



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Irányítástechnika és Informatika Tanszék

iContrALL

Korszerű fűtési rendszerek szabályozása

SZAKDOLGOZAT

Készítette
Gyulai László

Belső konzulens
dr. Kiss Bálint

Külső konzulens
Kurbucz Máté

2018. december 3.

Tartalomjegyzék

| | |
|---|-----------|
| 1. Bevezetés | 2 |
| 2. Helyiség modellje | 4 |
| 2.1. A modellalkotás folyamata | 4 |
| 2.2. Termikus modell | 5 |
| 2.3. Épületfizikai alapösszefüggések | 7 |
| 2.4. A megvalósított modell | 9 |
| 2.5. A modell | 10 |
| 2.6. Fűtési rendszer és ház kapcsolata | 11 |
| 3. Fűtőtestek modellje | 13 |
| 3.1. Állandósult állapotbeli hőleadás | 13 |
| 3.1.1. Hőleadás alapegyenletei | 14 |
| 3.1.2. Hőfelvétel alapegyenletei | 15 |
| 3.1.3. Energiamérleg állandósult állapotban | 15 |
| 3.2. Hőátadás tranziensének modellje | 17 |
| 3.2.1. Hőkapacitás | 17 |
| 3.2.2. Sugárzó és konvektív teljesítmény szétválasztása | 17 |
| 3.3. Radiátor modellje | 18 |
| 3.3.1. Paraméterek | 19 |
| 3.3.2. A modell validálása | 19 |
| 3.4. Padlófűtés modellje | 20 |
| 4. Identifikáció | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 5. Szabályzó kiválasztása és analízise | 28 |
| 5.1. Ismerkedés az MPC szabályzással | 29 |
| 5.1.1. Elvárások a szabályzás teljesítményével szemben | 29 |
| 5.1.2. A MATLAB MPC Toolbox elemei | 30 |
| 5.1.3. A létrehozott MPC tulajdonságai | 31 |
| 5.2. A szabályzó paramétereinek finomítása, hangolása, alapbeállítások fe- lülírása | 32 |
| 5.2.1. Az MPC költségfüggvénye | 32 |
| 5.2.2. Fejlesztési lehetőségek a szabályzással kapcsolatban | 34 |
| 5.2.3. Validálás | 34 |
| 6. Tesztek laborkörülmények között | 35 |
| 6.1. A Simulink konfigurálása | 35 |
| 7. Gyakorlati megvalósítás lehetőségei | 37 |
| 7.1. Technikai feltételek | 37 |
| 7.2. Piaci lehetőségek | 37 |
| 8. További teendők, finomítások, lehetőségek | 39 |
| 9. Összefoglalás | 40 |

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott *Gyulai László*, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Budapest, 2018. december 3.

Gyulai László
hallgató

Kivonat

A szakdolgozatban fűtési rendszerek modell-prediktív szabályzásának lehetőségeit vizsgálom Matlab Simulinkben. Végighaladok az MPC tervezés lépésein, a tervezést és a validálást is szimulált szakaszmodellen végzem. A szakaszmodellt egy helyiség és annak fűtési rendszere alkotja, a fűtés hője a helyiségből külső homlokzaton távozik a környezet felé. Az állandósult állapotban szükséges fűtési teljesítményt képlettel számítom, ebből kapható a beavatkozó jel egy adott teljesítményigényhez. A hőkapacitásokat és hőátadási, hővezetési tényezőket Simscape modell tartalmazza, meghatározva a szakasz dinamikáját. Megvizsgálom az MPC predikciós horizontjának, költségfüggvényének illetve mintavételi idejének hatását a zárt szabályzási kör viselkedésére.

A tervezési lépéseket ezután valós, fizikai modellen is elvégzem, így látható lesz, hogy egy kész házra, vagy annak egy részére mennyi munkával jár a szabályzó beállítása. Ha a modellezésre, hangolásra fordított idő megtérül, azaz komfortnövekedéssel, illetve az üzemeltetési költségek csökkenésével jár, akkor az iContrALL intelligens otthon rendszerbe is beilleszthetők lesznek az új funkciók.

1. fejezet

Bevezetés

Az Európai Unió energiafogyasztásának 40%-át az épületek adják, a szén-dioxid-kibocsátás 36%-áért felelősek. Az energiahatékonyság növelése kiemelten fontos: a korszerűbb közintézmények, munkahelyek, lakóingatlanok olcsóbban fenntarthatók és alacsonyabb károsanyag-kibocsátás mellett az emberek életminőségét is javítják.

Az új épületekre egyre szigorodó követelmények vonatkoznak¹. A törvények előírják energetikai tanúsítvány készítését szerte az Unióban, ami ellenőrzi az épület megfelelőségét energetikai szempontból. Azok a legújabb építésű, fenntartható irodaházak, amelyek LEED, illetve WELL minősítést kapnak, az emberek egészségének és jó közérzetének fenntartását is segítik².

Ilyen fejlett technológiákat felvonultató épületekben nagy szerepet játszanak az épületgépészeti rendszerek³, a 7/2006. TNM rendelet [2] is megfogalmaz szabályokat és ajánlásokat ezzel kapcsolatban. Eszerint “új fűtési rendszer létesítésekor és meglévő fűtési rendszer korszerűsítésekor a helyiségenkénti hőmérséklet-szabályozást javasolt megvalósítani gazdaságossági számítás⁴ alapján”.

Munkámban szeretnék megvalósítani egy helyiségenkénti hőmérséklet-szabályozást, ezen keresztül pedig megmutatni a különböző fűtési típusok viselkedését egy helyiségen belül.

¹2021-ben használatba vett ingatlanoknak már teljesíteniük kell a közel nulla energiaigényű épületekre [1] vonatkozó szabályokat.

²A LEED egy komplex minősítési rendszer, a szakdolgozat tematikájához az *Energia és légkör* kategóriája tartozik leginkább. Bővebben: <https://www.terc.hu/tudastar/leed>
A WELL hét szempont alapján értékeli - víz, egészséges táplálkozás, természetes fény, testmozgás, kényelem és szellemi frissesség – és ezek technikai feltételeire tesz javaslatokat.

³Épületgépészeti rendszer a [2] rendelet szerint a HVAC (heating, ventilation, and air conditioning), a melegvíz-ellátásra és világításra szolgáló berendezések összessége.

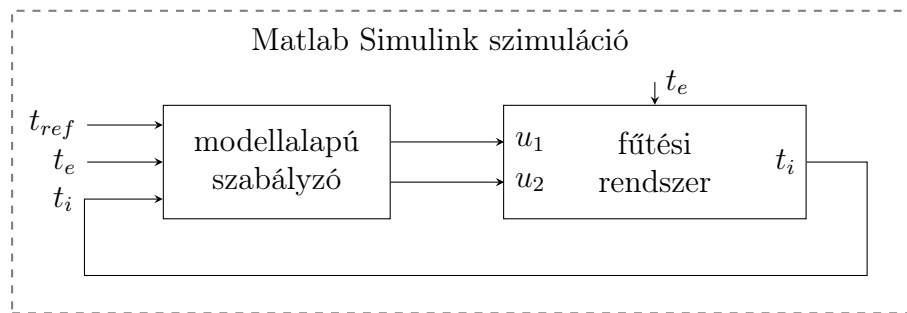
⁴A gazdaságossági számítás egy teljes élettartamra vonatkozó minimumköltséget céloz meg.

A modell típusa, hatóköre

A szabályozáshoz a klasszikus elképzelések szerint ismerjük a szabályzott szakasz viselkedését, ellenkező esetben identifikálnunk kell azt. Ismert hálózatokra felírható gerjesztés-válasz kapcsolat, például átviteli függvények formájában.

A szabályozott szakasz első lépésben egy szimulált hálózat⁵, emiatt fizikai modell felírása mellett döntöttem. A 2-3. fejezetekben felállítom egy helyiség és a hozzá tartozó fűtőtestek modelljét, ami a 4.1. ábrán látható módon, a Matlab-ban fut.

A szabályzás a helyiség hőveszteségét egyenlíti ki, amit az alacsonyabb külső hőmérséklet (t_e) okoz. A külső falon és az ablakon hő távozik, amelyet radiátoros és padlófűtéssel egyenlíthetünk ki.



1.1. ábra. A szimuláció felépítése

A szabályozás folyamata, szabályzótervezés

A szabályzó a modell alapján olyan szelepekkel képes beavatkozni, melyekkel a fűtőtestbe beáramló vízmennyiség korlátozható. A szelepek (u_1, u_2) állását folytonosan tudom változtatni. A modell bemenetei a szelepek állásai és a külső hőmérséklet, kimenete a belső hőmérséklet (t_i). A belső és külső hőmérsékletet mérem, ez alapján történik a szabályzás. A tervezés lépései a 4-5. fejezetben olvashatóak.

Eredmények gyakorlati kipróbálása, további lehetőségek

A szabályzótervezés lépéseit egy fizikai rendszerre is elvégzem, hogy további tapasztalatokat szerezzek. Végül áttekintem, hogy a szabályzás használatának milyen gyakorlati lehetőségei vannak, mind technikai értelemben, mind piacképesség szempontjából. Végül összefoglalom az elért eredményeket.

⁵A szimulációban sokkal könnyebben megfigyelhető az egyes paraméterek hatása, így lépésről lépésre megérthető a rendszer viselkedése.

2. fejezet

Helyiség modellje

A szabályzótervezéshez rendelkezésre kell, hogy álljon a szabályzott szakasz modellje. Ezt két részre bontottam: először az épületszerkezet, azaz a helyiség modelljét írom fel, a fűtőtestekkel a *3. fejezetben* foglalkozom. Egy könnyen módosítható, koncentrált paraméterű hálózatot vettem fel, ahol minden elemhez lehet fizikai tartalmat rendelni. A szabályzótervezéshez a teljes modell gerjesztés-válasz kapcsolatára lesz majd szükségem.

Az energetikai jellemzők az épület energetikai tanúsítványából kiolvashatók, így a modell paraméterezhető. A tervezési lépéseket a névleges modellre elvégezve a szabályzás rögtön működőképes, nincs szükség hosszas kalibrációs időszakra beüzemelésnél. A modellbeli eltéréseket később kompenzálni lehet, mérési adatok felhasználásával.

2.1. A modellalkotás folyamata

A gerjesztés-válasz kapcsolatot megkaphatjuk méréssel, szimulációval vagy egyenletek felírásával. Mindegyik módszernek van előnye és hátránya is: ha a hatásmechanizmusok pontosan ismertek, használhatunk "white-box" modellt, amiben fizikai összefüggések szerepelnek. Ha a hatásmechanizmus nem ismert, fekete dobozként ("black-box") is kezelhetjük a rendszert, de az identifikációhoz nagyon sok mérésre van szükség, hogy a mérési hibákat és zavarásokat kiküszöbölhessük.

Én a fizikai modell felírását választottam, melynek dinamikáját megvizsgálom a szabályzótervezéshez. Megfelelő gerjesztő jelekkel identifikálva előáll a modell átviteli függvénye (*4. fejezet*). Ehhez sokkal egyszerűbb eljutni, mint mérésekkel, mivel a Simulinkben megvalósított hálózatra az identifikáció sokkal egyszerűbb, mint valós

rendszerre. A vizsgálójelek tetszőlegesen megválaszthatók, például a külső hőmérséklet hatása is pontosan meghatározható. A helyiség egy MISO (több bemenetű, egy kimenetű) rendszer, terepi méréseket használva csak hosszas mérésekből lehet szétválasztani a bemenetek (fűtés, külső hőmérséklet, napsütés) hatását a belső hőmérsékletre.

