

HVAC-RENDSZER MODELLEZÉSE ÉS MODELL ALAPÚ IRÁNYÍTÁSA

MODELLING AND MODEL-BASED CONTROL OF AN HVAC SYSTEM

Kardos Tamás,¹ Kutasi Dénes Nimród²

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Automatika és Számítástechnika Kar, Automatizálás Tanszék, Kolozsvár, Románia, kardos_tamas2007@yahoo.com

² Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Villamosmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, kutasi@ms.sapientia.ro

Abstract

An HVAC system contains heating, ventilation and air conditioning equipment used in office or industrial buildings. The goal of this research is to design a controller for the process of cooling an office building that is made up of three rooms. The desired room temperature can be achieved by controlling the fans making up the fan coil units and the cooling medium's temperature. By these means the building connected to the electrical grid becomes a smart office. The used building model includes several dynamically changing interior and exterior heat sources affecting the inner climate, which introduces a level of uncertain prediction into the system. We have determined the controller's performance by the rate of deviation from the expected temperature, the consumed electrical energy and the generated noise. The controller was created in Matlab Simulink with the possibility of migration to a Siemens PLC.

Keywords: *modelling, temperature, controller, cooling, prediction.*

Összefoglalás

A HVAC-rendszerek magukba foglalják a fűtésért, szellőztetésért és légkondicionálásért felelős épületgépészeti berendezéseket. A kutatás célja egy olyan szabályozó algoritmus tervezése volt, ami egy három szobából álló irodaépület hűtését vezérli. A kívánt hőfokot a szobákban lévő három ventilátor ki-bekapcsolásával, illetve a hűtőközeg hőmérsékletének szabályozásával érjük el. Ennek értelmében a villamos hálózatra kapcsolt épület okossá válik. A modellben figyelembe voltak véve az épület hőmérsékletét befolyásoló külső és belső hőforrások, melyek dinamikusan változnak. Mindezek bizonytalan predikciókat vezettek be a rendszerbe. Az algoritmus teljesítményét a hőmérsékletprofil követésével, a hűtés során felhasznált energiával, illetve a keletkezett zajjal mértük. A szabályozó Matlab Simulinkban volt összeállítva olyan formában, hogy Siemens PLC-n is futtatható legyen.

Kulcsszavak: *modellezés, hőmérséklet, szabályozás, hűtés, predikció.*

1. Bevezetés

A kutatás alapját a MED'18: The 26th Mediterranean Conference on Control and Automation konferencia keretén belül megszervezett ipari verseny képezte, amelyen a SapiEngineering csapat tagjaként vettem részt (Kardos T.). A kítűzött feladat a megadott hűtőrendszert szabályozó al-

goritmus tervezése volt, amely egy Siemens PLC-n fog működni. A rendszer modelljét Matlab Simulinkban elkészítve kaptuk meg, amelyet e dolgozatban röviden ismertetünk, bővebb részletekért lásd az [1]-es dokumentumot.

A megadott rendszer szabályozott bemenetei a hűtőközeg hőmérséklete (T_s) és a ventilátoros konvektorok vezérlőjelei (FS_1 , FS_2 és FS_3). A szo-

bák hőmérsékletére hatással van a konvektorok által generált hűtött levegőn kívül a külső levegő hőmérséklete, a napsugárzás, illetve egyéb hőforrások, mint például emberek jelenléte vagy gépek működtetése. Ezen tényezők bizonytalan predikciók formájában vannak modellezve. A kapott modell elvi rajza az **1. ábrán** látható.

Épületek leírásának egy másik módja a lineáris paramétereken alapuló modellek készítése, mért BMS-adatok segítségével [2]. Hasonló épület leírására BRCM modellezést használunk a [3]-ban. Több részből álló, fűtést, hűtést és szellőztetést is tartalmazó rendszert tanulmányozunk a [4]-ben.

2. Szabályozott rendszer

2.1. Épületmodell

A modellezett irodaépület három déli fekvésű szobából áll, amelyek egy-egy hűtőkonvektorral vannak felszerelve. Az épület dinamikája állapotteres modellel írható le az (1)-es képlet alapján.

