekcie. [20] To znamená, že, radiátor ohrieva okolitý vzduch, ktorý potom prirodzene prúdi v miestnosti, ako je zobrazené na obrázku nižšie.



Obr. 4.4: Priebeh konvekcie. Prevzaté z [25]

Zvyšok tepla je odovzdaný sálaním. Sálanie je mechanizmus šírenia tepla, pri ktorom radiátor vyžaruje tepelné žiarenie, ktoré je absorbované okolitými objektami.

4.4 Riadenie vykurovania

V 78% bytových domov s centrálnym vykurovaním je použitá dvojrúrková sústava so spodným rozvodom a núteným obehom vykurovacej vody s vetvovým systémom ležateho rozvodu. V tomto prípade sú k dispozícii dve možnosti regulácie parametrov vykurovacej sústavy. Prispôbenie parametrov klimatickým podmienkam na päte vykurovacej sústavy alebo v mieste napojenia na zdroj tepla. Túto reguláciu vykonáva dodávateľ tepla v rámci hospodárnej prevádzky sústavy prikázanej legislatívou. Parametre vykurovacej sústavy môžeme prispôbiť požiadavke na teplotu miestnosti ventilom na vykurovacom telese. Väčšinou sa jedná o termostatickú hlavicu. [11]

4.4.1 Termostatická hlavica

Termostatická hlavica dokáže automaticky regulovať teplotu v miestnosti. V bytových domoch býva už štandardom. V prípade správneho nastavenia zabraňuje prekurovaniu miestností s tepelnými ziskami ako napr. slnečné žiarenie. Termostatická hlavica reguluje výkon radiátora tým, že ovláda termostatický ventil, na ktorom je namontovaná. Vo vnútri termostatickej hlavice sa nachádza valček, ktorý sa pôsobením tepla rozpína a tlačí na piestik, ktorý pri vysúvaní zatvára termostatický ventil. Na termostatickej hlavici nastavujeme otáčaním regulačné stupne a nie priamo teplotu. Stredný regulačný stupeň 3 väčšiu znamená teplotu okolo 20°C v závislosti od výrobcu hlavice. [21]

Termostatický ventil potom podľa polohy obmedzuje hmotnostný prietok vykurovacej vody vykurovacím telesom a tým jeho výkon. [11]



Obr. 4.5: Termostatická hlavica

4.4.2 Termoelektrický pohon Honeywell MT4-024

Termoelektrický pohon od firmy Honeywell sa používa na ovládanie vykurovacích a chladiacich systémov, napr. radiátorov, podlahového vykurovania alebo fancoil jednotiek. Regulátor sa inštaluje na termostatické radiátorové ventily alebo na chladiace/vykurovacie ventily so závitom M30 x 1.5. Termoelektrický pohon sa ovláda elektricky striedavým alebo jednosmerným prúdom s napätím 24V.

Termoelektrickým pohonom sa dá realizovať dvojpolohová on/off reguláciu alebo PWM lineárna regulácia polohy ventilu. Po pripojení riadiaceho napätia PTC rezistor ohreje voskový prvok, ktorého expanzia spôsobí pohyb ventilu, resp. otváranie ventilu pri verzii normally closed alebo zatváranie pri verzii normally open. [4]



Obr. 4.6: Honeywell MT4-024, obrázok prebratý z dokumentácie [4]

4.5 Prediktívne riadenie vykurovania

4.5.1 Model Predictive Control

Model predictive control (MPC) je nelineárny riadiaci systém so spätnou väzbou. Pri riadení MPC, je v každom časovom kroku riešený optimalizačný problém, aby sa určil plán riadiacich akcií v určenom časovom horizonte. Prvá riadiaca akcia sa aplikuje na riadený systém. V ďalšom kroku sa riešenie optimalizačného problému opakuje. Pri optimalizácii sa počíta s odhadom priebehu veličín vychádzajúceho z aktuálne dostupných informácií.

Model predictive umožňuje definovať odmedzenia pre vstupy a výstupy a rôzne kontrolné stratégie. Vďaka tomu dokáže riadiť aj zložité systémy na hrane ich technických možností. V MPC sú definované ako súčasť optimalizačného problému.

Optimalizačný problém musí byť riešený v každom časovom kroku, čo vyžaduje pokročilé optimalizačné techniky a výkonný hardware. [13]

Podľa Mattingley et. al.[13] môžeme systém definovať ako:

$$x_{t+1} = A_t x_t + B_t u_t + c_t$$

kde $x_t \in \mathbb{R}^n$ je stav systému $u_t \in \mathbb{R}^m$ sú kontrolné vstupy a $c_t \in \mathbb{R}^n$ sú vonkajšie vstupy. Metriky $A_t \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a $B_t \in \mathbb{R}^{n \times m}$ sú matice pre dynamiku a vstupy systému.

Stav a vstup musí spĺňať obmedzenia:

$$(x_t, u_t) \in C_t$$

kde $C_t \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ sú obmedzenia v čase t .

Kvalitu riadiacej stratégie hodnotíme podľa priemernej ceny:

$$J = \limsup_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} \ell(x_t, u_t)$$

kde $\ell(x_t, u_t)$ je okamžitá cena ktorá závisí na súčasnom stave a riadiacej akcii.

Pri implementácii MPC nemusíme využiť len model založený na presnom matematickom popise systému. Môžeme využiť aj dátovo orientovaný model na základe nameraných dát o systéme. V prípade vykurovania sa tým zaoberá napríklad práca Neurobat [15] a [5].

4.5.2 Neurobat

Je systém vykurovania s predikciou vyvinutý v Švajčiarskom federálnom technologickom inštitúte v Lausanne. Práca sa zaoberá implementáciou MPC s dátovo orientovaným modelom. Model využíva naučenú neurónovú sieť z nazbieraných dát.

V práci Neurobat je popísaný výpočet ceny pre MPC, ktorý berie do úvahy spotrebované teplo a aj komfort užívateľov zahrnutím indexu PMV (Predicted Mean Vote).

Vyvinutý MPC optimálne riadi výkon potrebný na vykurovanie. Druhý kontrolný algoritmus riadi pomocou zmiešavacích ventilov teplotu vykurovacej vody na základe vypočítaného optimálneho výkonu.

Vyvinutý MPC bol overovaný pomocou simulácie a aj v reálnom vykurovacom systéme. [15]

4.6 Analýza dát

Dáta boli analyzované na základe grafu priebehu teploty. Krabicový graf a histogram bol použitý na analýzu rozdelenia dát. Pomocou grafov sa snažíme odhaliť závislosti, trendy a vzory v dátach. Grafy sú rozdelené po miestnostiach.

Škatulový graf umožňuje analyzovať priemer a rozptyl teplôt v miestnostiach. Z grafov vyplýva, že teploty v miestnostiach sú stabilné a nepodliehajú veľkému rozptylu. Priemerné teploty v miestnostiach sa pohybujú od 23°C do 25°C. Histogram potvrdzuje sústredenie teplôt okolo priemeru.

V grafe priebehu teplôt pozorujeme pravidelné poklesy počas vetrania, ktoré však dlhodobou neznižujú teplotu v miestnosti kvôli tepelnej akumulácii stien.

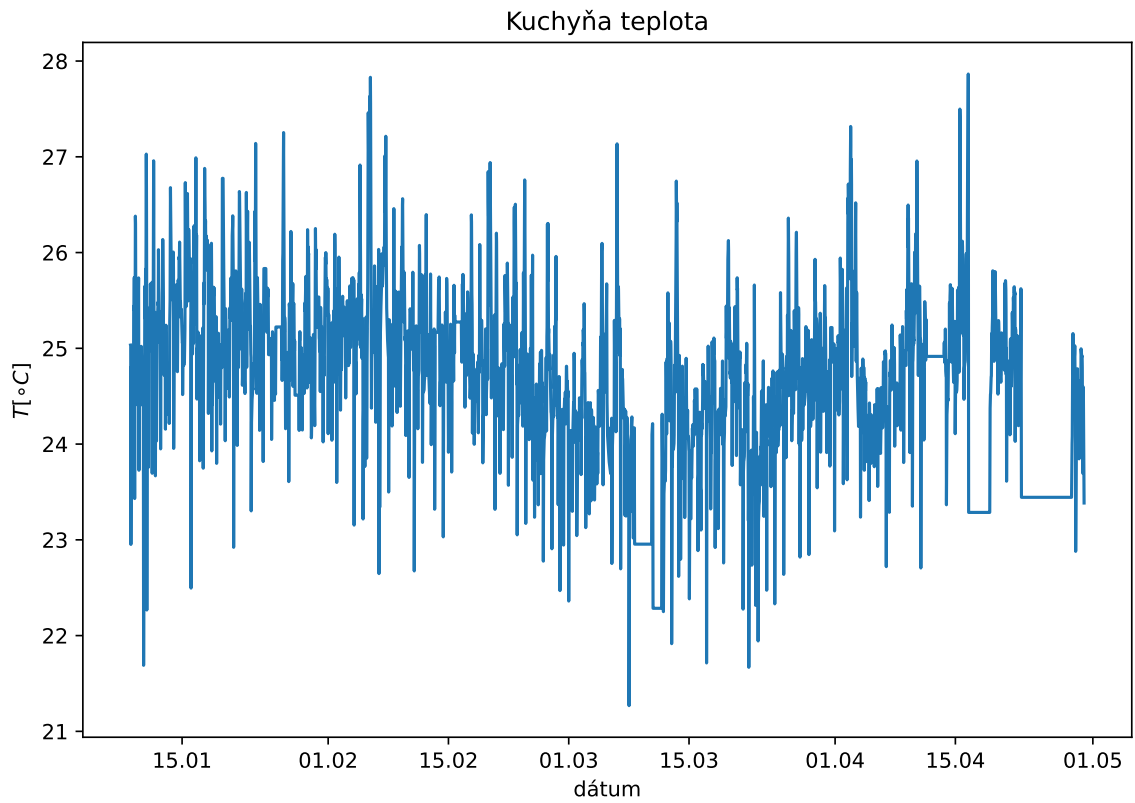
V kuchyni a obývačke pozorujeme aj pomerne veľké výkyvy smerom nahor a zvýšenú priemernú teplotu. V týchto izbách sú tepelné zisky z varenia a čiastočne zo sprchovania. Kúpeľňa sa nachádza vedľa kuchyne a je spojená oknom s kuchyňou. Obývačka je vedľa kuchyne a dvere sú vždy otvorené. Kuchyňa a obývačka sú pomerne malé a teplo z varenia a sprchovania značne zvyšuje teplotu v týchto miestnostiach.