Helyiségenkénti hőmérséklet-szabályzás esetén a belső hőmérsékletre adott egy referencia és egy mért érték. Helyiségenként számos olyan tényező figyelembe vehető, melyek a teljes épületre különbözőek: a helyiség tájolása, az ablakok mérete, a felhasználás módja mind jobban kezelhető *helyben*, mint egy központi irányítással. A helyi szabályozás referenciajeleit a lakók, dolgozók komfortérzetének megfelelően kell megadni.

A helyiség levegőjének hőmérsékletét mindenhol ugyanakkorának (homogénnek) feltételezem. A szabályzás a helyiség hőveszteségét egyenlíti ki, amit az alacsonyabb külső hőmérséklet okoz. Nem foglalkozok például szellőzésből, helyiségek közti hőmérséklet-különbségből¹, vagy emberek jelenlétéből származó belső zavarással.

A fűtést padlófűtés és radiátor biztosítja, mindkettőben szeleppel szabályozható az átfolyó vízmennyiség.

2.2. Termikus modell

A 2.1. ábrán látható egy termikus mintahálózat, mellyel bemutatom a Simscape csomag elemeit, melyből a helyiség modellje is felépíthető.

A források lehetnek fix hőmérsékletű elemek (feszültségforrás) illetve hőáram források (áramforrás). A "vezetékek" így azonos hőmérsékletű (ekvipotenciális) pontokat kötnek össze, ezekre hőmérsékletmérőket helyezhetünk. A különböző elemekkel sorba kapcsolva helyezhetők el hőáramlást mérő blokkok.

A hőáramlást a hőellenállások korlátozzák, mivel azokon hőmérsékletesés mérhető. (Az ábrán mért hőáram a hőellenálláson eső hőmérséklettel arányos, a 2.2. egyenlet szerint.) A hőtároló elemeknek tömege és fajhője megadja a hőkapacitásukat, így ezek feltöltődhetnek, energiát tárolhatnak.

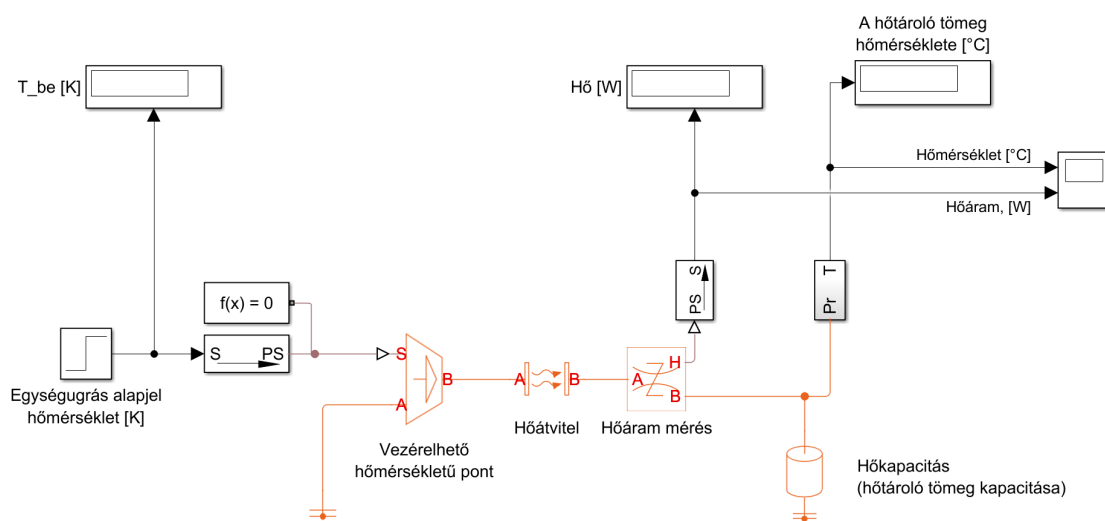
A mintahálózat egy RC-tagnak felel meg, erre a szabályzótervezés lépései a következők lennének:

Az identifikációnál ismert a rendszer jellege, így 0 zérussal, 1 pólussal átviteli függvényt identifikálnék. Erre szabályzót lehetne tervezni. A szimuláció során a termikus

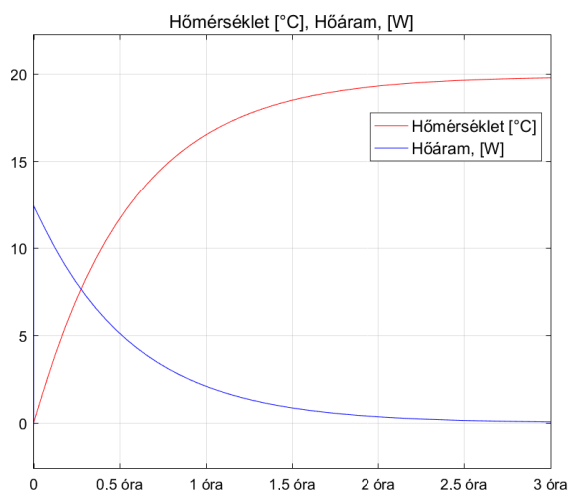
¹A modellezés egyszerűsítése végett több helyiség egymásra hatását nem veszem figyelembe.

hálózat alapjele helyére kerülne a szabályzó beavatkozó jele. A visszacsatolás a hőmérő kimenetéről történne. Ekkor, mivel a tervezés során használt modell és a szakasz között nincs eltérés (angolul *mismatch*), a szabályzás jól működik. A paraméterek módosításával a szabályzó robusztusságát lehet tesztelni.

Ha ez a hálózat egy tényleges fizikai rendszer (például egy vízforraló) modellje lenne, akkor a szabályzás történhetne úgy, hogy a szabályzó egy beágyazott számítógépen fut, majd a teljesítményelektronikán keresztül a kívánt teljesítményt szolgáltatja, hogy például azonos hőmérsékleten tartsa benne a teát.



(a) Simscape termikus modell



(b) Modell ugrásválasza

2.1. ábra. Transziens (instacioner) hőtranszfer modellezése

2.3. Épületfizikai alapösszefüggések

A fizikai modell felírásához szükség van néhány alapösszefüggésre.

Hőátbocsátási tényező számítása

A hőátadási tényező a levegő és egy felület közötti hőátadást mutatja meg, a rétegenderi hőátbocsátási tényező pedig számba veszi az összes réteg hatását: fal esetén annak két oldalán található levegő hőmérséklet-különbségével arányos hőáramot adja meg.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (2.1)$$

Hővezetés, hőáramlás, hőszugárzás

A hőátadásnak három fajtája van, ezek

$$q = U \Delta t = \frac{\Delta t}{R} \quad (2.2)$$

Ahol

q a hőáram [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]

Δt a hőmérséklet-különbség (a potenciálkülönbség analógiájára)

U a hővezetési tényező [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$], reciproka az R hővezetési ellenállás.

A külső falon a hőáramsűrűség:

$$q = U_{fal} \Delta t = \alpha_i (t_i - t_{i,fal}) \quad (2.3)$$

Az U hőátbocsátási tényező szerepe tehát az, hogy a rétegek hatását együttesen kezelhessük. A 2.3 táblázatban szerepel mindkét féle hőátadási tényező.

2.1. táblázat. *Hőközlés fajtái*

| | együtthatója | a hőátadás szereplői | példa |
|-----------|--------------|--|--------------------------|
| konvektív | λ | áramló közeg – szilárd anyag felülete | levegő vagy víz áramlása |
| konduktív | h_c | az anyag molekulái között | az anyag belsejében |
| radiatív | h_r | tárgyak között, felszínükkel arányosan | hősugárzás |

Hőtároló képesség

Falszerkezeteknél annak hőtároló képessége adja meg, hogy 1 °C-os hőmérséklet-változás esetén mennyivel változik a szerkezet energiája.

Az *EN ISO 13790* szerint az épület hőtároló tömege az épület belső levegőjével közvetlen kapcsolatban lévő határolószerkezetek hőtároló tömegének összege.

$$M = \rho d A \tag{2.4}$$

$$\Delta Q = c M \Delta t$$

Ebben az esetben eltérnek a szabványban használt módszerektől. Az *MSZ 24140* megadja, hogy egyes anyagoknál mekkora réteget kell figyelembe venni egy napos ciklusidejű hőtárolásra. Ez azért nem pontos, mert több napos átmelegedési idővel nem számol. Az energetikai tanúsítványok azonban tartalmazzák a teljes tömeget és a szabvány szerinti hőtároló tömeget is. A modellben a teljes tömeg szerepel.

2.2. táblázat. Jelölések

| | | |
|-------------------|---|-------------------|
| Q | hő | J |
| \dot{Q}_{total} | hőáram | $W = \frac{J}{s}$ |
| A | felszín | $\frac{W}{m^2}$ |
| U | réteges szerkezet hőátbocsátási tényezője | $\frac{W}{m^2 K}$ |
| q_{total} | teljes hőáramsűrűség | $\frac{W}{m^2}$ |
| h_{total} | teljes hőcsere együttható | $\frac{W}{m^2 K}$ |
| h_r | radiatív hőátadási tényező | $\frac{W}{m^2 K}$ |
| h_c, α | konvektív hőátadási tényező | $\frac{W}{m^2 K}$ |
| λ | konduktív hőátadási tényező | $\frac{W}{m^2 K}$ |
| ε | emisszivitás | – |
| t_{ref} | referencia hőmérséklet | $^{\circ}C$ |
| t_i | belső hőmérséklet | $^{\circ}C$ |
| t_e | külső hőmérséklet | $^{\circ}C$ |
| c | fajhő | $\frac{J}{kg K}$ |
| C | hőkapacitás | $\frac{J}{K}$ |
| \dot{m} | tömegáram | $\frac{kg}{s}$ |
| ξ, u_1, u_2 | szelep kinyitásának mértéke [0..1] | % |
| Δt_m | közepes hőmérsékletkülönbség | $^{\circ}C$ |
| t_i | belső hőmérséklet | $^{\circ}C$ |

2.4. A megvalósított modell

Figyelembe kell vennem a ház hőveszteségeit és hőtároló képességét is, a () és () egyenletek alapján, melynek paraméterei a 2.3. táblázatban találhatók. Az alábbi táblázat értékeinek nagy részét ki lehet tölteni a tanúsítványból. Feltételezem, hogy ez rendelkezésre áll, hiszen ennek elkészítésére elég sok esetben szükség van (adásvétel, felújítás, stb.). Az épület éves hőigénye numerikusan is szerepel a tanúsítványban. Itt a fűtési rendszer tulajdonságain kívül a várható napsütéses órák számát és a használati melegvíz előállításának energiaigényét figyelembe veszi².