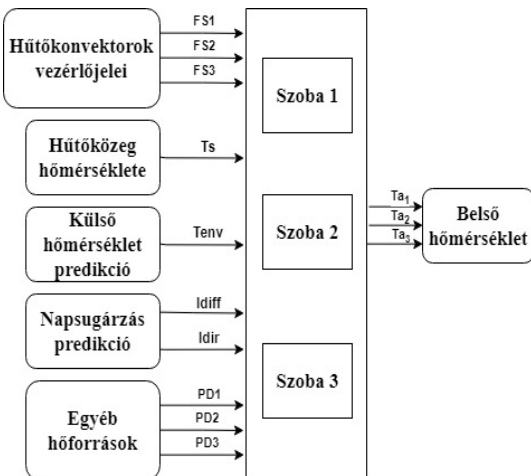
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (1)$$

ahol az x állapotvektor a három szoba T_a levegő- és T_{fal} falhőmérsékletéből tevődik össze.

$$x = [T_{a,1} \ T_{a,2} \ T_{a,3} \ T_{fal,1} \ T_{fal,2} \ T_{fal,3}]^T \quad (2)$$

A bemeneti u vektort a T_{env} külső levegő-hőmérséklet, I_{dir} közvetlen napsugárzás, I_{diff} közvetett napsugárzás, a ventilátorok által leadott P_{FCU} hő, illetve P_D egyéb hőforrások alkotják.

$$u = [P_{FCU1}, P_{FCU2}, P_{FCU3}, T_{env}, I_{diff}, I_{dir}, P_{D1}, P_{D2}, P_{D3}]^T \quad (3)$$



1. ábra. Rendszer elvi rajza

A T_{env} , I_{dir} és I_{diff} bemeneti tényezők a predikciós értékek és a normális eloszlással modellezett predikciós hibák összegével egyenlők. A P_D -vel jelölt egyéb hőforrások ugyancsak normális eloszlással írhatók le az alábbi képlet alapján:

$$P_{D,i} = \begin{cases} k_i + w_{D,i} & \text{ha } 8:00 \leq h \leq 18:00 \\ w_{D,i} & \text{másként} \end{cases} \quad (4)$$

Ezen hőforrások esetén figyelembe vesszük a munkaidőben jelentkező nagyobb intenzitású hőt, amely k_i -vel van jelölve és szobánként az (5) szerint változik. Hasonló megoldást tanulmányoznak az [5]-ben, ahol emberek jelenlététől függően szabályozzák a belső hőmérsékletet.

$$k_i = \begin{cases} 100 & \text{ha } i = 1 \\ 120 & \text{ha } i = 2 \\ 150 & \text{ha } i = 3 \end{cases} \quad (5)$$

Az y kimeneti vektor a szobahőmérsékletekből áll:

$$y = [T_{a,1} \ T_{a,2} \ T_{a,3}]^T \quad (6)$$

2.2. Hűtőrendszer

A hűtőrendszer felépítésében található hűtőkonvektorok a legelterjedtebb hőkezelő berendezések irodaépületek esetén. Klasszikus megoldásokkal szembeni magas teljesítménye kedvelt választássá teszi hűtés vagy melegítés céljából.

Hűtés során a ventilátoros konvektorokon előre szabályozott hűtőközeg folyik át, az így keletkezett hűtött levegőt pedig ki-, bekapcsolható ventilátorokkal juttatják a belső térbe [6]. A modellezett ventilátor elektromos teljesítménye bekapcsolt állapotban 50 W, máskülönben 0. A hűtőközeg hőmérséklete megadott határok közé van korlátozva: $T_s \in [7,11]$.

A modellben figyelembe vettük a hűtőrendszer vezetékein fellépő hőveszteséget is.

2.3. Predikciók

A szabályozó algoritmus fejlesztésére különböző predikciós vektorok álltak rendelkezésre.

Idetartozik az épületmodell bemenetei között is megjelenő külső levegő-hőmérséklet, illetve a közvetlen és közvetett napsugárzás. Mindezek 24 órára előrevetítve óránként szolgáltatnak predikciós értékeket.