V spálni 1 boli namerané opačné výkyvy nadol. Boli spôsobené orientáciou miestnosti na sever, balkónom s veľkými tepelnými stratami a slabým vykurovaním. Senzor teploty na opačnej strane miestnosti vzdialený 1.8m od radiátora ani nezaznamenal, zásadnejšie zmeny teploty pri zapnutom vykurovaní.

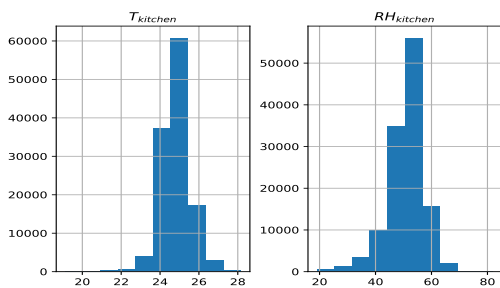
Teplotný senzor bol zrejme ďaleko od vykurovacieho telesa. Podobne sa chovala teplota aj v obývačke. V ostatných miestnostiach nebol inštalovaný elektrický ventil a nebolo sledované ovládanie radiátorov.

V spálni 2 bol teplomer umiestnený blízko radiátora, radiátor však riadila termostatická hlavica. Žiadne nárasty teploty pri zapnutí kúrenia neboli zaznamenané. Z dát vyplýva, že najväčší vplyv na teplotu v miestnosti mal plynový šporák v kuchyni, ktorý dokázal zdvihnúť teplotu v kuchyni o 2°C až 3°C v priebehu hodiny.

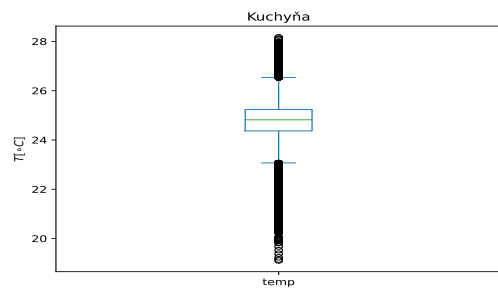
Z nameraných dát som nevyužil vlhkosť v tejto analýze.