A Matlab Simscape model és *Lapusan* [3] hőátadásnál a réteges szerkezetekben számolt konvekcióval és konduktióval is. Viszont ezek az adatok egyben is kezelhetők,

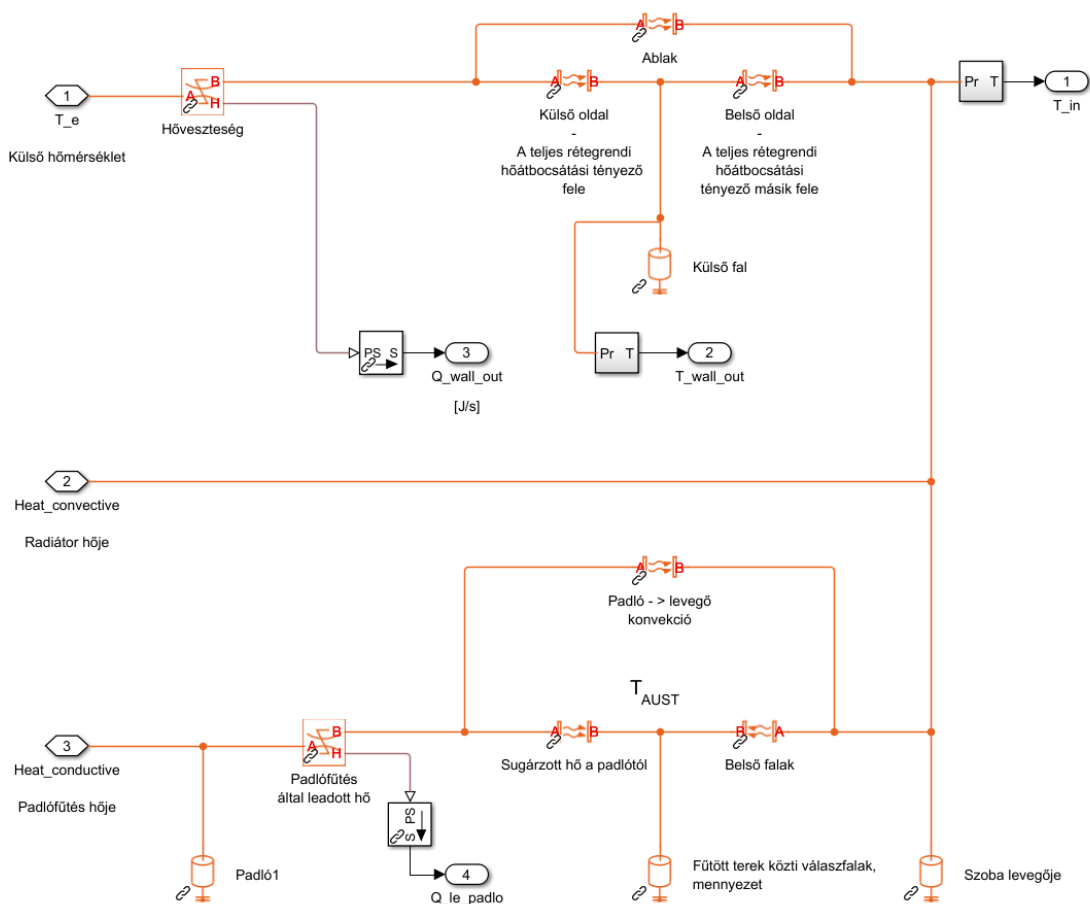
²A hőigény számításához törvényi előírások alapján különböző korrekciós tényezőket használnak.

a követelményeket ezekre a költségoptimalizált követelményszint³ adja meg. Régebbi épületek ezt a szintet nem tudják teljesíteni, ezekre jellemző értékeket adtam meg az alábbi táblázatban.

Ám nem szabad összekeverni az U értéket (rétegrendi hőátbocsátási tényező) és az α_i konvektív hőátadási tényezőt, amit a válaszfalakra, padlóra és mennyezetre adtam meg, hiszen ezeken a modell szerint a helyiség nem vesz hőt, csak a hőtároló elemeknek adódik át.

A példában a Schönherz Zoltán Kollégium egy szobájának megfelelő méretű helyiséget vettem fel. Minden szobának van ablaka és külső fala, egy átlagos szobát 4 másik vesz körül. A belső falakon nem vesz hőt, csak az ablakon ill. a külső falon. Feltetelezzük, hogy a radiátoros fűtést egy szeleppel szabályozhatjuk, amit tetszőleges mértékben nyithatunk ki. A napsütés hőnyereségét is figyelembe vehetjük.

2.5. A modell



2.2. ábra. Helyiség termikus modellje

³ A költségoptimalizált követelményszintek megtalálhatók a 7/2006. rendelet [2] 5. mellékletében.

A helyiség modellje a 2.2. ábrán látható, három bemenete van: külső hőmérséklet, radiátor hője és a padlófűtés hője. A külső hőmérséklet egy “feszültség jellegű” bemenet, hőáramot nem szab meg. A radiátor “áram jellegű” kimenetet ad, hiszen itt a képlet a leadott hőt számítja: a radiátor konduktív hőárama közvetlenül a levegőt melegíti. A padlófűtés először a padlónak adja át a hőt, utána pedig a levegőnek (konduktív hőátadás), illetve a falaknak (sugárzó, radiatív hőátadás).

A levegőnek, padlónak, falaknak tömegüknél és fajhőjüknel fogva mind-mind van egy hőtároló képességük (2.3. táblázat), egy bizonyos idő alatt tudnak feltöltődni vagy hőenergiájukat leadni: hőmérsékletük nem változhat ugrásszerűen.

2.3. táblázat. *A helyiség hőveszteséget okozó elemei*

| veszteséges elemek | méret | U | hőtároló tömeg | hőkapacitás |
|--------------------|--------------------|--|----------------|----------------------------------|
| külső fal | 4.5 m ² | $2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ | 900kg | $756 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$ |
| ablak | 4 m ² | $4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ | - | - |

2.4. táblázat. *A helyiség veszteségmentes elemei*

| csak hőtároló elemek | méret | h_t | hőtároló tömeg | hőkapacitás |
|----------------------|-------------------|---|----------------|----------------------------------|
| belső válaszfalak | 50 m ² | $7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ | 5000kg | $4.2 \frac{\text{MJ}}{\text{K}}$ |
| padló | 16 m ² | $11 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ | 3200kg | $2.7 \frac{\text{MJ}}{\text{K}}$ |
| mennyezet | 16 m ² | $5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ | 3200kg | $2.7 \frac{\text{MJ}}{\text{K}}$ |

Hőigény:

A külső falon

$$Q_{ki,fal} = U_{fal} A_{fal} \Delta T = 200\text{W} \quad (2.5)$$

$$Q_{ki,ablak} = U_{ablak} A_{ablak} \Delta T = 400\text{W}$$

Amennyiben a méretezési hőmérséklet $\Delta T = -2^\circ\text{C}$, ami a téli átlaghőmérséklet Magyarországon.

2.6. Fűtési rendszer és ház kapcsolata

Megjegyzés: Ha a szabályzást egy már meglévő épületre tervezzük, akkor csak a rendszerek adatait kell felvenni, illetve identifikálni. A szakdolgozatban tárgyalt egyszerű példa során csak egy részét ismerem a paramétereknek, tehát méretezési kérdéseket is fogok érinteni. Szerencsére az új építésű házaknál kötelező energetikai tanúsításegyleg meglehetősen részletes lajstromot ad az épület hőtechnikai tulajdonságairól. Ez alapján lehet egy hozzávetőlegesen jó modellünk az épületről, illetve a fűtési rendszerről is találhatók adatok paraméterek.

Az internetre számos tanúsító cég töltött fel minta tanúsítványokat, amiben a számítások levezetése, indoklása is megtalálható. Így az energetikai tanúsítvány lehet egy interface a szakdolgozatban bemutatott modell és a gyakorlati alkalmazások között: a valódi épület tanúsítványa alapján a modellem paraméterezhető.

Amikor a fűtési rendszer viselkedését szimulálom, nekem kell megalkotni mind a szabályzott épületrész, mind a fűtési rendszer modelljét. Így tehát ez a modellezésen felül egy méretezési feladat is, amit egy kész épületnél már elvégeztek a tervezés során, és a megfelelő fűtési teljesítmény áll rendelkezésre.

3. fejezet

Fűtőtestek modellje

A fűtőtestek feladata, hogy az adott szobában teljesítményt szolgáltatassanak, hőt¹ adjanak le. A fűtőtest teljesítményével növeli a környezet hőjét: a levegőnek konvektív hőátadás útján, légáramlással, a környezetnek pedig radiatív hőátadással, azaz hőszugárzással.

Ebben a fejezetben először hőtani alapösszefüggéseket ismertetek, amelyekből előáll majd a fűtőtestek teljesítményét leíró modell. Az állandósult állapotban leadott hő megkapható a beavatkozó jelek és a környezeti jellemzők (mért hőmérsékletek) függvényében (3.7. *egyenlet*). A modell által számolt teljesítményt egy Simscape-ben megvalósított termikus hálózatra vezetem², ami a fűtőtest tranziens viselkedését adja meg.

3.1. Állandósult állapotbeli hőleadás

Szabályzott jellemző: Mivel a vizsgált fűtési rendszerek hője melegvízből származik, a fűtővíz hőmérséklete, illetve a keringető szivattyú tömegárama lehet a hőleadást befolyásoló paraméter³. Az elképzeléssel jobban összhangban áll az utóbbi választása, hiszen szelepekkel elosztottan, szobánként is szabályozható az egyes fűtőtestekbe táplált hőmennyiség: a víz tömegáramát folytonosan tudom szabályozni

¹A hő mértékegysége J, a teljesítményé $[W] = [\frac{J}{s}]$

²A termikus hálózatok alkotóelemei nem ellenállások és kondenzátorok, hanem hővezetési tényezők és határoló elemek.

³A kazánok a víz hőmérsékletét képesek változtatni időjárás függvényében, így az egy külön rendszer része lehet. Nem célom kazánvezérlést írni, az egyszerűség kedvéért feltételezem, hogy a melegvíz például távhő formában rendelkezésre áll.

egy szelep segítségével⁴, a fűtőtestekbe betáplált víz hőmérséklete (úgynevezett előremenő hőmérséklet) állandó.

A fűtőtest hőleadása függ a környezetétől is. A szabályzott jellemzőn felül a modell bemenetéhez tartozik a környezet hőmérséklete, ami a levegő vagy a fűtetlen objektumok hőmérséklete⁵. Ezen bemenő paraméterek és a fizikai tulajdonságok alapján megadható az állandósult állapotbeli teljesítmény. Ennek levezetése ebben a bekezdésben található.

A tranziensek a fűtőtestek fizikai kialakításától függnének. Minél nagyobb tömeget kell átmelegíteni azelőtt, hogy a fűtőtest felszínén a hőleadás megindulna, annál lassabb a beállási ideje az állandósult állapotnak. Kikapcsoláskor a fűtőtest a szelep elzárása után is ad le hőt. A hőtárolási paramétereket könyvekből, publikációkból, gyártói katalógusokból, méréssel, vagy becsléssel határoztam meg. A Simscape-ben minden bloknak olyan fizikai tartalma van, amiben ezek a jellemzők bevihetők, hatásuk megfigyelhető. Ezt a modellt a 3.2. bekezdésben láthatjuk.

Megjegyzés: A méretezési feladatot *Csoknyai* [4, 359. o.] tárgyalja. Ezek alapján vezettem le a leadott hő mennyiségét állandósult állapotra. Természetesen a felmelegedés és lehűlés idejét is figyelembe kell majd venni, de ezzel érthető módon a méretezésnél sem számolnak.