Emellett a referencia-hőmérséklet is kifejezhető 24 órás predikció formájában, figyelembe véve a megadott alsó és felső hőmérséklet-határokat, amelyek az alábbi képlet alapján változnak:

$$L_b \leq SP_i \leq U_b$$

$$L_b = \begin{cases} 24 & \text{ha } 8:00 \leq h \leq 18:00 \\ 0 & \text{másként} \end{cases} \quad (7)$$

$$U_b = \begin{cases} 24 & \text{ha } 8:00 \leq h \leq 18:00 \\ 100 & \text{másként} \end{cases}$$

Amint a (7)-es képlet mutatja, munkaidő alatt a referencia-hőmérséklet konstans módon 24 fokra van állítva. Emellett munkaidőn kívül az előírt hőmérséklet bármilyen értéket felvehet, mivel ebben a periódusban nem vezetődik be hűtőközeg a rendszerbe, illetve a költségfüggvény sem veszi számításba a hőmérséklet-különbséget.

Hasonlóképpen 24 órával előre megbecsülhető az elektromos energia ára is, amely 15 perces időközönként váltakozik (c_{el}).

2.4. Költségfüggvény

A tervezett szabályozó euróban kifejezett működési költsége jelenti a rendszer teljesítményét, amelyet az alábbi összeg ír le:

$$J = J_1 + J_2 + J_3, \quad (8)$$

ahol

J_1 az elhasznált elektromos energia ára:

$$J_1 = \int_{\tau=0}^{T_{sim}} \frac{c_{el}(\tau)}{3.6 \cdot 10^6} \left(P_{el}^P(\tau) + P_{el}^{HP}(\tau) + \sum_{i=1}^3 P_{FCU,i}(\tau) \right) d\tau, \quad (9)$$

amelyben c_{el} [EUR/kWh] az áram ára, T_{sim} [s] a szimulációs idő, P_{el} [W] az elektromos fogyasztás.

J_2 a megadott referencia-hőmérséklettől való eltérés költsége:

$$J_2 = \int_{\tau=0}^{T_{sim}} \varphi(t) \frac{c_{el}(\tau)}{3.6 \cdot 10^6} \sum_{i=1}^3 Q_i(T_{a,i}(\tau) - SP_i(\tau))^2 d\tau \quad (10)$$

ahol Q_i a megadott hőmérséklettől való eltérést büntető súlyzóérték, $\varphi(t)$ pedig azt határozza meg, hogy a követési hiba csak munkaidőben legyen büntetve.

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & \text{ha } 8:00 \leq h \leq 18:00 \\ 0 & \text{másként} \end{cases} \quad (11)$$

J_3 költséggel a hűtés során keletkezett zajt mértük:

$$J_3 = c_{ON} \sum_{j=0}^{N_{sim}} \sum_{i=1}^3 \delta_i(j) \quad (12)$$

$$\delta_i(j) = \begin{cases} 1 & \text{ha } FS_i(j) = on; FS_i(j-1) = off \\ 0 & \text{másként} \end{cases} \quad (13)$$

ahol c_{ON} a ventilátoros konvektorok bekapcsolásának ára, δ_i a ventilátor ki- vagy bekapcsolt állapota, j az 1 perces diszkrét időközöket jelöli,

N_{sim} pedig az egy szimulációban levő összes időközök száma.

3. Tervezett szabályozó

Hasonló rendszerek szabályozására többféle megoldás létezik. Fuzzy neurális hálózatokat és genetikus algoritmust alkalmazó MPC-szabályozót hasonlítottunk össze a [7]-ben. PID, illetve robusztus PID kerül bemutatásra a [8] és [9]-ben. A [10] Fuzzy szabályozót ötvöz PID-tulajdonságokkal.

Kutatásunkban a belső hőmérséklet szabályozására elkészített szabályozó két részből áll: az első a hűtőkonvektorok ventilátorára adott vezérlőjel, a másik pedig a hűtőközeg hőmérsékletét meghatározó algoritmus. A szabályozott rendszerhurok elvi rajza a 2. ábrán látható.

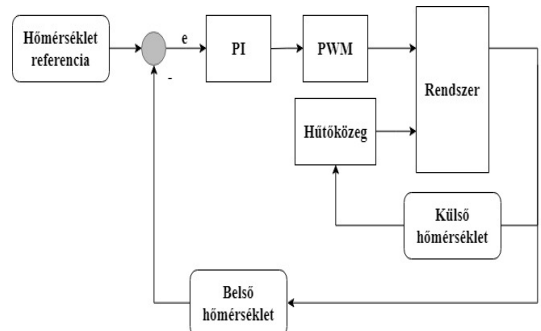
Mivel ki-, bekapcsolható ventilátorokat kellett vezérelni, PWM-et használva határoztuk meg a szabályozó kimenetét. A PWM kitöltési tényezőjét pedig diszkrét PI-szabályozóval alakítottuk a megadott hőmérséklet-referencia és a mért szobahőmérséklet közötti különbség alapján.