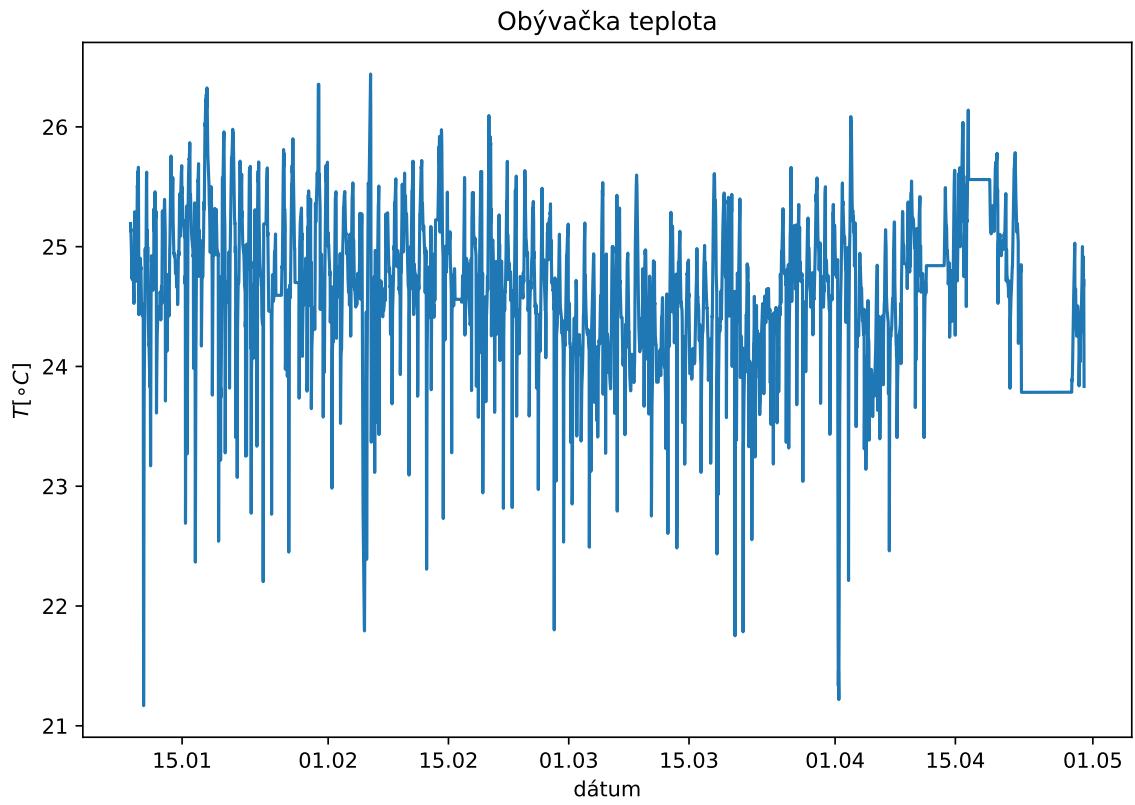
Obr. 4.7: Priebeh teploty v kuchyni



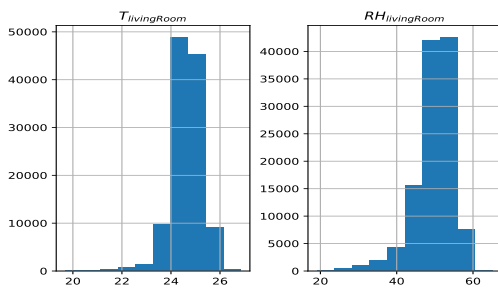
Obr. 4.8: Histogram teplôt v kuchyni



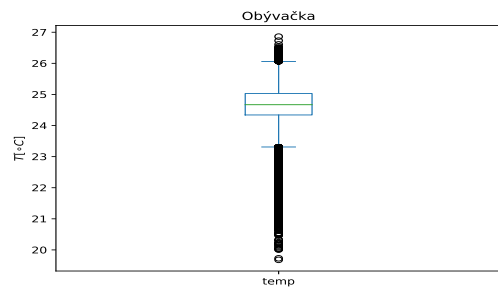
Obr. 4.9: Box graf teplôt v kuchyni



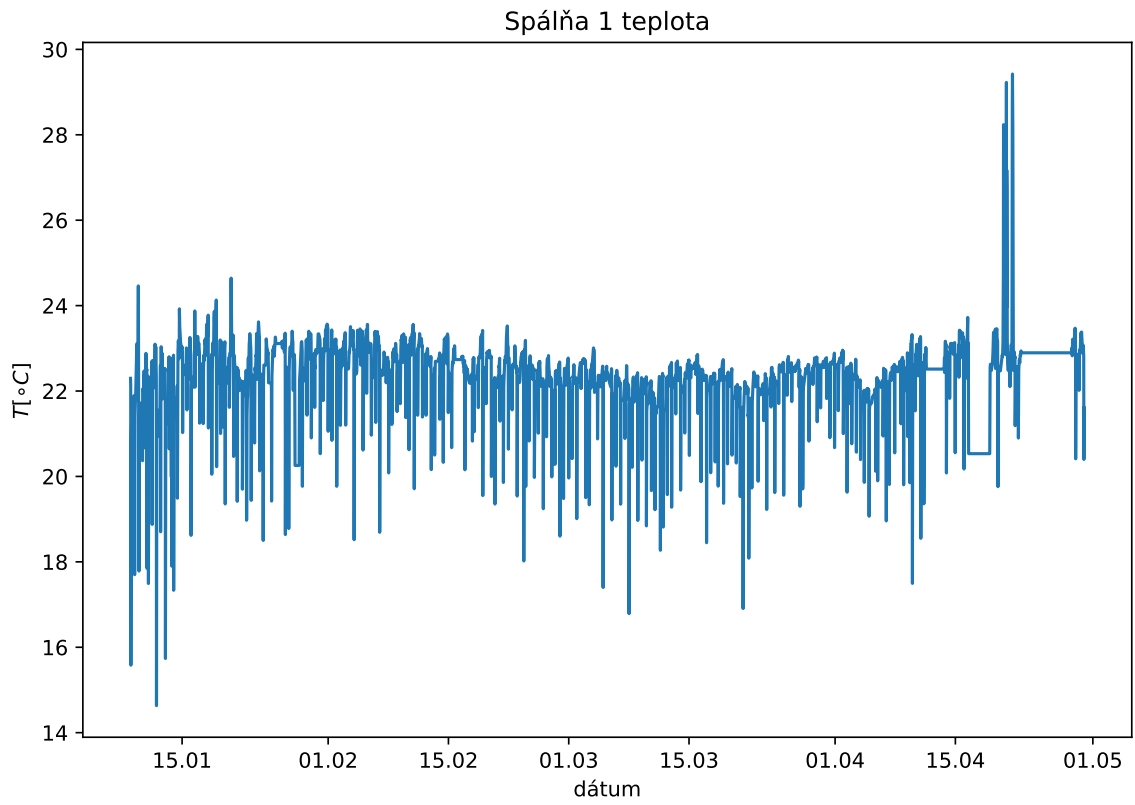
Obr. 4.10: Graf teplôt v obývačke



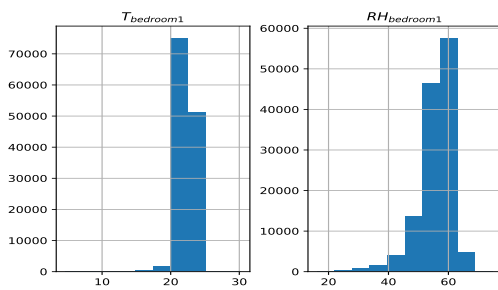
Obr. 4.11: Histogram teplôt v obývačke



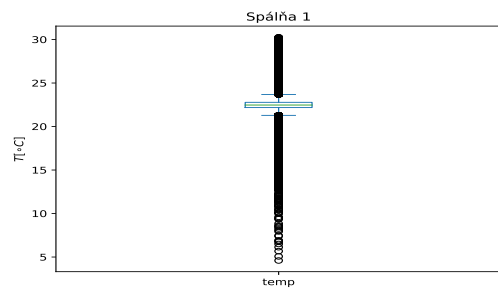
Obr. 4.12: Box graf teplôt v obývačke



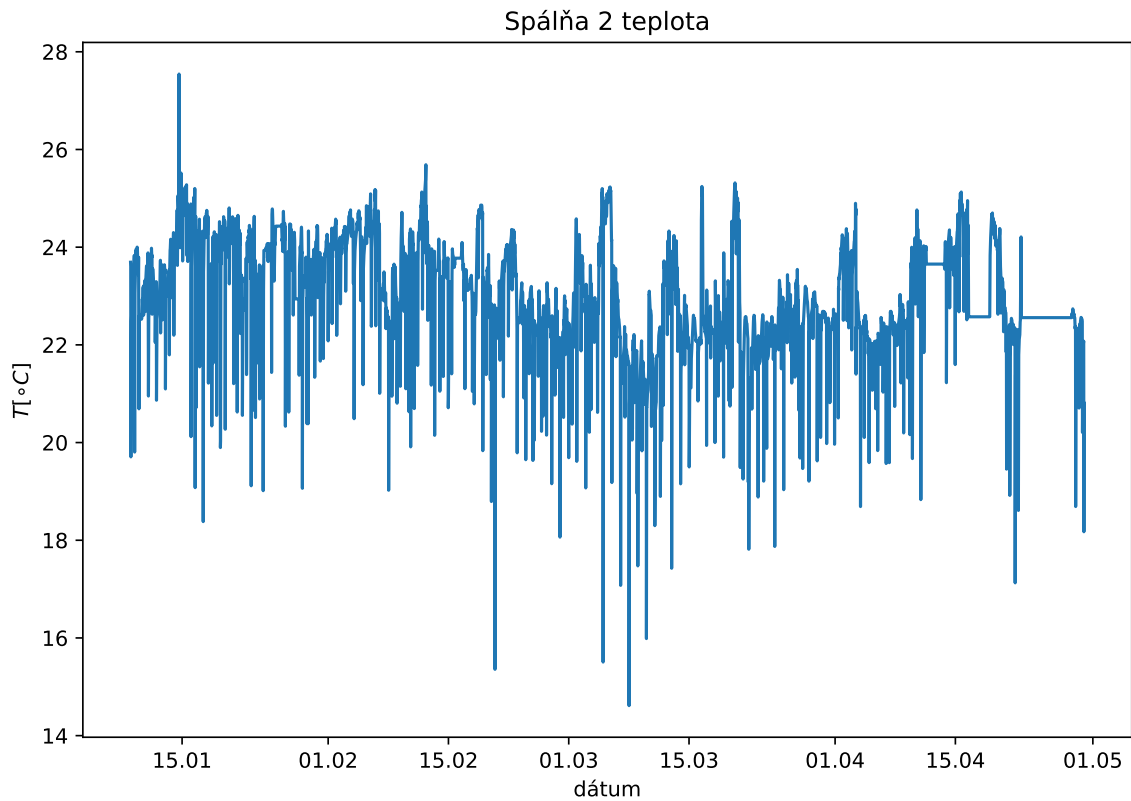
Obr. 4.13: Graf teplôt v 1 spálni



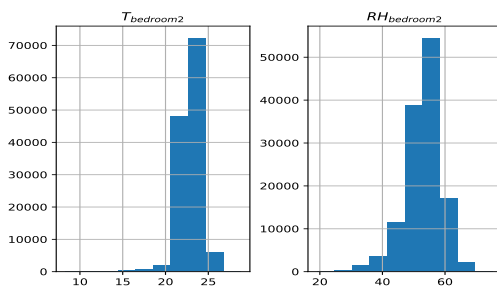
Obr. 4.14: Histogram



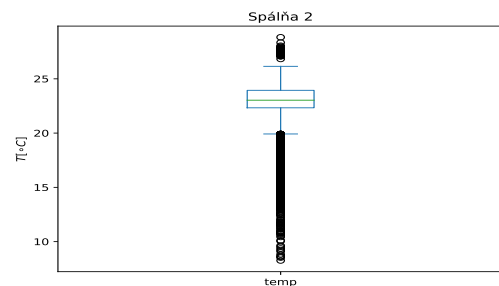
Obr. 4.15: Box graf



Obr. 4.16: Graf teplôt v 1 spálni



Obr. 4.17: Histogram



Obr. 4.18: Box graf

4.6.1 Korelácia

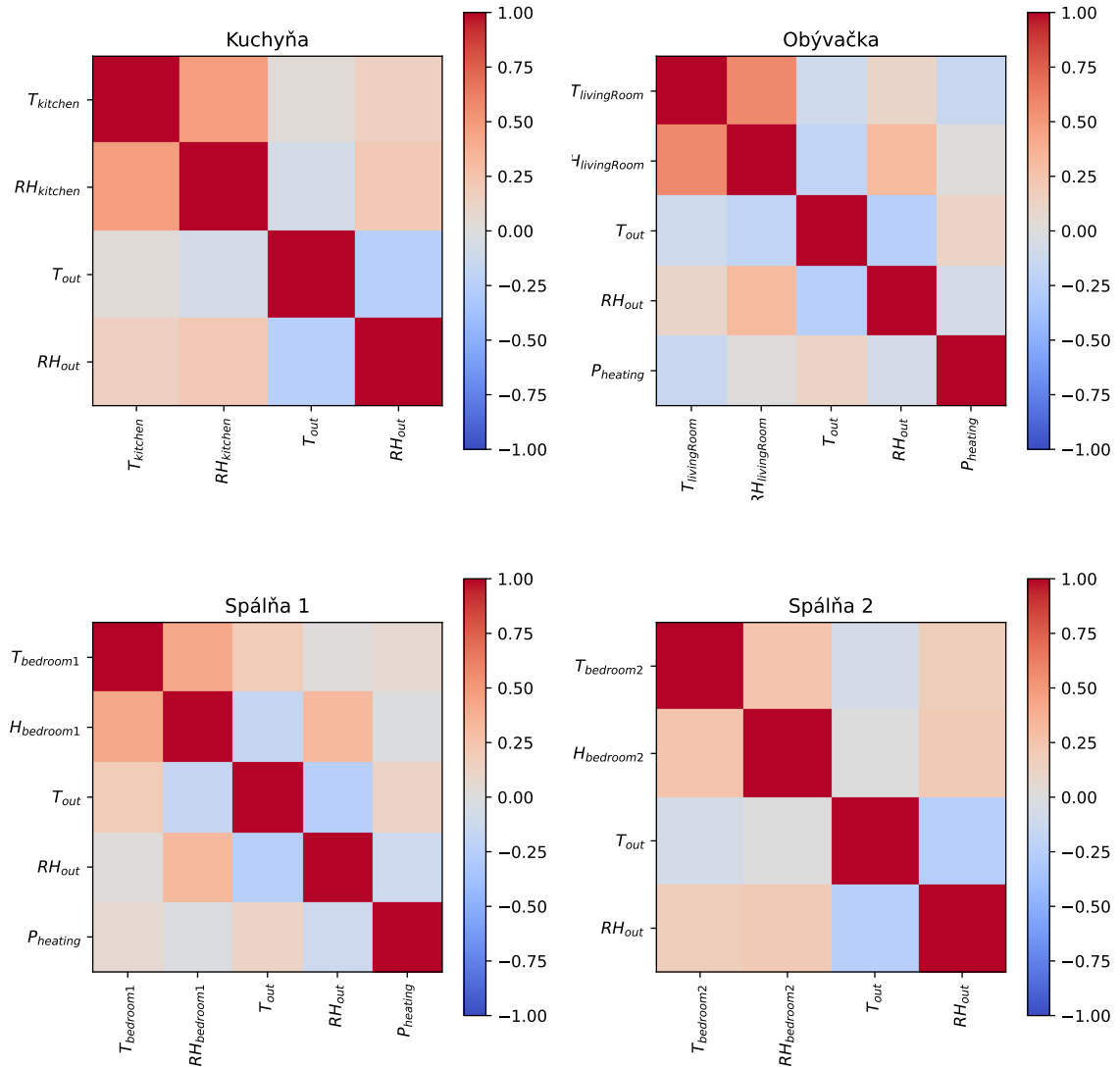
Nasledujúce grafy zobrazuje korelácie medzi nameranými dátami v miestnostiach. Z grafu zisťujeme hlavne závislosť vonkajšej a vnútornej teploty a vplyv vykurovania, prípadne vplyv nameraných vlhkostí. Znalosť závislostí nám pomôže vybrať veličiny pre predikciu. V nasledujúcich grafoch je použitý Pearsonov korelačný koeficient

Ako bolo spomenuté vyššie, významná závislosť kúrenia a vnútornej teploty sa neprejavila ani v koreláci. Vykurovanie som v grafoch označil P , avšak použitá veličina predstavuje len skokový graf medzi 1 a 0, podľa toho či bol otvorený ventil radiátora alebo nie, čo môže

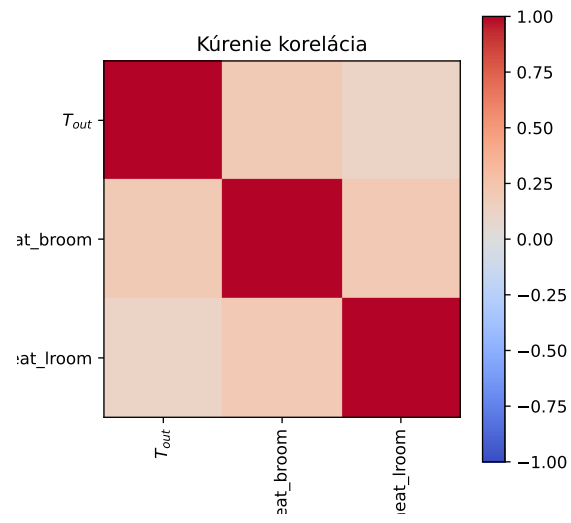
mať vplyv na koreláciu. Trebalo by sa zamyslieť aj nad posunom dát, a aproximáciou nábehu kúrenia, ale nepredpokladám, že by to malo veľký efekt.

Ďalej bola preskúmaná závislosť medzi priemernou dennou teplotou a celkovým časom, keď bol zapnutý radiátor počas dňa v grafe 4.20. Vonkajšia teplota mala tiež malý vplyv na vykurovanie. Na výsledok zrejme vplývala tepelná akumulácia budovy a tiež ekvitermná regulácia kúrenia. Prepokladali sme však aj napriek tomu väčšiu koreláciu.