3.1.1. Hőleadás alapegyenletei

A fűtőtestek hőleadása az alábbi alakban írható (*Csoknyai* [4, 358. o.]):

$$\dot{Q}_{le} = h_t A_e (t_{surf} - t_i) \quad (3.1)$$

ahol

\dot{Q}_{le} [W] a leadott hő

h_t [$\frac{W}{m^2 K}$] a teljes hőleadási tényező

A_e [m^2] a radiátor felülete

t_{surf} a fűtőtest felületi hőmérséklete⁶

⁴A 7.1. részben mutatom be a megvalósíthatóság technikai feltételeit, például azt, hogy milyen szelep használatos erre a feladatra.

⁵A hőleadás típusa dönti el, hogy ezek közül melyik mérvadó. Különböző típusú fűtőtesteknél a teljesítmény más-más arányban oszlik meg konvektív és radiatív hőátadás között.

⁶A felületi hőmérsékletet nem tudjuk közvetlenül mérni, ezért ki kell fejeznünk ismert jellemzőkkel.

$$t_{surf} = \frac{t_w + t_r}{2} - t_{drop} \quad (3.2)$$

ahol °C-ban szerepelnek:

t_i a szoba hőmérséklete

t_w a radiátorba befolyó, t_r az onnan kifolyó víz hőmérséklete, ebből $\frac{t_w+t_r}{2}$ az átlagos vízhőmérséklet

t_{drop} hőmérsékletesés a közepes fűtővízhőmérséklethez képest⁷

3.1.2. Hőfelvétel alapegyenletei

A vízből felvett hő felírható:

$$\dot{Q}_{fel} = c (\xi \dot{m}) \Delta t \quad (3.3)$$

ahol

\dot{Q}_{fel} [W] a vízből felvett hő, ami annak lehűléséből adódik

c [$\frac{J}{kgK}$] a víz fajhője

ξ a szabályzó beavatkozó jele, $\xi \in [0, 1]$ folytonosan változhat 0 és 1 között

\dot{m} [$\frac{kg}{s}$] a víz tömegárama

$\Delta t = t_w - t_r$ [K] a víz lehűlésének mértéke

3.1.3. Energiamérleg állandósult állapotban

Állandósult állapot esetén a leadott hő egyenlő a felvettel, mivel akkor nem történik hőfelhalmozás, hőtárolás. Azaz ekkor a radiátor hőkapacitását nem kell figyelembe vennem.

Beírva a (3.1)-be (3.2)-t:

$$\dot{Q}_{le} = h_t A_e \left(\frac{t_w + t_r}{2} - t_{drop} - t_i \right) = h_t A_e \left(\frac{t_w + (t_w - \Delta t)}{2} - t_{drop} - t_i \right) \quad (3.4)$$

⁷A hőleadás során a fűtőközeg és a fűtőtest felülete közötti konduktív hővezetés miatt hőmérsékletesés lép fel. A padlófűtésnél lesz ez különösen releváns, hiszen ott a felület hőmérséklete jóval alacsonyabb, mint a be- és kimenő vízhőmérsékletek átlaga: hiába fűtünk 40 °C-os vízzel, a padló kb. 25 °C-os lesz.

Ahol felhasználtuk azt is, hogy $t_r = t_w - \Delta t$, majd Δt helyére beírhatjuk a (3.3) átrendezett alakját:

$$\Delta t = \frac{\dot{Q}_{fel}}{c \xi \dot{m}} \quad (3.5)$$

Beírva (3.4)-ba (3.5)-t:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{le} &= h_t A_e \left(t_w - \frac{\dot{Q}_{fel}}{2 c \xi \dot{m}} - t_{drop} - t_i \right) \\ \dot{Q}_{le} + \frac{h_t A_e \dot{Q}_{fel}}{2 c \xi \dot{m}} &= h_t A_e (t_w - t_{drop} - t_i) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$2 c \xi \dot{m} \dot{Q}_{le} + h_t A_e \dot{Q}_{fel} = h_t A_e 2 c \xi \dot{m} (t_w - t_{drop} - t_i)$$

Csak abban az esetben, ha $\dot{Q}_{le} = \dot{Q}_{fel}$:

$$\begin{aligned} \dot{Q}(2 c \xi \dot{m} + h_t A_e) &= 2 h_t A_e c \xi \dot{m} (t_w - t_{drop} - t_i) \\ \dot{Q} &= \frac{2 c \xi \dot{m} h_t A_e}{2 c \xi \dot{m} + h_t A_e} (t_w - t_{drop} - t_i) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ez adja meg a fűtési rendszer által szolgáltatott teljesítményt állandósult állapotban. A fenti képletben a hőleadási tényezőt hőmérsékletfüggőnek is lehet venni, *Cholewa* [5] mérései alapján.

Állandósult állapotra a szükséges beavatkozási jel adott kimenő teljesítményhez: 3.7 egyenletet kell ξ -re rendezni, ami a beavatkozó jel.

Mivel a hőleadást, hőtárolást Simscape-ben valósítottam meg, a radiátorba bemenő hőt kell csak kiszámítani. Erre meg kell vizsgálni, hogy az állandósult állapotbeli képlet helyes-e.

Megjegyzés: A radiátorba bekerülő teljesítményt a $t_w - t_r$ szabja meg (3.3. egyenlet), viszont itt t_r -t kiejtettem az egyenletekből. Viszont a *REHVA Guidebook* [6] szerint a $\Delta t = t_w - t_r$ -re szabályozással megtakarítás érhető el. Meg kell vizsgálni, reális-e mindkét paraméter mérése, radiátorok esetén, vagy csak padlófűtésnél.

3.2. Hőátadás tranziensének modellje

A különböző hőtároló elemek feltöltődése szimulálva adja a dinamikus viselkedést.

3.2.1. Hőkapacitás

Katalógusból radiátorok tömege és a bennük lévő víz térfogata leolvasható. A hőkapacitás számítása:

$$Q = c_m m_m \Delta t_k + c_w m_w \Delta t_k \quad (3.8)$$

Ahol m a material, azaz a fűtőtest anyagára utal, w pedig a víz mennyiségére. A hőmennyiség joule-ban adott.

3.2.2. Sugárzó és konvektív teljesítmény szétválasztása

A *REHVA Guidebook* [6] címében is szerepel az *alacsony hőmérsékletű fűtés* fogalma. Ez nem paradoxon, csupán azt jelenti, hogy a fűtőfelületek hőmérséklete az átlagosnál alacsonyabb. A levegőnél csak néhány fokkal magasabb hőmérsékletű fűtési rendszerekben pedig alacsonyabb lehet az előremenő vízhőmérséklet. Megújuló energiát használó rendszerekre ez előnyösebb, mint a régi, széntüzelésű kazánok által előállított 80–90 °C-os előremenő vízhőmérséklet.

A kis hőmérsékletkülönbség következménye, hogy a levegőnek csak kevés hőt képes leadni a rendszer. Nagyobb részt sugárzással működnek ezek a rendszerek, melyet a fűtetlen felületek nyelnek el. Ezért sugárzó (radiatív) hőátvitel esetén szokásos a t_{AUST} jelölés, ami a fűtetlen felületek hőmérsékletét jelenti⁸.

A sugárzási hőtranszfer alapegyenletét a Stefan-Boltzmann törvény adja

$$\dot{Q}_r = \sigma T_{surf}^4 \quad (3.9)$$

ahol

σ a Stefan-Boltzmann állandó [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$]

T_{surf} [K] a termodinamikai, azaz kelvinben mért felületi hőmérséklet.

⁸AUST: Average unheated surface temperature

(*Kilkis* [7]):

$$\begin{aligned}\dot{Q}_r &= U_r A (t_{surf} - t_{AUST}) \\ U_r &= r F \sigma \\ r &= 4 \left(\frac{T_{surf}}{2} + \frac{T_{AUST}}{2} \right)^3\end{aligned}\tag{3.10}$$

ahol

T_{surf}, T_{AUST} [K] a termodinamikai, azaz kelvinben mért hőmérséklet.

c [$\frac{J}{kgK}$] a víz fajhője

A sugárzó hőleadási tényező bevezetésével linearizálhatjuk a hőleadást, a hőleadás így egyszerűen lineárisan függ majd a hőmérséklet-különbségtől. Gyakran összevonják a konvektív és a sugárzási hőátadási tényezőt.

Cholewa [5] a h_r paramétert mérésrel határozta meg. (5) egyenlet.

$$\dot{Q}_r = h_r A (t_{surf} - t_{AUST})\tag{3.11}$$

ahol

\dot{Q}_r [W] a leadott sugárzó hő

h_r [$\frac{W}{m^2K}$] sugárzó hőleadási tényező

A [m²] a padló felülete

t_{surf} [K] padló hőmérséklete

t_{AUST} [K] fűtetlen felületek átlagos hőmérséklete - a fal hőmérsékletének veszem a Simscapeben

3.3. Radiátor modellje

A képletben élhetünk azzal a közelítéssel, hogy $\Delta t_k = \frac{t_w + t_r}{2} - t_i$. Ezzel a következő alakban számolhatunk:

3.7. egyenletben szereplő paraméterek értéke:

3.3.1. Paraméterek

A felmelegedéskor és lehűléskor a pontos hőleadást akkor tudjuk modellezni, ha ismerjük a radiátor hőkapacitását. Ehhez tudnunk kell, hogy a radiátorban mennyi víz van, illetve hogy a radiátortest milyen nehéz. A radiátorokat mindig az adott helyiséghez méretezik, ezért az adatokat leolvasással / katalógusból kapjuk normál esetben. A modellezéshez választanom kellett egy típust. Itt még csak paraméteresen kellene megadni az értékeket, vagy előbb a ház modelljét, hőszükségletét felírni, hiszen a házhoz tervezzük a fűtést és nem fordítva.

Radiátor katalógusokból⁹ azt találtam, hogy az egyes radiátor típusokra ezek a paraméterek milyen értékűek.

| | Komponens | Hőleadás módja | Hőtároló tömeg | Fajhő |
|-------------------|----------------|----------------|------------------------------------|-------|
| Radiátor, h=900mm | Víz | | 8.9l/m | |
| | Fémtest | | 50.1 $\frac{\text{kg}}{\text{m}}$ | |
| Padlófűtés | Víz | | | |
| | Födém | | 840 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ | |
| | Padló burkolat | h_c, h_r | | |

3.1. táblázat. *Fűtőtestek termikus tulajdonságai*

Ismert a radiátor hossza, magassága, konstrukciója. Ez alapján a tömege, illetve az acél hőkapacitása alapján a radiátortest hőkapacitása katalógusadatként szerepel. A szimulációban a Simscape termikus hőtároló elem blokk a víz térfogata

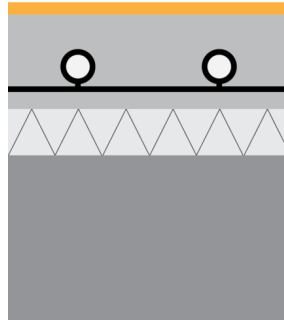
3.3.2. A modell validálása

A 3.3. egyenlet meglehetősen általános. Ha mérjük az előre- és visszamenő víz hőmérséklet-különbségét, a tömegáram függvényében meghatározható a felvett hő.