A szabályozó proporcionális paraméterének (K_p) kiszámítására a közvetlen napsugárzás predikcióját használtuk fel. A 24 órás predikciós értékekből többszöri szimulációk után arra a következtetésre jutottunk, hogy mindig az első 4 óra adatait érdemes figyelembe venni:

$$K_p = \frac{(I_{dir}(k|k) + I_{dir}(k+1|k) + I_{dir}(k+2|k) + I_{dir}(k+3|k))}{100} + 5 \quad (14)$$

A szabályozó integratív paraméterét (K_i) közvetlenül a külső hőmérséklet befolyásolja 100-szorosára csökkentett formában:

$$K_i = \frac{T_{ext}}{100} + 5 \quad (15)$$



2. ábra. A szabályozott rendszer elvi rajza

A vezérlőjel meghatározásában felhasználtuk a rendelkezésre álló többi predikciós vektort is. Az elektromos áram árának predikciói közül az első órában bekövetkező érték szintén befolyással van a PWM-jel kitöltési tényezőjére, miszerint magasabb ár kisebb kitöltési tényezőt és rövidebb működési időt eredményez.

A ventilátorok bekapcsolását a PWM-mel kiszámolt eseteken kívül a közvetett napsugárzás, illetve a külső levegő hőmérsékletének predikciós vektorai is befolyásolják. A közvetlen napsugárzáshoz hasonlóan az említett kettő esetében is csak az elkövetkező 4 órára tekintünk előre. Ezen faktorok egy bizonyos határ meghaladásával, illetve magas követési hiba mellett lesznek hatással a rendszerre.

A hűtőközeg hőmérsékletének szabályozására az energiatakarékosság elvét követtük, miszerint csak szükség esetén hűtöttünk nagy teljesítménnyel. Figyelembe véve a megengedett hőmérséklet-határokat (7-11 fok), a szabályzást a jelenlegi külső hőmérséklet alapján végeztük. Így ha a kinti hőmérséklet 20 fok alá csökkent, a hűtőfolyadékot 11 fokra állítottuk, melegebb körülmények esetén már 7 fokossal hűtöttünk.

4. Eredmények

A szabályozott rendszer szimulációját 3 napra futtattuk úgy, hogy a szobák referencia-hőmérsékletének 24 Celsius-fokot állítottunk be.

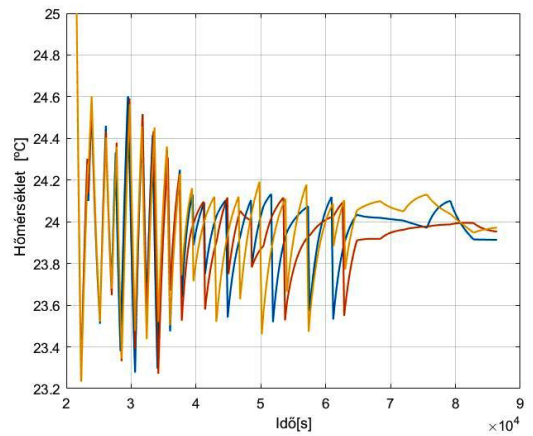
Habár 3 napot szimuláltunk, könnyebb olvashatóságért csak az első nap eredményeit fogjuk ábrázolni. A **3. ábrán** a három szoba hőmérsékletének időbeli változása figyelhető meg. A szabályozott hűtőközeg grafikonját ábrázolja a **4. ábra**.

Az **5. ábra** első grafikonján a külső hőmérséklet változása látható, míg a második és harmadik grafikon a közvetlen, illetve közvetett napsugárzás erősségét ábrázolja.