Nezistil som ani závislosti medzi vnútornými a vonkajšími teplotami.



Obr. 4.19: Korelácie nameraných veličín pre jednotlivé miestnosti



Obr. 4.20: Korelácia vonkajšej teploty a vykurovania

Kapitola 5

Implementácia

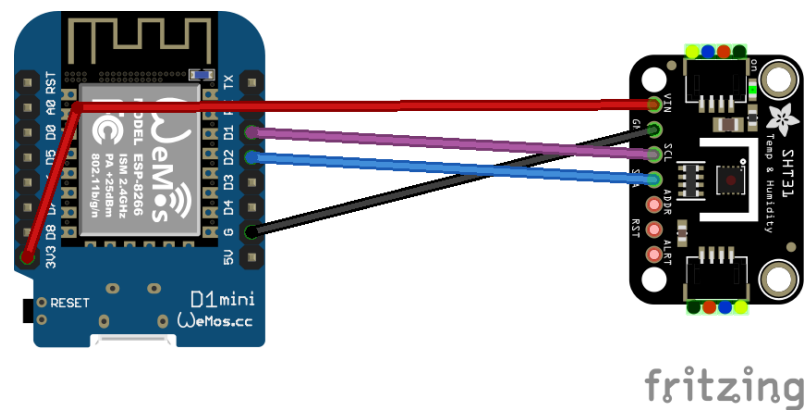
V práci bol navrhnutý a implementovaný jednoduchý riadiaci systém vykurovania zložený zo senzorov a kontroléra vykurovania. Sensory snímajú teplotu a vlhkosť v každej miestnosti a v exteriéri. Teplotný kontrolér umožňuje ovládať ventily radiátorov. Implementované bolo ovládanie ventilov pre 2 miestnosti.

Implementácia sa zaoberá aj predikciou teplôt.

5.1 Senzor teploty a vlhkosti

5.1.1 SHT30

Na meranie teploty a vlhkosti v izbách bol použitý teplotný senzor SHT30 pripojený k mikrokontroléru ESP8266. Mikrokontrolér zbiera a odosiela aktuálnu teplotu a vlhkosť cez WiFi MQTT brokeru. Namerané údaje sú odosielané na server v intervale 30s.



Obr. 5.1: Zapojenie teplotného senzora

5.1.2 Z31915-TX

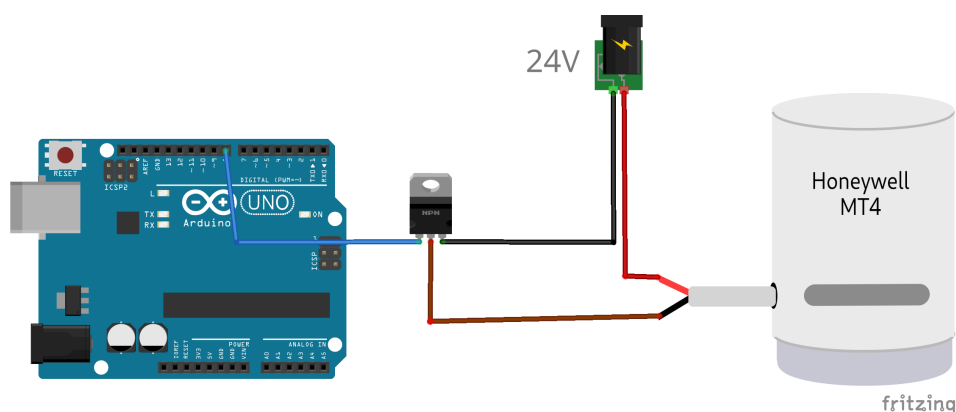
Údaje o vonkajšej teplote a vlhkosti sú namerané existujúcim čidlom meteorologickej stanice značky Auriol. Údaje z čidla zbiera mikrokontrolér ESP8266 so 434 MHz prijímačom RXB6. Údaje o teplote a vlhkosti sú odosielané ďalej cez MQTT.

Údaje prijaté cez RF prijmač bolo potrebné dekódovať. Čidlo používa moduláciu On-Off Keying (OOK). Prijmač RXB6 podporuje príjem dát s touto moduláciou. Prijaté dáta som dekodoval podľa tejto práce [14].

Ukázalo sa však, že vonkajší senzor a ani prijmač neboli veľmi spoľahlivé. Interval medzi meraniami je v rozshu 15 minút až 12 a viac hodín.

5.2 Kontrolér vykurovania

Kontrolér vykurovania ovláda ventily jednotlivých radiátorov. Termostatické ventily sú ovládané termoelektrickým pohon Honeywell MT4-024 NC popísaný v časti 4.4.2. Systém riadi mikrokontrolér Arduino, ktorý je pripojený cez EthernetShield k domácej sieti, cez ktorú prebieha komunikácia s MQTT brokerom.



Obr. 5.2: Zapojenie kontroléru vykurovania

5.2.1 Riadenie termoelektrického pohonu

Termoelektrický pohon je pripojený k spínanému zdroju jednosmerného napätia 24V. Ventil radiátora je pre verziu NC bez prúdu uzavretý. Prívod napätia pre otvorenie ventilu každej hlavice riadi mikrokontrolér Arduino cez MOSFET. MOSFET umožňuje plné otvorenie ventilu alebo čiastočné pomocou PWM.

5.2.2 ON/OFF regulácia

Pre fázu zberu dát o vykurovacom systéme som implmentoval ON/OFF reguláciu pre riadenie radiátorov. Kontrolér prijíma cez MQTT nameranú teplotu v miestnosti a setpoint termostatu. Ventil sa otvorí naplno, keď teplota v miestnosti klesne o 1°C pod setpoint a vypne 1°C nad setpointom. Kontrolér odosiela cez MQTT dáta o otvorení ventilu a nastavenom setpointe termostatu.

5.3 Zber dát

Dáta boli zbierané z teplotných senzorov a vykurovacieho kontroléra. Teplotné senzory sú umiestnené v každej zo 4 miestností a v exteriéry. Vykurovací kontrolér riadi vykurovanie v 2 miestnostiach.

Zber dát bol vykonávaný od 9.1.2022 do 1.5.2022, do konca vykurovacej sezóny.

V tabuľke je uvedený prehľad zaznamenávaných veličín.

| Veličina | Umiestnenie | Senzor | Interval |
|---------------------------------|-------------|-----------------------|-----------------|
| teplota | miestnosť | SHT30 | 30s |
| | exteriér | Z31915-TX | 10 min. – 12 h. |
| vlhkosť | miestnosť | SHT30 | 30s |
| | exteriér | Z31915-TX | 10 min. – 12 h. |
| setpoint termostatu | miestnosť | kontrolér vykurovania | pri zmene |
| otvorenie ventilu (open/closed) | miestnosť | | |

Tabuľka 5.1: Prehľad zaznamenávaných veličín

5.3.1 Funkcionalita

Senzory a kontrolér radiaceho systému sú pripojené na WiFi alebo cez Ethernet. Správy sú prenášané cez MQTT na centrálny bod, Raspberry Pi 4. V práci bol použitý MQTT broker Eclipse Mosquitto™, ktorý beží na centrálnom bode. Centrálny bod zároveň zbiera a ukladá dáta zo senzorov a kontroléra.

Výhodou MQTT je, že dáta sú odosielané cez centrálny bod – broker. Dáta zo senzorov sa dajú jednoducho prijímať viacerými klientami, v tomto prípade klient na zber dát a kontrolér vykurovania.

Dáta zo systému sa ukladajú do databázy časových radov InfluxDB. Prenos správ MQTT zo senzorov do databázy bol naprogramovaný v nástroji Node-RED [2.2](#).

Správy MQTT odosielané teplotným sensorom a vykurovacím kontrolérom majú tento formát:

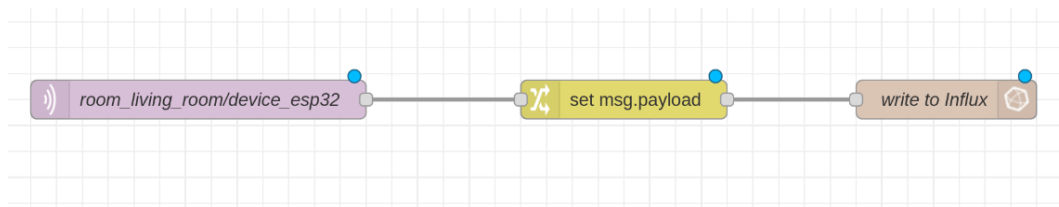
```
topic: room_nazov_miestnosti/device_nazov_zariadenia
payload: {
  temperature: teplota [°C],
  humidity: vlhkosť [%RH]
}
```

```
topic: room_nazov_miestnosti/device_nazov_zariadenia
payload: {
  heating: True/False,
  thermostat: teplota na termostate [°C]
}
```

V InfluxDB bola navrhnutá nasledovná schéma dát:

| measurement | tag key | tag key | field key | field key |
|-------------|---------|---------|-------------|-----------|
| ambient | room | device | temperature | humidity |
| heating | | | thermostat | heating |

Červeným sú označené ukladané dáta a modrým metadáta. Dáta sú z MQTT transformované nasledovným programom v Node-RED:



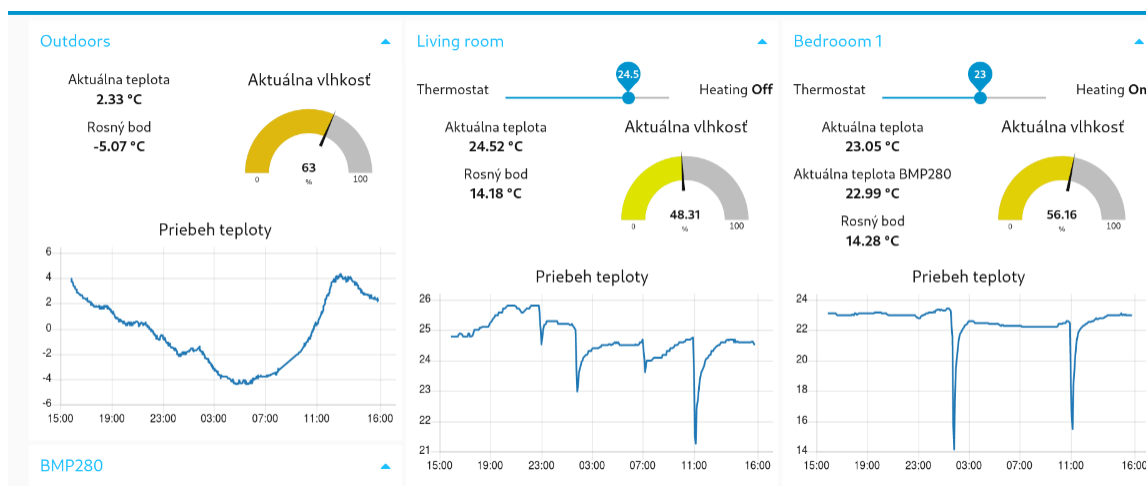
Obr. 5.3: Node-RED flow pre zbieranie dát

Prvý uzol prijíma dáta z vybranej témy MQTT, do ktorých druhý uzol `change` pridá metadáta z topic správy. Spracované dáta sú posledným uzlom `influxdb out` odoslané do vybraného merania databázy.