⁹Purmo Ventil Compact - purmo.com/hu/termekek/lapradiatorok/purmo-ventil-compact.htm

3.4. Padlófűtés modellje

A padlófűtések felépítése az alábbi ábrán található. Egy hőszigetelő rétegre kerülnek a műanyag csövek, bizonyos elrendezésben. Erre híg betont öntenek, hogy az a csövek teljes felületét körbevegye, ne alakuljanak ki zárványok. Ha a beton nem veszi teljesen körbe a fűtőcsöveket, a padlófűtés teljesítménye lecsökken.



3.1. ábra. *Padlófűtés felépítése*

Olesen számításait használtam a méretezéshez. A 18 m^2 alapterületű helyiségben 15 m^2 -nek vettem a fűtött területet. Ebből, és a hőigényből 45 W/m^2 teljesítményigény adódott.

Az előremenő vízhőmérséklet számítása:

Nyilvánvalóan nehéz lenne a felírt modellt egyénileg validálni, főleg hogy sehol sem találkoztam ilyen formában felírt képlettel a szakirodalomban. Szerencsére Cholewa [5] és Koca [8] végzett méréseket falfűtés és mennyezetfűtés esetére. Ezen mérési eredmények paramétereit helyettesítettem be a hőleadás egyenletébe ahhoz hogy eldöntsem, helytálló-e a felírt modell. Az említett publikációkban minden adat rendelkezésre áll. A következő eseteket vizsgáltam:

| Paraméter | Cholewa mérései | | | | |
|---|-----------------|------|------|------|------|
| $T_{water}, ^\circ\text{C}$ | 30 | 30 | 40 | 50 | 55 |
| $\dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right]$ | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| T_{surf} | 25.3 | 26.2 | 32 | 37.4 | 42.4 |
| $T_{a0.6}$ | 22.3 | 23.3 | 26.9 | 30.8 | 34.3 |
| $h_{total0.6} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ | 8.7 | 9.4 | 9.7 | 10.5 | 10.8 |
| $q_{total} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$ | 25.1 | 26.4 | 47.8 | 68.8 | 88.4 |
| $q_{formula} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$ | 24.6 | 26.7 | 46.3 | 64.5 | 85.5 |

3.2. táblázat. A 3.7. képlettel kapott eredmények és a [5] és [8] eredményeinek összevetése

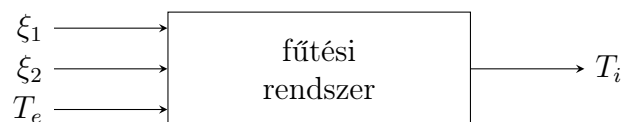
A hőleadás egyenletével számolt és a fent hivatkozott, méréssel kapott eredmények elég jól követik egymást. Padlófűtésnél a padló felületi hőmérséklettel számoltam, ugyanis a padló hőmérséklete jóval alacsonyabb, mint a fűtővíz hőmérséklete. A fenti publikációkban figyelembe vették a hőleadási tényező hőmérsékletfüggését.¹⁰ Azaz a felfutási tranziens során is változik a hőátadási tényező.

¹⁰Intuitívan is belátható, hogy melegebb testnek nagyobb a konvektív hőleadási tényezője. A konvektív hőátadás mértéke nagyban függ attól, hogy a felületen milyen sebességgel áramlik a levegő, hiszen a forró tea gyorsabban hűl, ha fújjuk, illetve szélben a kinti hőmérséklet kisebbnek érződik. Hasonlóan melegebb tárgy esetén a légáramlás felgyorsul, amiatt hogy a melegebb levegő felfelé száll.

4. fejezet

Identifikáció

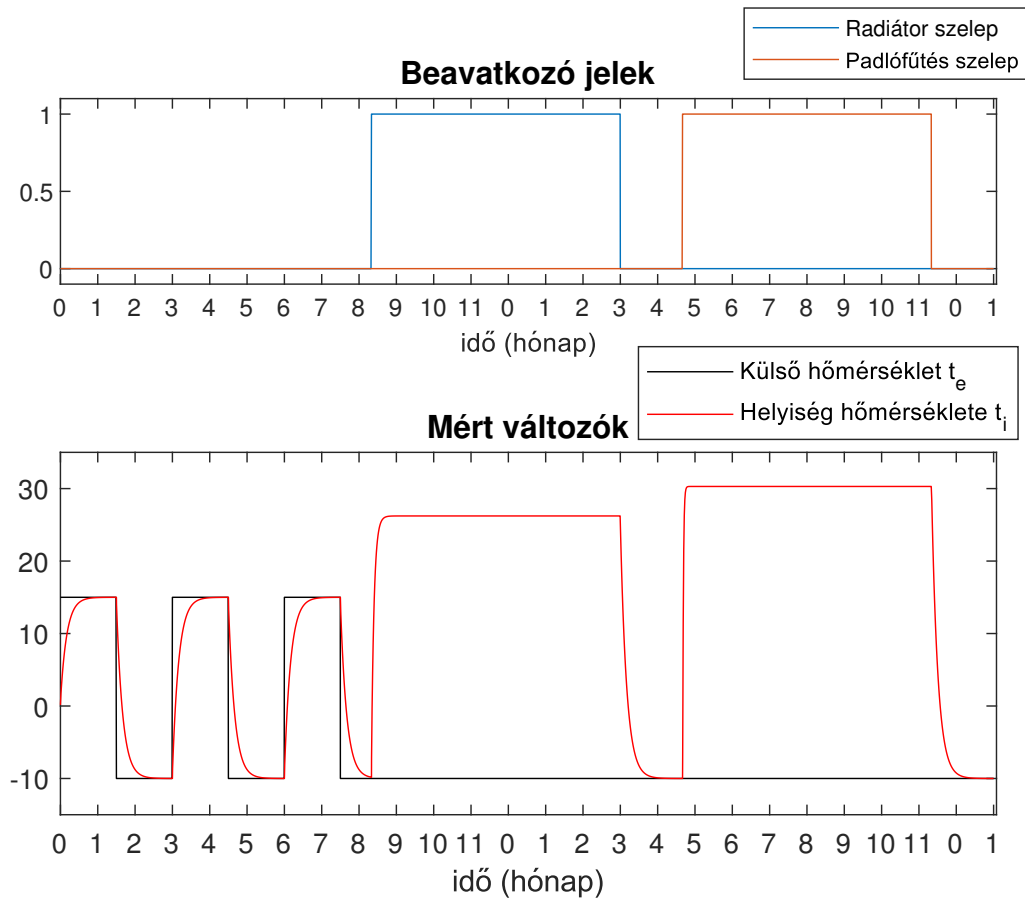
A szabályzó tervezésénél használt szakaszmodell (gerjesztés-válasz kapcsolat) a Simulinkben megvalósított fizikai modell viselkedését leíró rendszer átviteli függvénye lesz. A szabályzótervezéshez lineáris modellt használunk.



4.1. ábra. A szimuláció felépítése

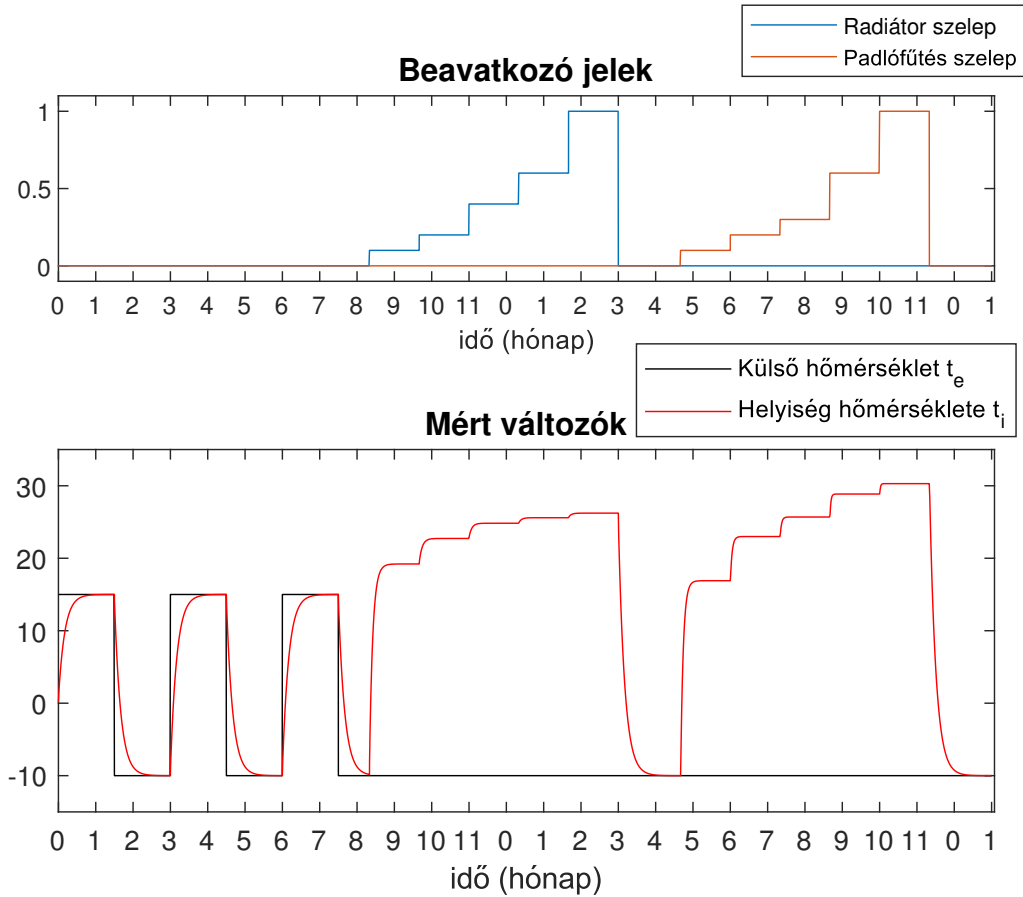
A Simulinkben vizsgálójeleket használunk: a több bemenetű, egy kimenetű rendszert egyszerre csak egy bemenetén gerjesztjük. A tömegáramot szabályzó szelepek nyitott és csukott állapot között folytonosan állíthatók, 0 és 1 közötti beavatkozó jellel. A külső hőmérsékletet a modell kelvinben kapja, kimenete a belső hőmérséklet.

4.1. A szakasz ugrásválasza



4.2. ábra. Szimulációs eredmények a bemeneteket külön-külön gerjesztve

A módszer az, amit a több forrást tartalmazó hálózatok esetén is alkalmazunk: a válasz számításakor mindig egy forrás hatását vizsgáltuk, a többit dezaktivizáltuk: azaz a több bemenetű Simulink hálózatnak egyszerre csak egy bemenetét gerjesztem. Lineáris hálózat vizsgálatoknál a kimeneten a válasz szuperpozícióval adódik.