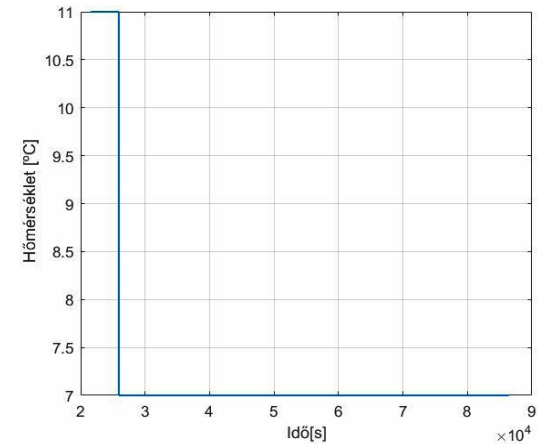
Megfigyelhető, hogy a szobák hőmérséklete $\pm 0,6$ Celsius-fok eltéréssel követi a megadott referenciát. A hőmérséklet váltakozása nappal dinamikusabb, amikor a kinti hőmérséklet magasabb és napsugárzás is éri az épületet. Ezen külső tényezők együttesen növelik a szoba hőmérsékletét. Éjszakai órákban a szobák hőmérséklete $\pm 0,1$ fok különbséggel a referenciával megegyező.

Az első szobában zajkint ható egyéb hőforrások változását a **6. ábra** mutatja. Ezen zajok magas értéke ugyancsak befolyással van a belső hőmérséklet ingadozására.

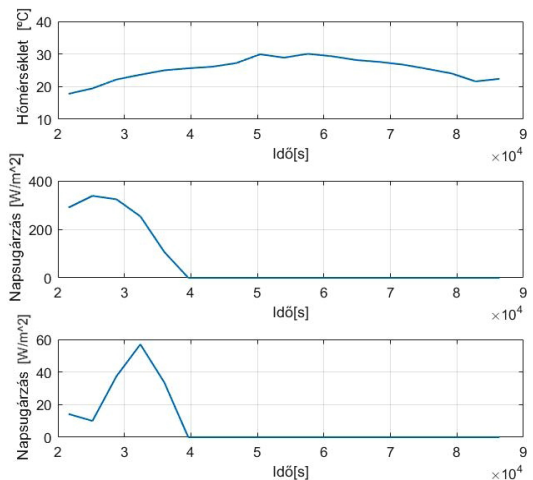
A **7. ábrán** láthatóak a három szoba ventilátoraira kiadott vezérlőjelek. Jól elkülöníthetők a



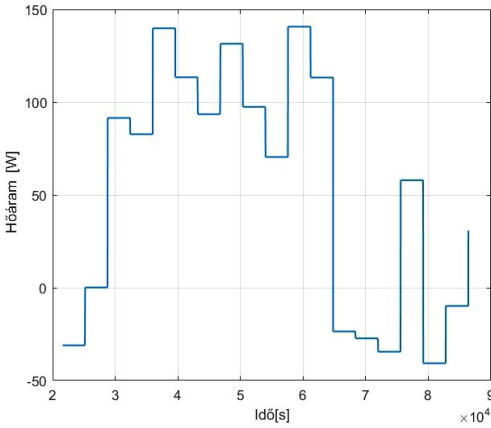
3. ábra. Három szoba hőmérséklete



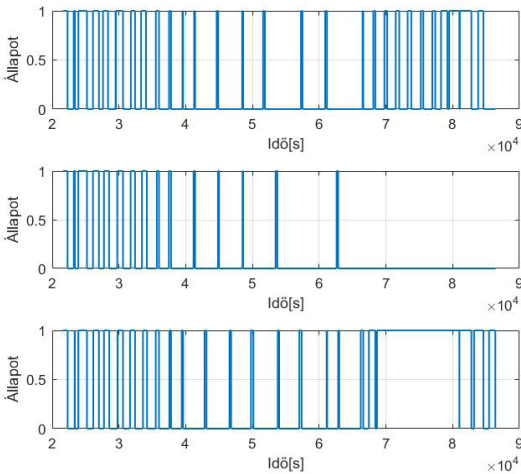
4. ábra. Hűtőközeg hőmérséklete



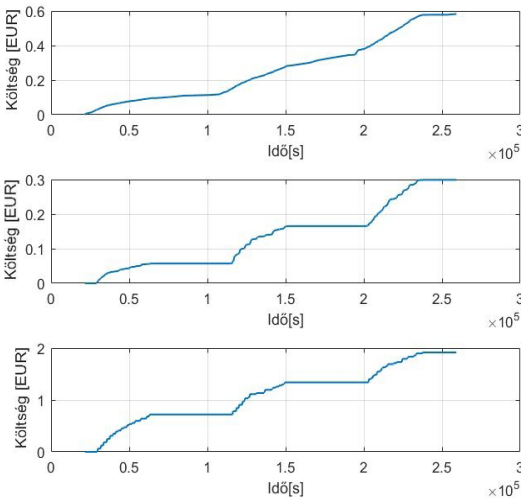
5. ábra. Külső hőmérséklet, közvetlen napsugárzás, közvetett napsugárzás



