



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 7.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. A modell típusa, hatóköre	4
1.2. A szabályozás folyamata, szabályzótervezés	4
1.3. Eredmények gyakorlati kipróbálása, további lehetőségek	4
2. Helyiség modellje	5
2.1. A modellalkotás folyamata	6
2.2. A Simscape termikus elemei	7
2.3. Épületfizikai alapösszefüggések	8
2.4. A megvalósított modell	11
2.5. A modell	12
2.6. Fűtési rendszer és ház kapcsolata	13
3. Fűtőtestek modellje	15
3.1. Állandósult állapotbeli hőleadás numerikus modellje	16
3.1.1. Hőleadás alapegyenletei	16
3.1.2. Hőfelvétel alapegyenletei	17
3.1.3. Energiamérleg állandósult állapotban	17
3.2. Hőátadás tranziensének modellje	19
3.2.1. Hőkapacitás	19
3.2.2. Sugárzó és konvektív teljesítmény szétválasztása	19
3.3. Radiátor modellje	21
3.3.1. A tranziens viselkedés	21
3.4. Padlófűtés modellje	22

4. Identifikáció	24
4.1. A szakasz ugrásválasza	24
4.2. Átviteli függvény illesztése az adatokra	27
5. Szabályzó kiválasztása és analízise	29
5.1. Elvárások a szabályzás teljesítményével szemben	31
5.2. A létrehozott MPC tulajdonságai	31
5.2.1. Módosítások az MPC-ben	32
5.2.2. Az MPC költségfüggvénye	32
5.2.3. Fejlesztési lehetőségek a szabályzással kapcsolatban	33
5.2.4. Validálás	34
6. Tesztek laborkörülmények között	35
6.1. A kísérleti rendszer	35
6.2. A Simulink konfigurálása	35
6.3. Mintavételi idő és predikciós horizont	36
6.4. Szabályozótervezés az identifikált modellre	37
7. Gyakorlati megvalósítás lehetőségei	40
7.1. Technikai feltételek	40
7.2. Piaci lehetőségek	40
8. Összefoglalás	42

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 7.

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. A fűtőtestekben keringő víz tömegáramát arányos szelepekkel lehet korlátozni. Az állandósult állapotban szükséges fűtési teljesítményt képlettel számítom, ebből kapható a beavatkozó jel egy adott teljesítményigényhez. A hőkapacitásokat és hőátadási, hővezetési tényezőket Simscape blokkokkal megvalósított 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 laborkörülmények között egy fizikai modellen is elvégzem, így látható lesz, hogy egy valós rendszerre 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 érdemes lehet beilleszteni ezeket a funkciókat.

Abstract

In my Bachelor's Thesis I inspect the possibilities of MPC control design and validation in Matlab Simulink. I am going step-by-step through the MPC design procedure with simulated plant model. The plant model consists of a room and its heating system with proportional valves to control the water mass flow, thus providing heat for the room. Losses at the facade was taken into consideration (outer walls and window), I assume no heat loss to the neighboring rooms.

The steady-state heat input for the room model is calculated by a formula and then fed to a Simscape thermal network. This network gives the transient response of the room by simulating the charging of the heat capacities, such as air and the mass of the room itself. I design an MPC controller for the identified plant model. In the design procedure I study the impact of different control parameters to the control performance, such as the sampling time of the controller, the prediction and control horizon or the weights of the cost function.

Then, for a real physical system, an MPC controller is also designed. A paper box with some wood and some brick with reasonable heat capacity is studied. The heating mechanism is substituted by car headlights. Designing an MPC controller for this system shows the challenges we facing in real applications, such as computing times, effect of measurement uncertainties and disturbances.

If the time spent for modeling and designing of the controller increases the comfort and/or reduces operating costs, the method can be feasible for real applications and integrated to an intelligent building system.

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.

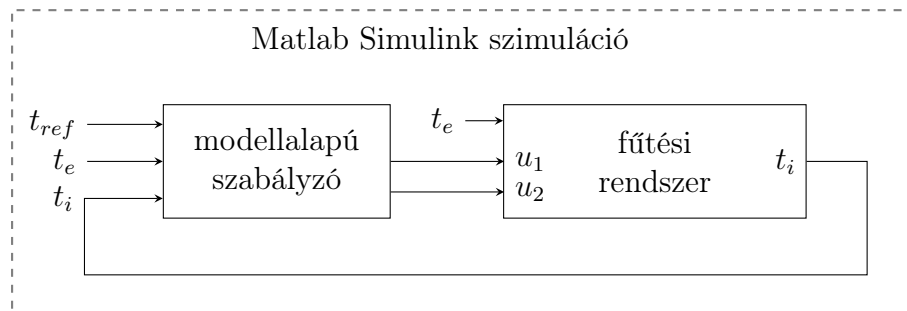
⁴A gazdaságossági számítás egy teljes élettartamra vonatkozó minimumköltséget céloz meg.