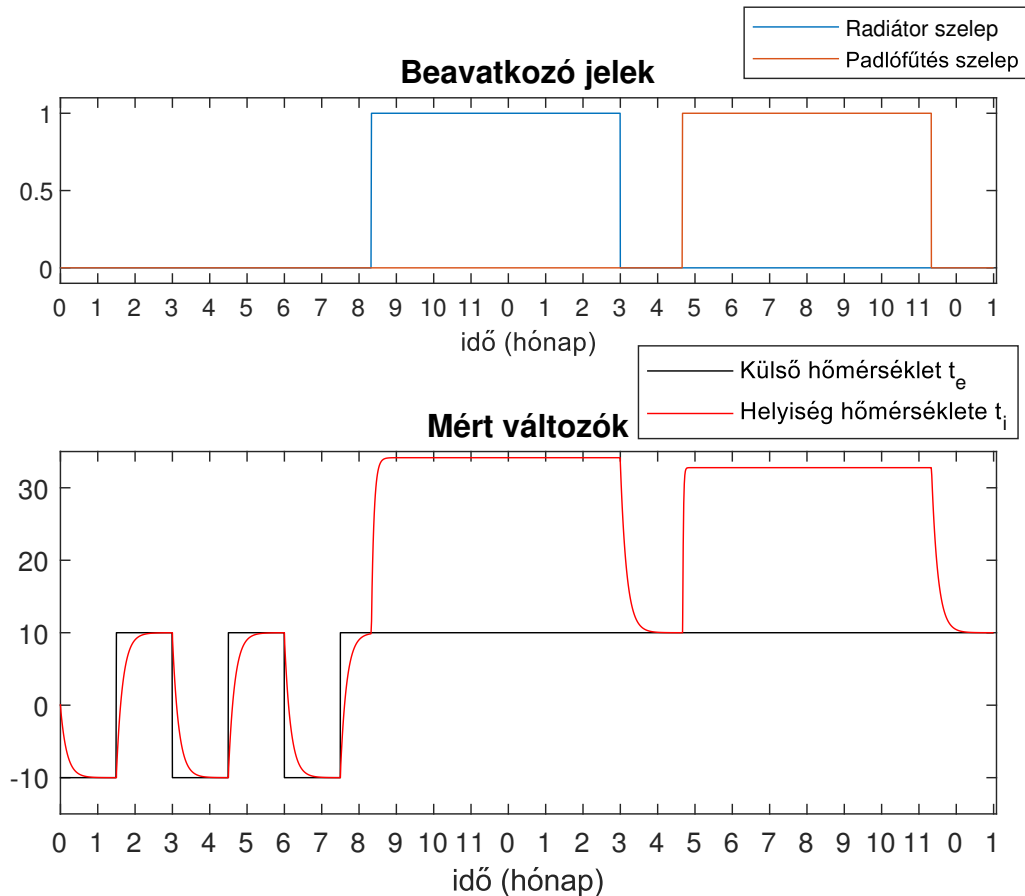
4.3. ábra. Szimulációs eredmények a szelepeket lépcsős függvényekkel gerjesztve

A fűtőtestekben a víz tömegáramát szelepekkel szabályozzuk. Az 3.7. egyenlet adja fűtőtestek által leadott hőmennyiséget, ám ez nem lineáris függvénye a tömegáramnak. A 4.3. ábrán látszik, hogy kétszer jobban kinyitott szeleppel t_i belső hőmérséklet végértéke csak kicsivel lesz magasabb. Itt nem működik tehát a szuperpozíció elve, a bemenet a $[0..1]$ tartományban sem lineáris¹.

A t_i belső hőmérséklet végértéke a tömegáramon kívül a t_e külső hőmérséklettől is függ: ugyanakkora belső hőmérsékletet csak nagyobb tömegárammal, vagy nagyobb t_w előremenő vízhőmérséklettel lehet tartani².

¹A szakasz másik nemlinearitása a szaturáció: a szelepet csak $[0..1]$ tartományban lehet működtetni – a szabályozótervezésnél ezt figyelembe fogom venni.

²Bár a vízhőmérsékletet nem szabályozom, egyes kazánok rendelkeznek külső hőmérővel, így a vízhőmérsékletet megemelve a hidegben a t_i végértéke "automatikusan" azonos maradhat.

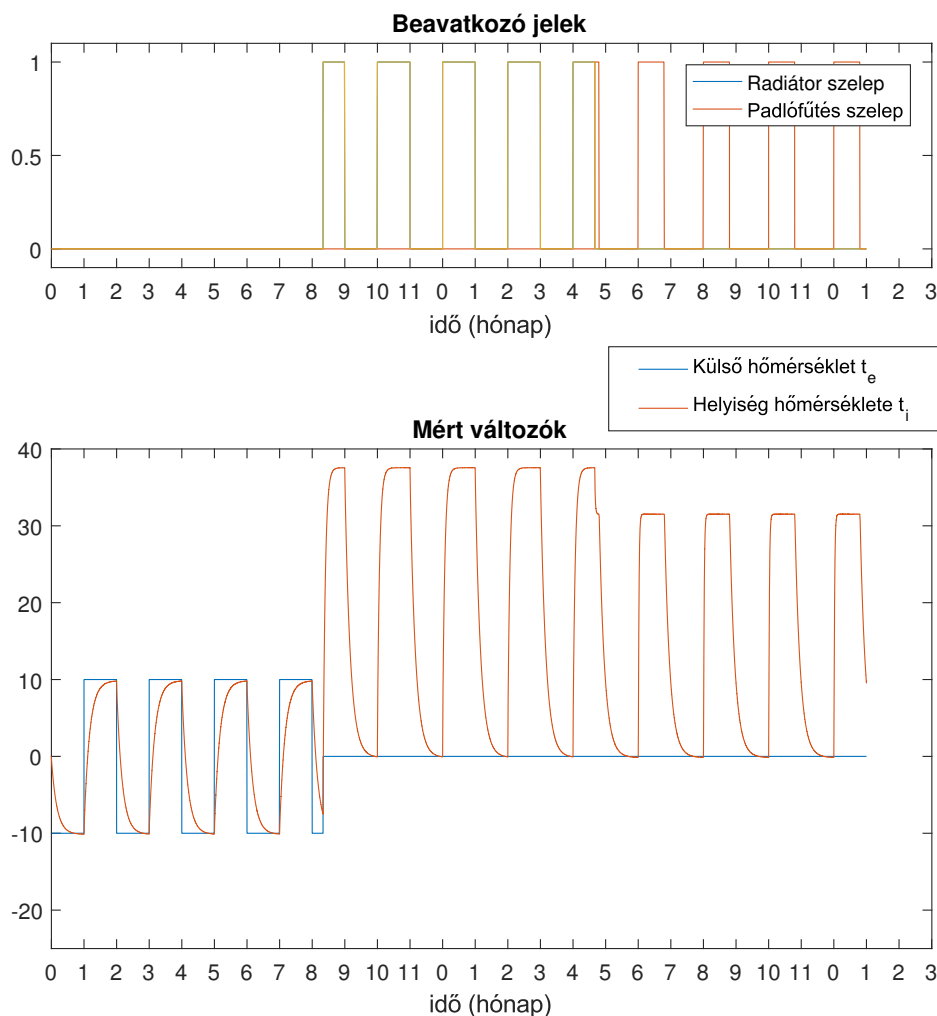


4.4. ábra. Szimulációs eredmények a bemeneteket külön-külön gerjesztve

Látható, hogy a különböző bemenetekre adott gerjesztések hatása a kimeneten nem számítható szuperpozícióval: 20 °C-kal megemelt t_e külső hőmérséklet esetén a fűtőtestek nem fognak 20 °C-kal magasabb belső hőmérsékletre fűteni.

Az identifikációhoz adatfile-t hozok létre, a Simulinkben IDDATA blokk a be- és kimenetek értékét mintavételi időnként rögzíti és a *Base Workspace*-be (a közös változók közé) menti. Innen a *System Identification* app-ba betölthetők az adatok. Az adatsorra átviteli függvényeket illeszttek: a pólusok, zérusok a száma a Simscape modell alapján meghatározható, RC-hálózatok analógiájával. Ekkor pl. a radiátorok felmelegedési idejét is leköveti a modell. A teljes helyiség időállandójához képest viszont pl. a radiátor felmelegedése elhanyagolható. Fél órás mintavételi idő esetén a fűtőtestek egytárolós taggal helyettesíthetők.

Célszerű az identifikációnál minél nagyobb változásokat mérni - így a rendszer teljes dinamikáját, hőtároló képességét mértem. A beállási idők kb. 30 naposak voltak és több periódusnyi mérésre volt szükség.

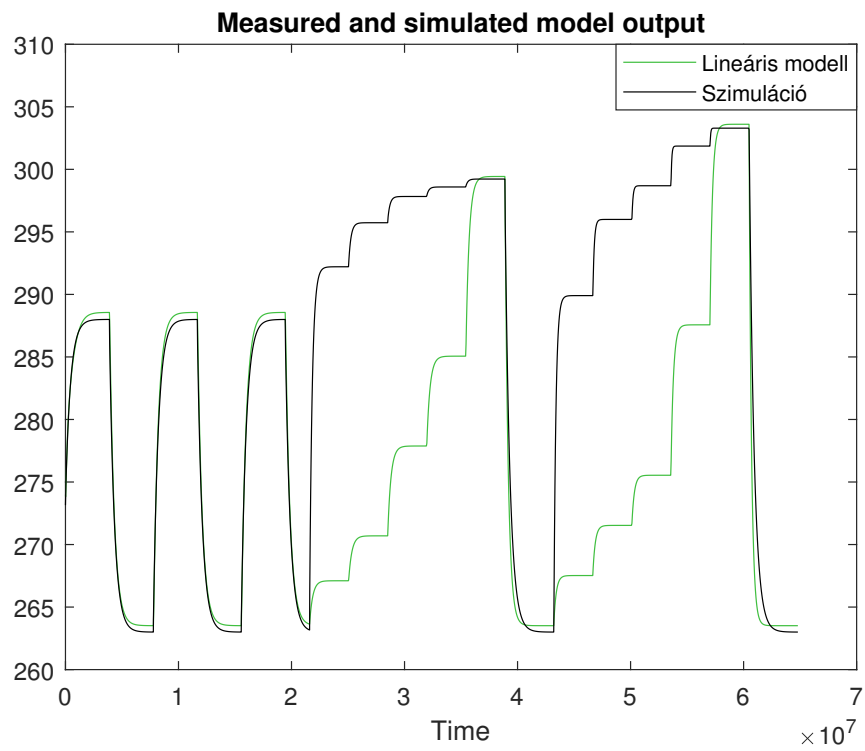


4.5. ábra. *Identifikáció során*

Az identifikáció pontosságának javításához mindhárom bemeneti változó hatását több periódusra rögzítettem, 750 napnyi szimulációval. Ez fél órás mintavételi idő mellett szimulációban kevesebb, mint 1 perc alatt futott le³⁷. Az identifikációhoz a hőmérsékletet kelvinben rögzítem, mivel °C használata esetén az összefüggések nem lineárisak. (A kelvinben mért hőmérsékletet nevezik termodinamikai hőmérsékletnek.) A fenti esetben a beállási idők kb. 30 naposak az egész rendszert tekintve, ami kb. 10 napos időállandót jelent. Szakirodalom szerint a falszerkezetek időállandója kb. 5 nap, a helyiségre így reálisnak tűnik a közelítés.

Átviteli függvény identifikációjához a fenti nemlinearitásokat okozó gerjesztéseket nem vettem figyelembe. Így az átviteli függvény a rendszer jellegét követte, és a 4.4. ábrán látható külső hőmérsékletre és teljesen kinyitott szelepekre a végértékek pontosan illeszkednek.