5.4 Dashboard

Dashboard je nástroj na zobrazovanie dát, ktorý je súčasťou Node-RED. Pomocou niekoľkých uzlov bolo zostrojené jednoduché rozhranie na sledovanie dát z teplotných senzorov. Dashboard zároveň slúžil na nastavenie termostatu pre ON/OFF reguláciu a zobrazenie stavu kúrenia. Pomocou Node-RED bol nastavovaný aj nočný útlm kúrenia na 20°C.

Monitorovanie dát sa osvedčilo, keďže bolo potrebné databázu, Node-RED a niektoré senzory raz za čas reštartovať. Vďaka monitorovaniu sa to väčšinou včas zistilo.



Obr. 5.4: Ukážka z vytvoreného dashboardu

5.5 Predikcia

Použitých a otestovaných bolo niekoľko algoritmov na predikciu. Vzorku dát tvorili údaje namerané medzi 9.1.2022 až 1.5.2022. Testovanie prebiehalo na vzorke testovacích údajov dĺžky 15 697, resp. 15 265 vzoriek. Dáta boli vzorkované každých 10 minút. Pre predikciu vnútorných teplôt bola použitá rôzna kombinácia vnútorných a vonkajších teplôt. Predikcia je demonštrovaná pre 2 miestnosti, v ktorých bolo zistené prekurovanie. Vybraté boli miestnosti kuchyňa a obývačka. Predikovaná je teplota na 1 hodinu dopredu. Dataset sa rozdelil na tréningový a validačný v pomere 70:30.

Na overenie siete boli použité Mean Absolute Error(MAE), Mean absolute percentage error (MAPE) a maximálna odchýlka a samostatné testovacie dáta, ktoré sa nenachádzali v tréningovom a validačnom datasete.

5.5.1 NARX

V ukážke bol použitý model NARX s krokom 10 minút. Predikovaná bola vnútorná teplota. Vonkajšie vstupy tvorila vonkajšia teplota. Narx používal pre predikciu posledných 6 vonkajších a vnútorných teplôt. Na aproximáciu bol použitý random forest regresor a direct autoregresor. Použitá bola knižnica fireTS.

Výsledky pre obývaciu izbu:

| Typ siete | MAE | MAPE | max. odchylka |
|------------------------|------|------|---------------|
| random forest regresor | 0.48 | 1.99 | 1.68 |
| direct auto regresor | 0.89 | 3.61 | 1.84 |

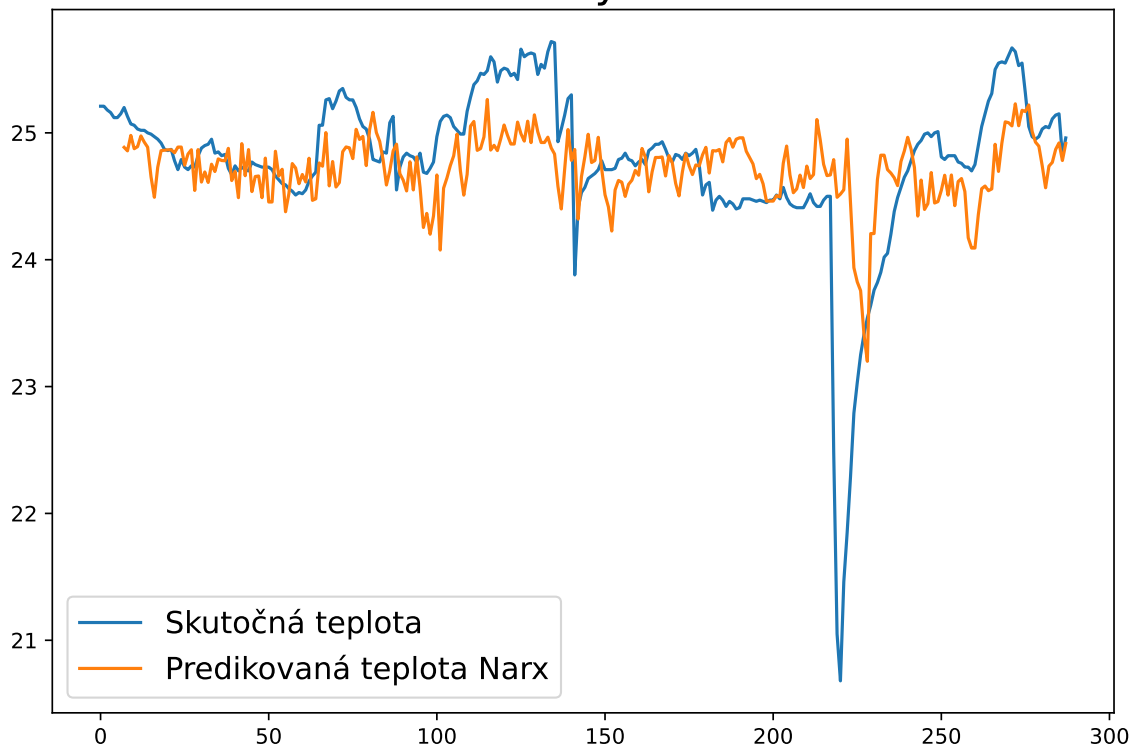
Tabuľka 5.2: Predikcia NARX pre obývačku

Výsledky pre kuchyňu:

| Typ siete | MAE | MAPE | max. odchylka |
|------------------------|------|------|---------------|
| random forest regresor | 0.67 | 2.78 | 1.9 |
| direct auto regresor | 0.88 | 3.54 | 3.08 |

Tabuľka 5.3: Predikcia NARX pre kuchyňu

NARX obývačka.



Obr. 5.5: Porovnanie predikcie NARX s realitou

5.5.2 Dopredná neurónová sieť

Predikcia pomocou doprednej neurónovej siete bola otestovaná s viacerými variáciami neurónov v skrytej vrstve a počtom skrytých vrstiev. Vstup siete tvorilo 6 posledných hodnôt vonkajšej a 6 posledných hodnôt vnútornej teploty. Dáta boli vzorkované po 10 minút. Zo vstupných dát za poslednú hodinu bola predikovaná vnútorná teplota o hodinu dopredu.

Skrytá vrstva používala aktivačnú funkciu tanh. Aktivačná funkcia pre výstupnú vrstvu bola lineárna funkcia. Výstupná vrstva mala 1 neurón. Neurónová sieť bola implementovaná v Pythone a pomocou knižnice Keras.

Výsledky pre obývaciu izbu:

| Typ siete | Počet skrytých vrstiev | Počet neurónov skrytej vrstvy | Epochy | MAE | MAPE | max. odchylka |
|-----------|------------------------|-------------------------------|--------|------|------|---------------|
| ffnn | 2 | 32 + 10 | 20 | 0.29 | 1.19 | 3.71 |
| ffnn | | 40 + 10 | 20 | 0.32 | 1.32 | 3.73 |
| ffnn | | 16 + 5 | 20 | 0.27 | 1.12 | 3.71 |
| ffnn | | 32 | 20 | 0.29 | 1.2 | 3.83 |

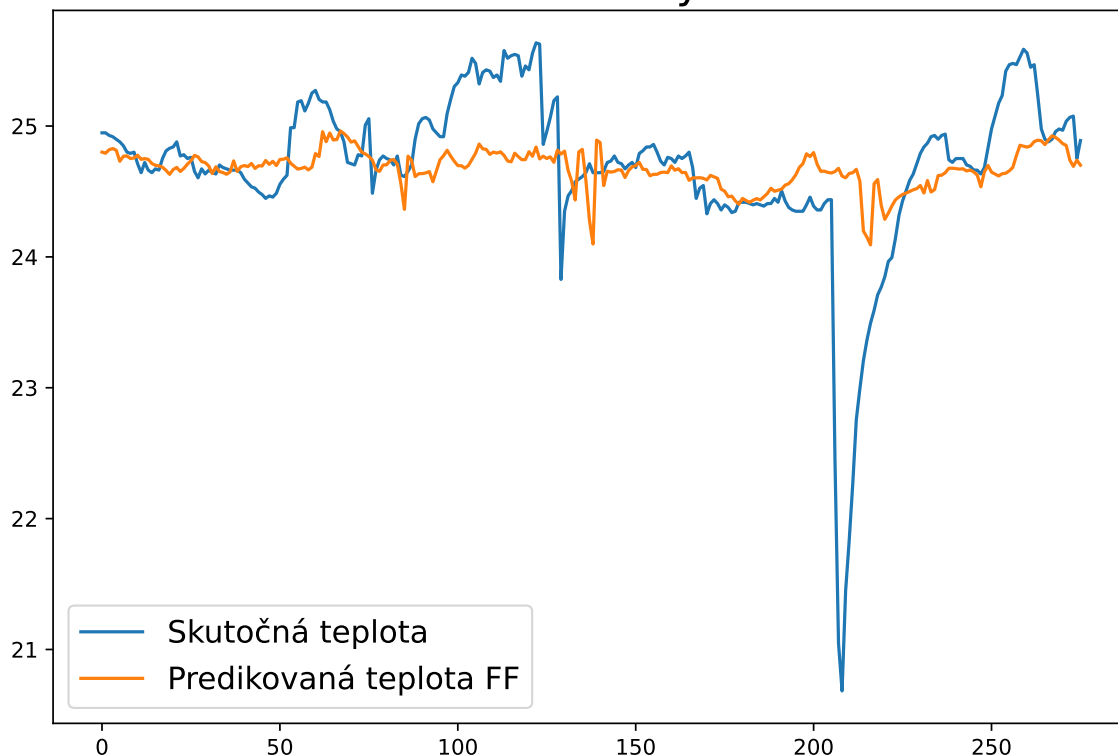
Tabuľka 5.4: Predikcia feedforward neural network pre obývačku

Výsledky pre kuchyňu:

| Typ siete | Počet skrytých vrstiev | Počet neurónov skrytej vrstvy | Epochy | MAE | MAPE | max. odchylka |
|-----------|------------------------|-------------------------------|--------|------|------|---------------|
| ffnn | 2 | 32 + 10 | 20 | 0.55 | 2.31 | 4.0 |
| ffnn | | 40 + 10 | 20 | 0.61 | 2.46 | 4.2 |
| ffnn | | 16 + 5 | 20 | 0.53 | 2.11 | 4.14 |
| ffnn | | 32 | 20 | 0.5 | 2.39 | 4.21 |

Tabuľka 5.5: Predikcia feedforward neural network pre kuchyňu

Feedforward obývačka.