6. ábra. Egyéb hőforrások az első szobában



7. ábra. Ventilátorok vezérlőjelei



8. ábra. Elhasznált elektromos energia, referenciától való eltérés és hűtési zaj költsége

hűtőkonvektor bekapcsolt állapotát jelző pillanatok a kikapcsolt állapotoktól. A három konvektor vezérlőjele hasonló dinamikájú, azonban főleg a második szoba esetében nagyobb eltérés figyelhető meg. Ennek oka az egyéb hőforrások szobánkénti változása és véletlenszerű tulajdonsága.

A szabályozó teljesítményét jelző költség 3 napos szimuláció után 2,799 EUR volt úgy, hogy az áram ára 0,01-0,09 EUR/kWh között mozog. A három költség típus növekedését mutatja a **8. ábra**. Leolvasható, hogy a legnagyobb költséget (1,91 EUR) a hűtés során keletkezett zaj, vagyis a hűtőkonvektorok bekapcsolt állapota jelenti. Ehhez hozzáadódik még az elhasznált elektromos energia ára (0,58 EUR). Végül a szabályozó optimális működését mutatja a hőmérséklet-referenciától való eltérés alacsony végső költsége (0,29 EUR).

5. Következtetések

A dolgozatban bemutatásra került egy modellezett irodaépület hűtésrendszerét szabályozó algoritmus. A tervezés alatt figyelembe vettük az épület hőmérsékletére hatással levő külső tényezőket is. A szimulációkból kiderül, hogy a szabályozó alacsony eltéréssel, sikeresen követi a megadott referenciát. Emellett levonható az a következtetés, hogy a modellezett szobák hőmérsékletére a közvetlen napsugárzás, illetve a belső hőforrások vannak leginkább hatással.

Tehát az elkészített szabályozó költségghatékony megoldást jelent egy dinamikusan változó bemenetekből álló rendszer vezérlésére. Megfelelő változtatások mellett ezen szabályozó fűtés céljára is használható.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást Magyarország Collegium Talentum 2018 programja támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] The 26th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2018 Process automation challenge. 2018. http://www.med-control.org/med2018/wp-content/uploads/2018/02/MED2018_Process_automation_challenge_task_details.pdf (letöltve: 2018. február 27.).
- [2] Mustafaraj G., Chen J., Lowry G.: *Development of room temperature and relative humidity linear parametric models for an open office using BMS data*. Energy and Buildings, 42/3. (2010) 348-356. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.001>
- [3] Hobaj Zs.: *Modell alapú épületautomatizálás*. Diplomadolgozat, Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem (2018).

- [4] Xiang-Dong H., Harry A. H.: *Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) system and method using feedback linearization*. US10701799, AEÁ, 2003.
- [5] Norman B. G., William E. C., Jr.: *Room temperature controller*. US4318508A, AEÁ, 1982.
- [6] Szemán R.: *Mi is a fan-coil?* VGF online. 2001.
<https://www.vgfszaklap.hu/lapszamok/2001/junius/874-mi-is-a-fan-coil> (letöltve: 2018. október 10.)
- [7] Zhang F.: *Building Temperature Control with Intelligent Methods*. Electronic Theses and Dissertations, 733 (2014).
<https://digitalcommons.du.edu/etd/733>
- [8] Tashtoush B., Molhim M., Al-Rousan M.: *Dynamic model of an HVAC system for control analysis*. Energy, 30/10. (2005) 1729–1745.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.10.004>
- [9] Kasahara M., Matsuba T., Kuzuu Y., Yamazaki T., Hashimoto Y., Kamimura K., Kurosu S.: *Design and Tuning of Robust PID Controller for HVAC Systems*. ASHRAE Transactions, 105/2. (1999) 154–166.
https://www.researchgate.net/publication/236447627_Design_and_tuning_of_robust_PID_controller_for_HVAC_systems
- [10] Huan S., Nelson R.M.: *A PID-Law-Combining Fuzzy Controller for HVAC Applications*. ASHRAE Transactions, 97/2. (1991) 768–774.