³⁷7. generációs i5 processzor, 8GB RAM, SSD használatával



4.6. ábra. *Identifikált modell pontatlansága*

5. fejezet

Szabályzó kiválasztása és analízise

A fejezetben a Simulinkben átviteli függvényre megtervezem a szabályzást. A szabályzó választásakor világossá vált, hogy egy egyszerű PID típusú szabályzás nem képes a rendszert jól kezelni. Igaz, hogy a PID közismert és az iparban egyszerűsége miatt széles körben használt, de épületgépészeti alkalmazásnál nem olyan egyértelmű egy szabályzás performanciája. A referenciakövetést például elég egy hibahatáron belül megvalósítani, itt lazábbak a követelmények.

Már a modell identifikációját is bonyolította az egynél több bemenet. Illetve két van kimenetből is. A szabályzásnál különösen nehéz több bemenetű rendszerre tervezni, esetleg a modellek szétválasztásával lehetséges: külön beavatkozójel a

Az identifikált modellekre többféle szabályzót tervezek, illetve próbálok ki.

A hasonló feladatokra leggyakrabban modell-prediktív (MPC) szabályzást használnak [9]. Ehhez szükség van a szakasz modelljére, ami alapján a szabályzó szimulálhatja a szakasz kimenetét. A szimuláció több mintavételi perióduson, egy predikciós horizonton keresztül fut le, minden lehetséges beavatkozójel-sorozatra a kimenetet szimulálva. Ezen sorozatok közül a legjobbat kiválasztja és egy lépést végrehajt. Ezután a szimuláció újratekődik. Az optimális beavatkozójelet egy költségfüggvény minimalizálásával kapja. A költségfüggvényben különböző eltéréseknek vagy abszolútértékeknek különböző súlya lehet.

Egy irodában, vagy lakásban 0.1°C -os vagy 1°C -os pontosságú hőmérsékletszabályzás közötti különbség komfortban aligha érezhető. Ám a követelmények megengedhető mértékű lazítása az energiafogyasztást nagyban lecsökkentheti.

Ha az mpc bloknak van külső ktsg fv. bemenete, használjuk azt. Ebből kössük rá a numerikus képleteket. A teljesítmény integrálját és pillanatértékét, ill. túl gyors változását is lehet büntetni és energetikai szempontokat (kazán hatásfoka, energia ára, napelemmel megtermelt mennyiség, azaz törés az energiaköltségben, ha egy külön blokkban megadjuk ezeket.)

5.1. Ismerkedés az MPC szabályzással

Nomenklatúra

MPC Model Predictive Control

5.1. táblázat. *Az MPC be-és kimenetei a szabályzási körben*

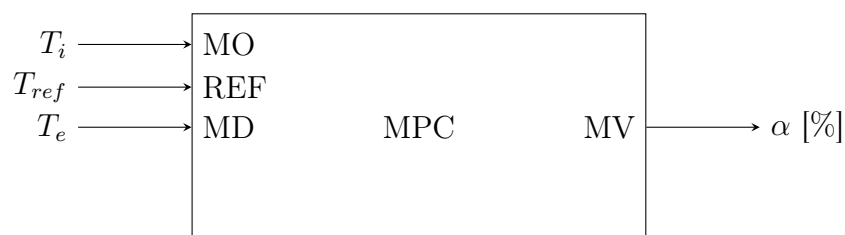
MO Measured output of the plant - a visszacsatolt jel

REF A referenciajel

MD Measured disturbance on plant input (?) - ha a zavarjelet lehet mérni, de beavatkozni azon a bemeneten nem lehet

MV Manipulated variable of the plant - beavatkozó jel

Egyéb MPC paraméterek: mintavételi idő, predikciós horizont, control horizont, súlyozás, soft vagy hard constraintek, cost, optimum (szuboptimum) , stabilítás / garanciák



5.1. ábra. *Az MPC be- és kimenetei*

5.1.1. Elvárások a szabályzás teljesítményével szemben

Az MPC hangolása során lépésről lépésre fogom módosítani az alapértelmezett paramétereket, azok hatását megfigyelem. Az MPC szintézis folyamata:

1. a szakaszt identifikálni kell, az átviteli függvény be- és kimeneteinek típusát be kell állítani,

2. létre kell hozni az MPC-t a megfelelő mintavételi frekvenciával,
3. be kell állítani a jelek fizikai korlátait és súlyukat a szabályzás költségfüggvényében,
4. hozzá kell adni a Simulink modell Model workspace-éhez a szabályzót és megadni a nevét az Explicit MPC blokkjában (az itt található Review funkciót is érdemes használni),
5. be kell kötni a jeleket és le kell futtatni a szimulációt.

A `"setmpcsignals()"` függvény használatával egy új átviteli függvényt hozunk létre, amit az MPC függvénynek odaadhatunk. Ez annyival több az identifikált tf-nél, hogy benne vannak a be- és kimenetek típusai is, aszerint, hogy az említett jelek milyen típusúak. A szakasz átviteli függvényének be- és kimeneteit meg kell nevezni, a típusokat a 5.1 listából választhatjuk ki. Ezután az `"mpc(tf, Ts)"` függvénnyel létrehozhatjuk az MPC szabályzót a megadott szakaszmodellre.

Ezzel még nem kaptunk használható szabályzót, mert az alapértelmezett súlyok és a normalizálatlan bemenetek miatt a legkisebb költségű beavatkozás az, ha egyszerűen nem csinálunk semmit.

A költségfüggvény akkor működik jól, ha a modellbemeneteket 1-re normáljuk. Be kell állítani tehát az MPC mért változó tulajdonságánál a modell kimenetének 1-re skálázását.

Alapértelmezés szerint a költségfüggvény súlyai az alábbiak. A zárt szabályzási körben ezek a súlyok a hibajelet büntették a legjobban, ezért nagyon jó referenciakövetést sikerült elérni.

Követelmények a referenciajelekre:

Thermal comfort - Olesen, ISO EN 7730

Floor temperature - herz-ől is

5.1.2. A MATLAB MPC Toolbox elemei

Az MPC blokknak van egy alapértelmezett költségfüggvénye, és ennek a súlyozását lehet beállítani. Külön beállítható a szabályzási és a szimulációs horizont. Ezek optimális beállításai

A kezdeti MPC szabályzót egyszerűen létre lehet hozni az identifikált modellből és a bemenetek típusának megadásával. (A szelep a beavatkozó jel, illetve a plantnek

van még egy bemenete, egy mérhető zavarás.) Ezután a bemenetek értékkészletét adtam meg, illetve van egy normalizáló faktor, ami a jellemző *full scale*.

Az optimalizálás egy költségfüggvény minimalizálását jelenti, amiben *büntetjük* a referenciajeltől való eltérést és a beavatkozó jelek **értékét vagy változását**.

A fenti a klasszikus MPC, tov. info. Baochang DING, Modern MPC című könyvében olvasható.

5.1.3. A létrehozott MPC tulajdonságai

Még lehetséges:

- környezeti hőmérséklet: predikció / szekvencia használata
- napsugárzás zavaró hatása

Belső változók - fűtési rendszer és ház kapcsolata

- napsugárzás - radiatív, az ablak felületével és a szöggel arányos
- fűtőtestek sugárzó és konvektív hőárama

Paraméterek a plantben nem állandók:

- szellőztetés, belső hőterhelés hatása

A kezdeti szabályzó problémái

Igaz, hogy az alapjelkövetés gyakorlatilag tökéletes volt, de a beavatkozó jelnek a gyakorlatban nem csak a nagysága, hanem a frekvenciája is korlátos. Ezért a beavatkozó szervnek is kell egy átviteli függvény ideális esetben. (Itt most a szelepről van szó.)

A *súlyozatlan* MPC nem vette figyelembe a beavatkozójel változásának *nagy* költségét, ezért irreálisan gyorsan nyitotta és zárta azt. A gyakorlatban nincs szükség tűpontos referenciakövetésre, a hőmérséklet kb. 1 °C-ot ingadozhat. (± 0.5 °C) Ha ezt megengedjük, a beavatkozás költsége lecsökkenhet.

Robosztusság

A Simulinkben identifikált modellre pontosan lehetett átviteli függvényt illeszteni, így a szabályzóban futó modell gyakorlatilag tökéletes volt. Gyakorlatban viszont a modellek igencsak pontatlanok lehettek, így megvizsgáltam a szabályzás viselkedését megváltozott paraméterekkel is. Ezt a szabályzás alapvetően jól viselte, a referenciakövetés minősége megmaradt.

5.2. A szabályzó paramétereinek finomítása, hangolása, alapbeállítások felülírása

A mintavételi időt megnöveltem. A ház identifikációját és az MPC tervezést is 5 perces időállandóval végeztem. A lépéseket először egy unit test részben hajtottam végre.

- A mintavételi idő növelése a Matlab default workspace-ben magával vonja, hogy a Simulink blokkban is módosul a T_s .
- A Simulinkben az időt a jobb alsó sarokban mindig mp-ben írja ki. Ámde ha a steppingnél 1000 step-et állítok be, az a jobb alsó sarokban T_s -sel felskálázva fogja a mp-t mutatni. Azaz 5 perces sampling time esetén 1 step a jobb alsó sarokban $T=300$ mp-nek felel meg.
- A mintavételi idő megválasztása nagyban meghatározza a költségfüggvény értékét.

Módosítások az MPC-ben

A súlyozást módosítva adhatunk költséget a beavatkozásnak, csökkentve így pl. annak a frekvenciáját. Ez a referenciakövetést rontja, de esetünkben nem cél a tized °C-os pontosság, hanem az energiamegtakarítás. Pontosan fel kellene ezért írni a forintosított költségét a beavatkozásnak, és ezt minimalizálni¹

Egyensúlyt kell találni a referenciakövetés és a beavatkozás között. Külön érdekesség, hogy ha nem távfűtést használunk, akkor a kis beavatkozásnak is nagy költsége van. Erre a súlyozásnál egy LUTot lehetne használni. Btw. a hőszivattyúk kis terhelésen is nagy hatásfokkal működnek. Online weight tune elképzelhető, pl. a beavatkozó jeltől függően.

5.2.1. Az MPC költségfüggvénye

Az MPC diszkrét idejű szabályzó. Lépésszámokban gondolkodik. Alapvetése, hogy a optimális beavatkozójelet adjon ki.

A szabályzó a predikciós horizonton belül minden lehetséges beavatkozójel-sorozatra kiszámolja annak (várható, modell szerinti) költségét. Azt a beavatkozójel-sorozatot választja, ami a legkisebb költséggel jár. Eztán a szabályzási horizontnak megfelelő

¹Model predictive control of radiant slab systems with evaporative cooling sources, Fang is szerepet használt, de nem értem az ottani optimalizációs algoritmust.

számú beavatkozást végez, nem adja ki a teljes sorozatot. (Azaz $\text{pred.hor} > \text{control hor.}$)

A legbutább szabályzó control és prediction horizonja is 1. Azaz egy lépéssel lát előre és a legkedvezőbb esethez (J költség minimális) tartozó beavatkozó jelet végrehajtja². $J = w_u u + w_e e$, ahol a hibát a szabályzóban lévő szakaszmodell alapján számítjuk.

$$J = \sum_i^N (w_u \Delta u^2 + w_e (r_i - y_i)^2) \quad (5.1)$$

a 10.1002@9783527609475.ch2-ből. (itt még csak $r_i = r$ állandó referenciajellel tudtam csinálni.)

ahol N a predikciós horizont, w_u a beavatkozó jel változásának súlya, w_e a hibajel súlya

A költségfüggvényben a hibajelhez és beavatkozó jelekhez, ill. azok változásaihoz különböző súlyok tartozhatnak. Nagyobb súlyok nagyobb költséget eredményeznek, így a szabályzó a nagyobb költségű beavatkozójel-sorozatot kisebb valószínűséggel választja.