Obr. 5.6: Porovnanie predikcie feedforward siete 16+5 s realitou

5.5.3 LSTM

Predikcia s LSTM bola otestovaná s rôznym počtom neurónov v skrytej vrstve. Vstupné dáta sú usporiadané do sekvencií dĺžky 6, čo sú ako v predošlých prípadoch dáta z poslednej hodiny.

Testovaná bola predikcia s vnútornou a vonkajšou teplotou na vstupe ako v predošlom prípade. Druhá varianta používa iba vnútornú teplotou na predikciu.

Výsledky pre obývaciu izbu:

| Typ siete | Počet skrytých vrstiev | Počet neurónov skrytej vrstvy | Epochy | MAE | MAPE | max. odchylka |
|-----------|------------------------|-------------------------------|--------|------|------|---------------|
| LSTM | | 8 | 10 | 0.42 | 1.77 | 3.22 |
| LSTM | 1 LSTM | 4 | 10 | 0.34 | 1.42 | 2.98 |
| LSTM | | 1 | 10 | 0.38 | 1.60 | 2.8 |

Tabuľka 5.6: Predikcia LSTM pre obývačku s vonkajšou teplotou

| Typ siete | Počet skrytých vrstiev | Počet neurónov skrytej vrstvy | Epochy | MAE | MAPE | max. odchylka |
|-----------|------------------------|-------------------------------|--------|------|------|---------------|
| LSTM | | 8 | 10 | 0.97 | 4.01 | 3.92 |
| LSTM | 1 LSTM | 4 | 10 | 0.35 | 1.48 | 3.06 |
| LSTM | | 1 | 10 | 0.43 | 1.79 | 3.26 |

Tabuľka 5.7: Predikcia LSTM pre obývačku bez vonkajšej teploty

Výsledky pre kuchyňu:

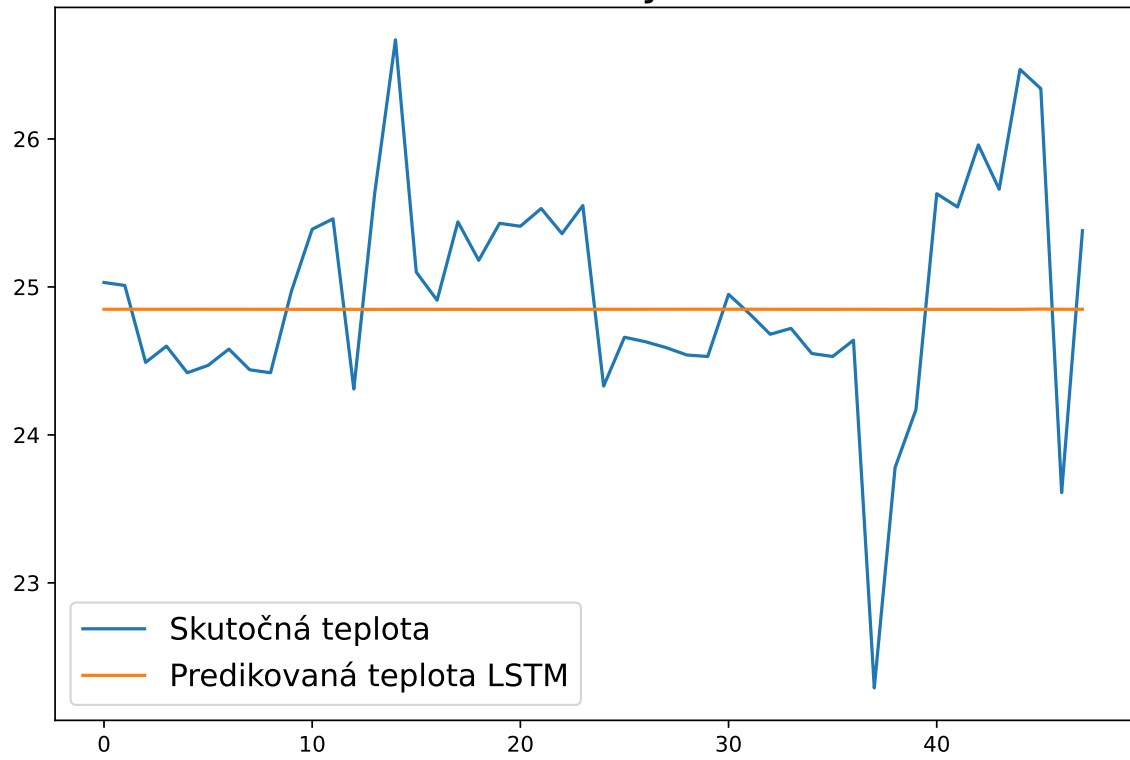
| Typ siete | Počet skrytých vrstiev | Počet neurónov skrytej vrstvy | Epochy | MAE | MAPE | max. odchylka |
|-----------|------------------------|-------------------------------|--------|------|------|---------------|
| LSTM | | 8 | 10 | 0.84 | 3.47 | 3.51 |
| LSTM | 1 LSTM | 4 | 10 | 0.85 | 3.48 | 3.27 |
| LSTM | | 1 | 10 | 0.56 | 2.27 | 2.51 |

Tabuľka 5.8: Predikcia LSTM pre kuchyňu s vonkajšou teplotou

| Typ siete | Počet skrytých vrstiev | Počet neurónov skrytej vrstvy | Epochy | MAE | MAPE | max. odchylka |
|-----------|------------------------|-------------------------------|--------|------|------|---------------|
| LSTM | | 8 | 10 | 0.64 | 2.63 | 3.01 |
| LSTM | 1 LSTM | 4 | 10 | 0.56 | 2.29 | 2.53 |
| LSTM | | 1 | 10 | 0.56 | 2.27 | 2.51 |

Tabuľka 5.9: Predikcia LSTM pre kuchyňu bez vonkajšej teploty

LSTM kuchyňa 2.



Obr. 5.7: Porovnanie predikcie najlepšej LSTM siete s realitou

Kapitola 6

Simulácia

6.1 Simscape™

Simscape™ je nástroj na rýchle vytváranie fyzikálnych modelov v prostredí Simulink. Fyzikálne modely sa vytvárajú spájaním fyzikálnych komponentov. Bloky Simscape v prostredí Simulink predstavujú jednotlivé fyzikálne prvky ako napríklad pumpy, motory a pod. Prepojením prvkov modelujeme rôzne fyzické prepojenia na prenos energie. Simscape umožňuje modelovať fyzikálnu podstatu systému, namiesto matematického popisu rovnicami. Simscape ponúka veľké množstvo fyzikálnych prvkov a vzorových systémov.

6.1.1 Simscape Fluids

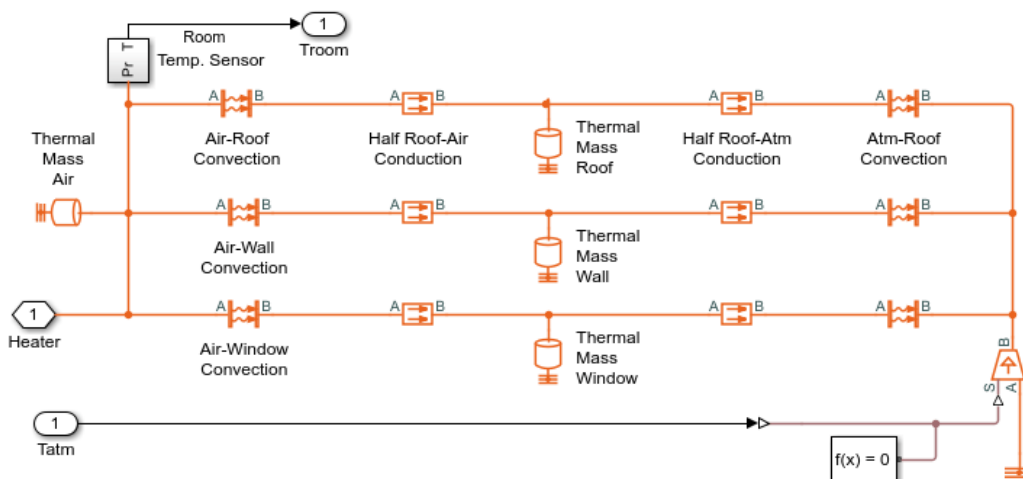
Simscape je knižnica pre modelovanie a simuláciu systémov kvapalín a plynov. K dispozícii je paleta komponentov pre modelovanie kvapalín a plynov, napr. modely púmp, ventilov, potrubí, tepelných výmenníkov, ktoré boli využité pri simulácii. Knižnicu Simscape Fluids využíva aj vzorový systém vykurovania domu, z ktorého som vychádzal.

6.2 Tepelné straty miestnosti

Modelovaný byt sa nachádza v bytovom dome postavenom medzi rokmi 1959 - 1964. Modelovaný byt má 4 miestnosti, z ktorých má každá 1 vonkajšiu stenu a okno alebo balkón. Byt sa nachádza na treťom poschodí z piatich. Dve obytné miestnosti a kuchyňa sú orientované na sever a jedna miestnosť je orientovaná na juh.

Vzorový model miestnosti, z ktorého vychádzame počíta s tepelnými stratami strechy, exteriérovej steny a okna. V modeli je ďalej zohľadnená tepelná akumulácia spomenutých stavebných prvkov. Vzorový model je na obrázku 6.1.