Nem csak a bemenetek értékei súlyozhatók. Az egyik kinyomtatott doksiban nem csak a bemenetek, vagy a hibajel kap súlyozást, hanem a villamos energia aktuális ára is tényező.

Kell keresni egy suitable költségfüggvényt. Illetve megfontolandó lenne vízhőmérsékletre szabályozni, annak a költsége szemléletesebb.

Súlyozás

A beavatkozó jelek és a szakasz kimenete is súlyozható, hogy azok a költségfüggvénybe mennyire szóljanak bele. A MATLAB lehetőséget ad arra, hogy ezeket a súlyokat működés közben befolyásoljuk. A Simulinkben beállítottam, hogy a radiátor szelepének alacsony kimenetére a szelep súlya 1 legyen, viszont 30%-ban kinyitott szelepre csökkenjen le 0.5-re. Ez nem hozott javulást, ugyanis a nagy súllyal az MPC a predikciós horizonton végrehajtott egy optimalizálást. Ám ha a szelepet kinyitotta, a súlyok megváltoztak, így az optimális költségű beavatkozójel is. Viszont ennek éppen elősegítenie kellett volna a szabályzást, ehelyett összezavarta.

²Ezt formalizálni kellene egyenletben is.

Valójában fordítva kell. Kis amplitúdó esetén NULLA pluszköltség még jobban kinyitni ("Szívesen" növekedjen tovább ha még csak kicsit van nyitva.) Csak ha félig van kinyitva, akkor növeljük a költséget.

Sajnos viszont a fenti költségeket nem lehet (nehéz) megfeleltetni forintosított tételeknek.

Fel kellene írni egy ideális scenario-t és ahhoz igazítani a ktsg-fv-t, hogy annak az esetnek a kialakulása legyen valószínűbb.

5.2.2. Fejlesztési lehetőségek a szabályzással kapcsolatban

Épületautomatikai rendszerek használatával, például a fűtésszabályzás iContrALL intelligens otthon rendszerével a fellépő zavarásokat (emberek jelenléte, napsütés, szél) mérhetjük. A szabályzás a zavarások hatásmechanizmusának ismeretében jobb zavarelnyomást tud elérni, sőt az integrációval további beavatkozók is használhatók (például árnyékolástechnikai eszközök).

5.2.3. Validálás

Szimulációval ellenőrizzük a szabályzás robosztusságát. Ehhez megnöveltem a hőtároló tömegeket.

Ötlet: random időpontban lehetne ablaknyitást szimulálni. Napsütés hatásmechanizmusa. Radiant heat transfer paramétere továbbra sem olyan világos: sok publikációban a hőmérsékletkülönbség lineáris függését tartalmazza és nem a Stefan-Boltzmann törvény szerinti negyedik hatvány szerintit

6. fejezet

Tesztek laborkörülmények között

Az elméleti eredmények validálásához elkészítettük egy szoba kicsinyített modelljét. Ez egy kartondobozban kapott helyet. A doboz hőtároló képessége elég csekély, ezért extra hőtároló tömegeket helyeztünk a A fűtési teljesítményt halogén izzókkal juttattuk a rendszerbe. Ezek fényárama szabályozható, a A szimulációt és a fizikai modellt

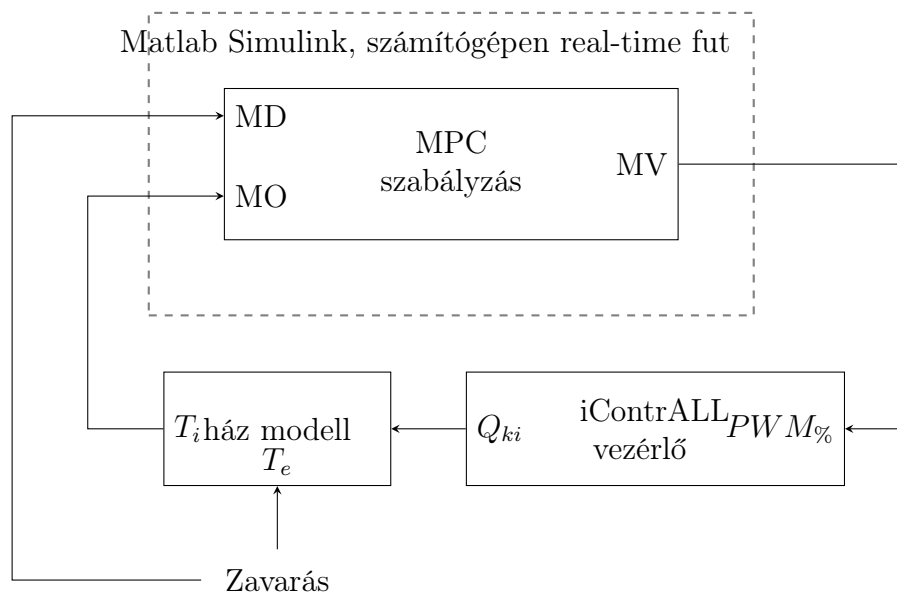
6.1. A Simulink konfigurálása

A real time futáshoz Simulink Real-time szükséges. A real-time itt nem jelent szigorú megkötéseket, csupán azt jelenti, hogy a szimulációt a Simulink nem a lehető leggyorsabban futtatja le az elérhető számítási teljesítményt kihasználva, hanem csak bizonyos mintavételi időnként.

A szabályzó a számítógépen fog futni, és mintavételi időnként a jelenlegi hőmérsékletet beolvassa, az MPC-t lefuttatja, a beavatkozó jeleket pedig elküldi a beágyazott számítógépnek.

3600001117-es ID-jű, Raspberry Pi, IP címe fixen 192.168.0.108, 54321-es port.

A PI SPI-n küld a rádióadónak. Rádiókommunikáció egyirányú.



6.1. ábra. A szimulációban szereplő elemek kapcsolata

7. fejezet

Gyakorlati megvalósítás lehetőségei

A szakdolgozatban vizsgált problémára adott elméleti megoldásnak számos dologi követelménye van, mivel vezérelhető szelepekkel, ismert paraméterekkel dolgozok.

7.1. Technikai feltételek

7.2. Piaci lehetőségek

A következő részben személyes tapasztalatokat mutatok be, amelyek nem tükrözik a teljes piac helyzetét, részben akár a trendekkel ellentétesek is lehetnek. Azzal, hogy betekintést nyertem az építőipar egy szegletébe, jobban el tudtam képzelni, mi a fizikai tartalom a sok technológia mögött, amikkel az irodalomkutatás során találkoztam. Céлом az volt, hogy képet szerezzek az alapvető elképzelésekről, elvárásokról egy HVAC rendszerrel szemben.

Egy nagy hazai kivitelező cég irodáinak látogatásakor figyeltem meg egy irodai környezetet. Arra voltam kíváncsi, adottak-e már a technikai feltételek egy ilyen szabályzás üzembe helyezéséhez, a konkrét irodában például az, hogy nagyobb átépítés nélkül¹, egy kész rendszerre is használható-e egy MPC szabályzás.

A meglátogatott épületben egy BMS (Building Management System) felügyelte a HVAC rendszereket. Ennek a géptermébe nem tudtam bemenni, de megfigyeltem az irodákban, a távhőközpontnál és a légkezelő egységeknél található gépészetet. A

¹Azok a cégek, melyek azért építenek fel irodaházakat, hogy azokat bérbe adják, minél univerzálisabban szeretnék tervezni. Csak a központi magot, a szerkezeteket építik fel, a belsőépítész, a *héj* a bérlő igényei szerint valósul meg. Így előfordulhat, hogy bérlőcserekor átalakítják a bérlemény kinézetét, ekkor viszont alapvető épületgépészeti rendszerekhez nem nyúlunk hozzá.

termosztátok Johnson Controls gyártmányúak voltak. Ez a cég gyártotta még az alkalmazott távhőszelepeket.

Az irodákban a HVAC tervezésébe nagy mértékben beleszólt a nagy belső hőterhelés, ami a zsúfolt irodában megjelenik: a tervezők radiátoros fűtés mellett döntöttek, ezeket Danfoss elektronikus szelepek vezérlik. (Azt nem tudom, hogy ezek kétállásúak-e vagy folytonosan szabályozhatóak, de előbbire gyanakszom.) Szobánként lettek termosztátok elhelyezve. A szellőztetésről és a hűtésről Lindab Professional klímage-rendák gondozkodnak. A BMS feladata, hogy egyszerre a fűtés és a hűtés ne legyen bekapcsolva. Az egész rendszer tervezése - igaz a főépítésszel és nem az épületgépész munkatárssal beszéltem - során a költséghatékonyságra és az alacsony karbantartási költségre törekedtek.

8. fejezet

További teendők, finomítások,
lehetőségek

9. fejezet

Összefoglalás

Irodalomjegyzék

- [1] European Comission. *Nearly zero-energy buildings (Közel nulla energiaigényű épületek követelményszintje.*
ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings/nearly-zero-energy-buildings
www.e-epites.hu/e-tanusitas/az-energetikai-tanusitvany-kiallitasa-2016-tol .
- [2] Magyar joganyagok. 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról. Jogtár. <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A0600007.TNM>.
- [3] Ciprian Lapusan, Radu Balan, Olimpiu Hancu, and Alin Plesa. Development of a multi-room building thermodynamic model using simscape library. *Energy Procedia*, 85:320 – 328, 2016. EENVIRO-YRC 2015 - Bucharest.
- [4] Csoknyai István. *Több, mint hidraulika*. Herz Armatúra Hungária Kft, 2013.
- [5] Tomasz Cholewa, Marian Rosiński, Zenon Spik, Marzenna R. Dudzińska, and Alicja Siuta-Oлча. On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room. *Energy and Buildings*, 66:599 – 606, 2013.
- [6] J. Babiak, B. W. Olesen, and D. Petrás. *REHVA Guidebook no. 7, Low Temperature Heating and High Temperature cooling - Embedded water based surface systems*. rehva - Federation of European Heating and Air-conditioning Associations, 2007.
- [7] Í.B. Kilkis, S.S. Sager, and M. Uludag. A simplified model for radiant heating and cooling panels. *Simulation Practice and Theory*, 2(2):61 – 76, 1994.
- [8] Alihsan Koca, Zafer Gemici, Yalcin Topacoglu, Gursel Cetin, Ruşen Acet, and Baris Kanbur. Experimental investigation of heat transfer coefficients between hydronic radiant heated wall and room. *Energy and Buildings*, 82:211–221, 10 2014.

- [9] Abdul Afram and Farrokh Janabi-Sharifi. Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72:343 – 355, 2014.