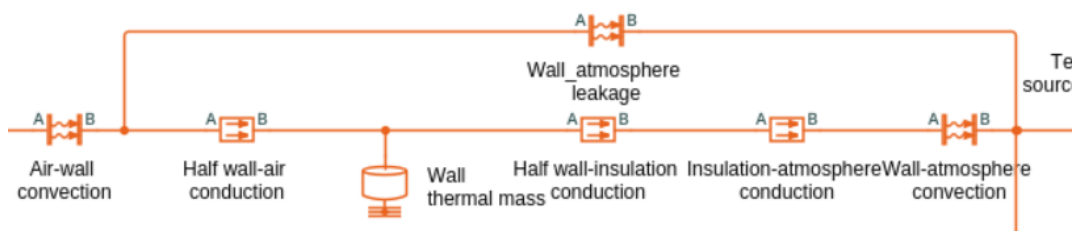
Vo vytváranom modeli sa počíta s tým, že okolité byty majú podobnú teplotu a únik tepla vnútornými stenami a stropom je veľmi malý. Preto sú na rozdiel od vzorového modelu, modelované len vonkajšie steny a okná. Model nepočítal s tepelnými mostami balkónov, ktoré sa nachádzajú v 3 modelovaných miestnostiach.



Obr. 6.1: Simscape vzorový model miestnosti

6.2.1 Obvodové steny

Každá miestnosť v byte má jednu vonkajšiu stenu. Obvodové steny bytovky sú murované zo škvárovbetónových tvárnic hrúbky 330 mm a zateplené penovým polystyrénom hrúbky 150 mm. Model vonkajšej steny sa skladá z prestupu tepla vonkajšou stenou, akumulácie tepla vonkajšej steny a prestupu tepla cez izolant. Prestup tepla je modelovaný komponentom Conductive Heat Transfer a akumulácia komponentom Thermal Mass z knižnice Simscape. Model je skonštruovaný podľa vzorového modelu. Použité parametre pre model vychádzajú z ČSN 73 0540 a sú uvedené v tabuľkách 6.1 a 6.2.



Obr. 6.2: Model steny

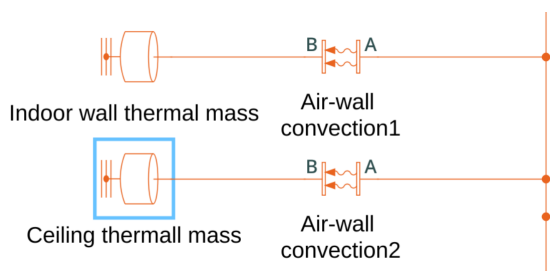
6.2.2 Plastové okná

Okná na modelovanom byte sú plastové s dvojsklom. Parametre okna vychádzajú z technických parametrov výrobcu a internetu. Výrobca udáva súčiniteľ prestupu tepla len pre dvojsklo $U = 1.1 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Pre potreby modelu bol prepočítaný súčiniteľ prestupu tepla na tepelný odpor pre hrúbku okna cca. 70mm. Model bol skonštruovaný podľa vzorového systému a skladá sa z prestupu tepla cez okno a úniku tepla netesnosťami. Použité boli na to komponenty Simscape Conductive Heat Transfer a Convective Heat Transfer. Použité parametre modelu sú uvedené v tabuľkách 6.1 a 6.2.

6.2.3 Tepelná akumulácia

Pri overovaní systému sa ukázala byť dynamika zmien teploty miestnosti v modeli príliš veľká a nezodpovedajúca nameraným hodnotám v modelovanom byte. V modeli bola preto zohľadnená aj tepelná akumulácia vnútorných stien a stropu. Použil som na to bloky Conductive Heat Transfer a Thermal Mass. Materiál vnútorných stien je dierovaná tehla. Hmotnosť stropného panelu bola získaná zo stavebných tabuliek.

V simulácii to však úplne vyhladilo malé rýchle zmeny teploty, ktoré boli v reálnom systéme merateľné a počíta s nimi aj predikcia.



Obr. 6.3: Model tepelnej akumulácie stien a stropu

| Modelovaný prvok | k [W · m ⁻¹ · K ⁻¹] | D [m] | ρ [kg/m ³] | c [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹] |
|---------------------------|---|------------|--------------------------------|--|
| Škvárobotónová tvárnica | 0.62 | 0.33 | 1300 | 830 |
| Penový polystyrén | 0.04 | 0.15 | – | – |
| Plastové okno s dvojsklom | 0.098 | 0.07 | – | – |
| Tehla | – | 0.006 | 401 | 1000 |
| Betón | – | 0.02 | – | 1020 |

Tabuľka 6.1: Parametre modelovaných prvkov obvodovej konštrukcie

| Miestnosť | A_{wall} [m ²] | A_{window} [m ²] | A_{indoor_wall} [m ²] | $m_{ceiling}$ [kg] |
|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------|
| Obývacía izba | 7.275 | 2.175 | 32.4 | 4725 |
| Kuchyňa | 5.88 | 3.57 | 17 | 2362.5 |
| Izba 1 | 1.29 | 3.57 | 32.4 | 1575 |
| Izba 2 | 3.763 | 3.763 | 35.1 | 4725 |

Tabuľka 6.2: Plochy modelovaných prvkov v izbách

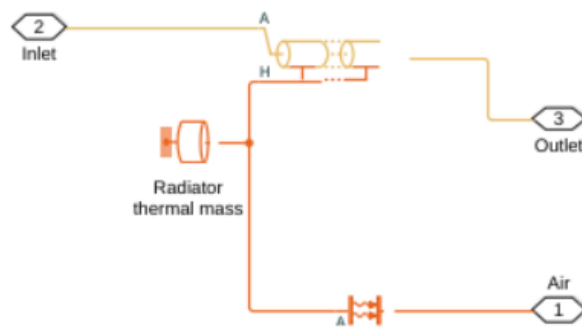
6.3 Vykurovanie miestnosti

Miestnosti sú vykurované liatinovými článkovými radiátormi napojenými na centrálny zdroj tepla. Teplota v miestnostiach je regulovaná termostatickými hlaviciami.

6.3.1 Model vykurovacieho telesa

V modelovaných miestnostiach sa nachádzajú článkové radiátory 4.3.2 s 5, 7, 10 a 11 článkami.

Model radiátora bol prebratý zo vzorového systému, pretože zodpovedá radiátorom v byte. Model počíta s odovzdávaním tepla do miestnosti len konvekciou. Pri modelovaných teplotách vykurovacích telies, je väčšina tepla odovzdaná konvekciou. Model zohľadňuje tiež vplyv tepelnej akumulácie vykurovacieho telesa, ktorý je predovšetkým pri liatinových radiátoroch významný. Odovzdávanie tepla konvekciou simuluje blok Convective Heat Transfer a akumuláciu tepla blok Thermal Mass knižnice Simscape.



Obr. 6.4: Model vykurovacieho telesa

Pre model je potrebné vypočítať súčiniteľ prestupu tepla z dostupných technických údajov pre článkový radiátor.

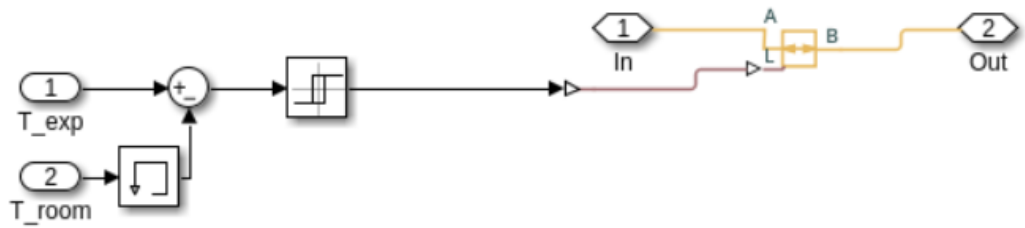
Radiátory sa skladajú z článkov $600 \times 200\text{mm}$, ktoré majú návrhový výkon 151W pri teplotnom spáde $90/70^\circ\text{C}$ a teplote miestnosti 20°C . [2] Pre ďalší výpočet bol použitý prepočítaný výkon $Q = 70\text{W}$ pre teplotný spád $65/50^\circ\text{C}$ a teplotu miestnosti $T_I = 24^\circ\text{C}$. Použitá je najvyššia teplota z grafu pre ekvitermnú reguláciu a teplotný spád 15°C 4.1. Plocha článku je $A = 0.31\text{m}^2$. [2]

Súčiniteľ prenosu tepla pre model sa vypočíta z parametrov v predchádzajúcom odstavci ako: $k = \frac{Q}{A(T_R - T_I)} = 4.0\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, kde $T_R = 57.5^\circ\text{C}$ je stredná teplota radiátora. Súčiniteľ prestupu tepla považujem za konštantný, pre teploty radiátora v simulácii.

6.3.2 Model termostatickej hlavice

Radiátory v byte sú riadené termostatickými hlavicami. V simulácii sú modelované ako lineárny ventil s on/off reguláciou. Model sa skladá z Flow Coefficient Parametrized Valve z knižnice Simscape a on/off regulácie z komponentov Simulinku.

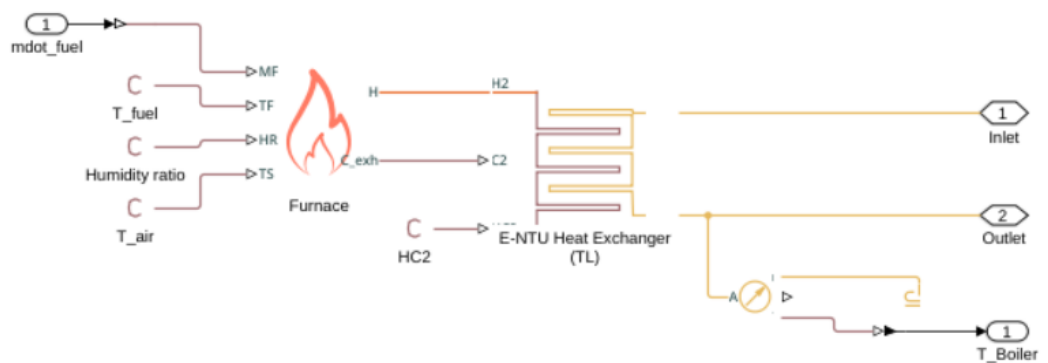
Prietokový súčiniteľ $k_v = 2\text{m}^3/\text{h}$ bol zvolený, tak aby bol minimálne obmedzený prietok a vznikol minimálny pokles tlaku na ventile. Nezodpovedá súčiniteľu k_v , ktorý sa používa pri regulácii vykurovania.



Obr. 6.5: Model termostatickej hlavice

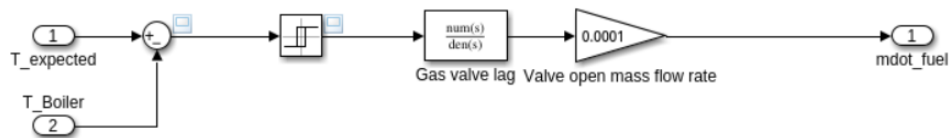
6.3.3 Modelovanie dodávky tepla

System na dodávku tepla bol prebratý zo vzorového systému. Skladá sa z bojlera s tepelným výmenníkom, expanznej nádoby a obehového čerpadla a termostatu ako bežný systém. Termostat vypína prívod plynu do bojlera. Niektoré parametre prvkov z pôvodného modelu dodávky tepla museli byť prispôsobené zmeneným parametrom radiátorov.



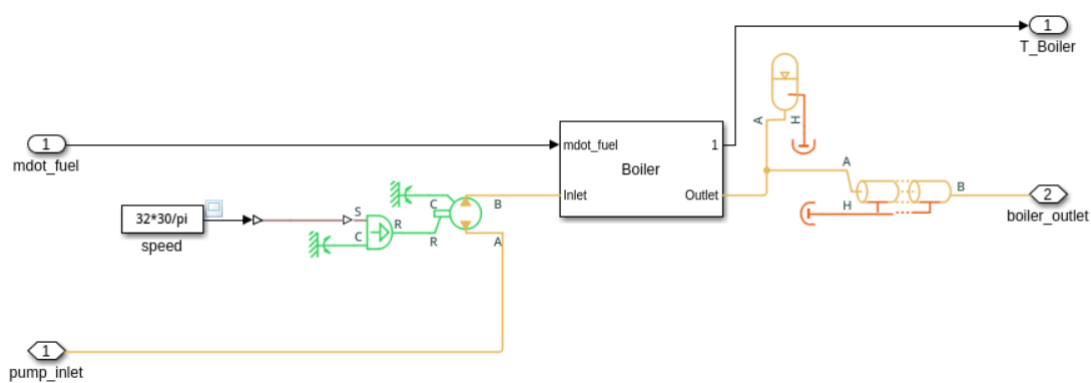
Obr. 6.6: Model bojleru

Upravený bol termostat, ktorý na rozdiel od pôvodného modelu spína na základe výstupnej teploty vykurovacieho média z kotla. Teplota prívodu do radiátorov tým ostáva konštantná ako pri systéme centrálného vykurovania. Upravené bolo množstvo plynu na prívode do kotla, aby nespínal tak často.



Obr. 6.7: Model termostatu

Ďalej bola prisôsobená rýchlosť obehového čerpadla zmeneným podmienkam. Hmotnostný prietok vody v modeli nemení zásadne výkon radiátorov ako v reálnom systéme. Parametre som nastavil, tak aby systém ostal stabilný.



Obr. 6.8: Model dodávky tepla

Kapitola 7

Záver

Cieľom práce bolo nájsť a implementovať systém učiaceho sa riadenia vykurovania. Podarilo sa vytvoriť základ pre inteligentné vykurovanie.

Zoznámil som sa nasledujúcim riešením pre prediktívne riadenie vykurovania, konkrétne Model Predictive Control. Navrhnuté boli senzory, ktoré monitorujú teplotu a vlhkosť a tiež vykurovací kontrolér, ktorý riadi ventily radiátorov. Navrhnutý bol systém na zbieranie a ukladanie dát a prediktívny model pre vykurovací systém. Teplotné senzory a vykurovací kontrolér boli realizované a funkčné. Implementovaná bola neurónová sieť, ktorá pomerne presne predikuje teplotu interiéru s tolerovateľnými odchýlkami teploty. Navrhnutá bola tiež simulácia pre otestovanie budúceho inteligentného vykurovania.

Do budúcnosti je potrebné sa zamerať na kvalitnejší zber údajov. Namerané údaje o teplote z jedného miesta v miestosti sa javili ako nespoľahlivé, často nedávali intuitívny zmysel a hlavne neodzrkadľovali vplyv kúrenia. Bolo by vhodné hlbšie preskúmať použitie senzorov pre ďalšie veličiny ako slnečný svit. Zbierané údaje a vykurovanie bolo ovplyvnené aj koronavírusom. Pobyt všetkých 4 členov domácnosti v malom byte a časté varenie generovalo nezanedbateľné tepelné zisky. Preto neboli zozbierané vhodné dáta o vykurovaní.

Ďalej je potrebné dokončiť prediktívne vykurovanie, s využitím natrénovaných modelov a simulácie.

Literatúra

- [1] *DB-Engines Ranking of Time Series DBMS* [online]. [cit. 2022-06-15]. Dostupné z: <https://db-engines.com/en/ranking/time+series+dbms>.
- [2] *Tepelný výkon ocelových a litinových článkových těles* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/59-tepelny-vykon-ocelovych-a-litinovych-clankovych-teles>.
- [3] *Centrálne teplo alebo vlastné vykurovanie?* [online]. Február 2009 [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://mojdom.zoznam.sk/stavba-a-rekonstrukcia/energia/centralne-teplo-alebo-vlastne-vykurovanie/>.
- [4] AUTOMATION a GMBH, C. S. H. *Honeywell MT4-024/MT4-23 MT8-024/MT8-230: SMALL LINEAR THERMOELECTRIC ACTUATORS*. Schönau, Nemecko: Automation and Control Solutions Honeywell GmbH, 2016.
- [5] BÜNNING, F., HUBER, B., HEER, P., ABOUDONIA, A. a LYGEROS, J. Experimental demonstration of data predictive control for energy optimization and thermal comfort in buildings. *Energy and Buildings*. 2020, zv. 211, s. 109792. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109792>. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819320638>.
- [6] CHOLLET, F. *Deep learning v jazyku Python: Knihovny Keras, TensorFlow*. Praha: Grada Publishing, 2019. ISBN 978-80-247-3100-1.
- [7] DIX, P. *Why Time Series Matters for Metrics, Real-Time Analytics and Sensor Data* [online]. 5. vyd. Júl 2021 [cit. 2022-06-15]. Dostupné z: <https://get.influxdata.com/rs/972-GDU-533/images/why%20time%20series.pdf>.
- [8] DUGA, T. *Systém tvorby mikroklimatu a řídicí systém pro budovu zahrnující administrativní a zdravotnickou ambulantní část - se zdrojem tepelné energie - CZT - horká voda*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
- [9] INFLUXDATA, INC.. *Documentation: InfluxDB v2.3* [online]. 2022 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://docs.influxdata.com/influxdb/v2.3/>.
- [10] KOSA, P. et al. *Koncepcia rozvoja mesta Brezno v oblasti tepelnej energetiky* [online]. Október 2020 [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: https://www.brezno.sk/data-files/brezno/download/koncepcia-rte-brezno_konecna_verzia_04.2021.pdf.
- [11] KURČOVÁ, M. *Hydraulické vyregulovanie a obnova bytového domu* [online]. Jún 2018 [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://www.asb.sk/biznis/sprava-budov/obnova-bytovych-domov/hydraulicke-vyregulovanie-a-obnova-bytoveho-domu>.

- [12] MATHWORKS. *Design Time Series NARX Feedback Neural Networks* [online]. [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-time-series-narx-feedback-neural-networks.html>.
- [13] MATTINGLEY, J., WANG, Y. a BOYD, S. Receding Horizon Control. *IEEE Control Systems Magazine*. 2011, zv. 31, č. 3, s. 52–65. DOI: 10.1109/MCS.2011.940571.
- [14] MORAVEC, P., KRUMNIKL, M., OLIVKA, P. a SEIDL, D. Connecting Household Weather Sensors to IoT World. In: SAEED, K. a HOMENDA, W., ed. *15th IFIP International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management (CISIM)*. Vilnius, Lithuania: Springer International Publishing, September 2016, LNCS-9842, s. 603–616. Computer Information Systems and Industrial Management. DOI: 10.1007/978-3-319-45378-1_53. Part 8: Intelligent Distributed Systems. Dostupné z: <https://hal.inria.fr/hal-01637456>.
- [15] MOREL, N., BAUER, M., EL KHOURY, M. a KRAUSS, J. NEUROBAT, A PREDICTIVE AND ADAPTIVE HEATING CONTROL SYSTEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. *International Journal of Solar Energy*. Taylor & Francis. 2001, zv. 21, 2-3, s. 161–201. DOI: 10.1080/01425910108914370. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/01425910108914370>.
- [16] MQTT.ORG. *MQTT: The Standard for IoT Messaging* [online]. 2022 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://mqtt.org/>.
- [17] OPENJS FOUNDATION & CONTRIBUTORS. *Node-RED* [online]. [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://nodered.org>.
- [18] ROJKO, M. *Domové odovzdávacie stanice tepla znižujú náklady na teplo a teplú vodu* [online]. December 2017 [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://www.energie-portal.sk/Dokument/domove-odovzdavacie-stance-tepla-znizuju-naklady-na-teplo-a-teplu-vodu-104139.aspx>.
- [19] SINČÁK, P. a ANDREJKOVÁ, G. *Neurónové siete: Inžiniersky prístup. Diel 2*. 1. vyd. Košice: Elfa, 1996. ISBN 80-88786-42-8.
- [20] SMART ENERGO S.R.O.. *Radiátorové kúrenie* [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://kureniespresov.sk/domacnost/kurenie/radiatorove-kurenie/>.
- [21] SMART ENERGO S.R.O.. *Čo je termostatická hlavica?* [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://kureniespresov.sk/byvanie/co-je-termostaticka-hlavica/>.
- [22] THE HIVEMQ TEAM. *MQTT Essentials* [online]. 2015 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://www.hivemq.com/tags/mqtt-essentials/>.
- [23] VIESSMANN, S.R.O.. *Radiátory: Ktorý typ na ktorý spôsob vykurovania?* [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://vykurovanie24.sk/vykurovanie/radiatory-ktory-tyt-na-ktory-sposob-vykurovania/>.
- [24] WIKIMEDIA COMMONS. *NeuronModel* [online]. 2008 [cit. 2022-07-25]. File: NeuronModel.jpg. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NeuronModel.jpg>.

- [25] WIKIMEDIA COMMONS. *Radiator-convection* [online]. 2019 [cit. 2022-07-27]. File: Radiator-convection.svg. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radiator-convection.svg>.