1.1. A modell típusa, hatóköre

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

A szabályozott szakasz a fűtési rendszer: ezalatt a helyiséget és az ott elhelyezett, vagy beépített fűtőtestet értem. A fűtési rendszer modellje több helyen és több formában is megjelenik: fizikai rendszerként a *2-3. fejezetekben*, az identifikációkor és szabályzótervezéskor pedig lineáris rendszerrel közelítve. A szabályzó ez alapján a modell alapján fogja a beavatkozó jelet meghatározni.

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

1.2. 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, a szabályzott jellemző a belső hőmérséklet. A tervezés lépései a *4-5. fejezetben* olvashatóak.

1.3. Eredmények gyakorlati kipróbálása, további lehetőségek

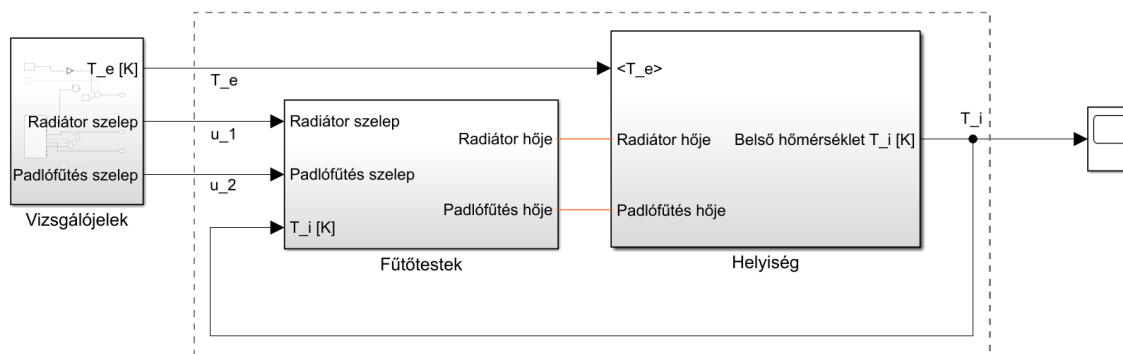
A szabályzótervezés lépéseit egy fizikai rendszerre is elvégzem, hogy további tapasztalatokat szerezzek. Végül áttekintem, hogy a szabályzás használatának milyen gyakorlati lehetőségei vannak, mind technikai értelemben, mind piacképesség szempontjából. Végül összefoglalom az elért eredményeket.

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. A 2.1. ábrán látható a részekre bontott modell¹, melyből a helyiség alrendszerét tárgyalom ebben a fejezetben. 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. ábra. Fűtési rendszer modellje - fűtőtest és helyiség

¹A fűtőtestek teljesítménye függ a belső hőmérséklettől is (lásd 3.7. egyenlet), emiatt a modellben egy belső visszacsatolás található.

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 szabályozótervezéshez. 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 2.1. ábrán látható elrendezésben². A helyiség egy MISO (több bemenetű, egy kimenetű) rendszer, terepi méréseket használva csak hosszas mérésekből lehet szétválasztani a bemenetek (fűtés, külső hőmérséklet és az ezekre ható zavarások) 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. Ezek mind-mind zavarásnak számítanak, ha pedig egy-egy helyiség hőmérsékletét mérjük, a zavarások ellenében ott tudunk beavatkozni, ahol azok hatnak. 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-különbségből³, vagy emberek jelenlétéből származó belső zavarással.

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

²Az átláthatóság kedvéért csak a kimenetet kötöttem rá a scope-ra, de a szimuláció közben az összes bemenetet, illetve belső változók állapotát is nyomon követhetjük.

³A modellezés egyszerűsítése végett több helyiség egymásra hatását nem veszem figyelembe.

2.2. A Simscape termikus elemei

A 2.2. 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 forrásai (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 feltölthetnek, energiát tárolhatnak.

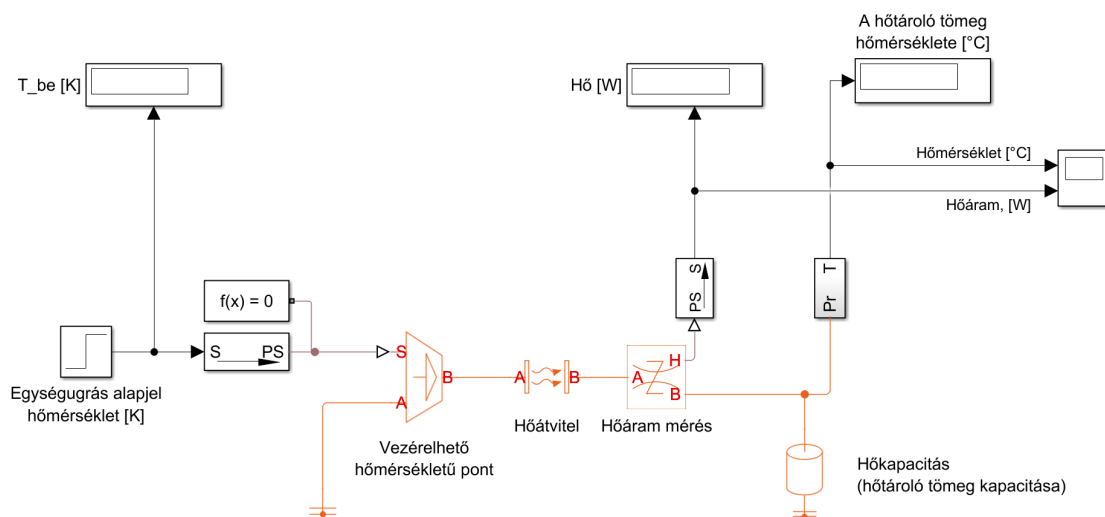
A mintahálózat egy RC-tagnak felel meg, erre a szabályzótervezés lépései a következők lennének⁴:

Az identifikációnál ismert a rendszer jellege, így 0 zérussal, 1 pólussal átviteli függvényt identifikálnék. Erre szabályzót lehetne tervezni. A szimuláció során a termikus hálózat alapjele helyére kerülne a szabályzó beavatkozó jele. A visszacsatolás a hőmérő kimenetéről történne. Ilyen esetben, mivel a tervezés során használt modell és a szakasz között nincs eltérés (angolul *mismatch*), a szabályzás jól működik. A paraméterek módosításával a szabályzó robusztussága tesztelhető.

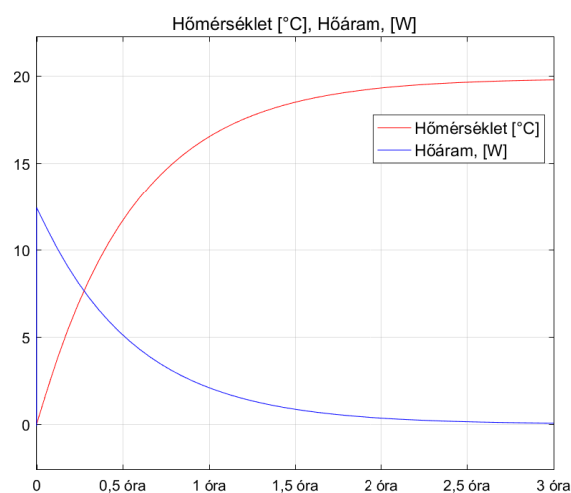
Ha pedig ez a hálózat egy tényleges fizikai rendszer (például egy vízforraló) modellje lenne, akkor a szabályzás történhetne úgy, hogy a szabályzó Matlab-ban fut⁵, a hőmérsékletet mérjük, illetve a teljesítményelektronikán keresztül be tudunk avatkozni, így egy beállított hőmérsékletet tarthatunk.

⁴Tekintsük a mintahálózatot és az itt részletezett lépéseket egy szemléletes példának, ugyanis a szakdolgozatban tárgyalt hálózatra is ezeken a lépéseken fogok végighaladni.

⁵A Matlab C kódot is képes generálni, ez is futtatható arra alkalmas eszközön, a számítógép nem feltétlenül szükséges.



(a) *Simscape termikus modell*



(b) *Modell ugrásválasza*

2.2. ábra. *Tranziens (instacioner) hőtranszfer modellezése*

2.3. Épületfizikai alapösszefüggések

A fizikai modell felírásához szükség van néhány alapösszefüggésre.

Hőátbocsátási tényező

Különböző hőmérsékletű testek közötti energiaátmenetet hőátvitelnek (hőtranszportnak) nevezzük. A magasabb hőmérsékletű test (a termodinamika második főtételének értelmében) átadja hőjének egy részét az alacsonyabb hőmérsékletű testnek. A hőátvitelnek három alapvető formája van, a hővezetés (kondukció), a hőáramlás

(konvekció) és a hősugárzás (radiáció)⁶. a rétegrendi 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, hősugárzás

A hőátadásnak három fajtája van, ezek

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

Ahol

q a hőáram [$\frac{W}{m^2}$]

Δt a hőmérséklet-különbség (a potenciálkülönbség analógiájára)

U a hővezetési tényező [$\frac{W}{m^2 K}$], 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.

⁶A hőátvitel definíciójának forrása: Dr. Fekete Iván, Épületfizika kézikönyv

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

$$M = \rho d A \quad (2.4)$$

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

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 *2.4. egyenlet* 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 veszi⁷.

A Matlab Simscape model és *Lapusan* [3] hőátadásnál a réteges szerkezetekben számolt konvekcióval és kondukciónal is. Viszont ezek az adatok egyben is kezelhetők, a követelményeket ezekre a költségoptimalizált követelményszint⁸ adja meg. Régebbi épületek ezt a szintet nem tudják teljesíteni, ezekre jellemző értékeket adtam meg az alábbi táblázatban.

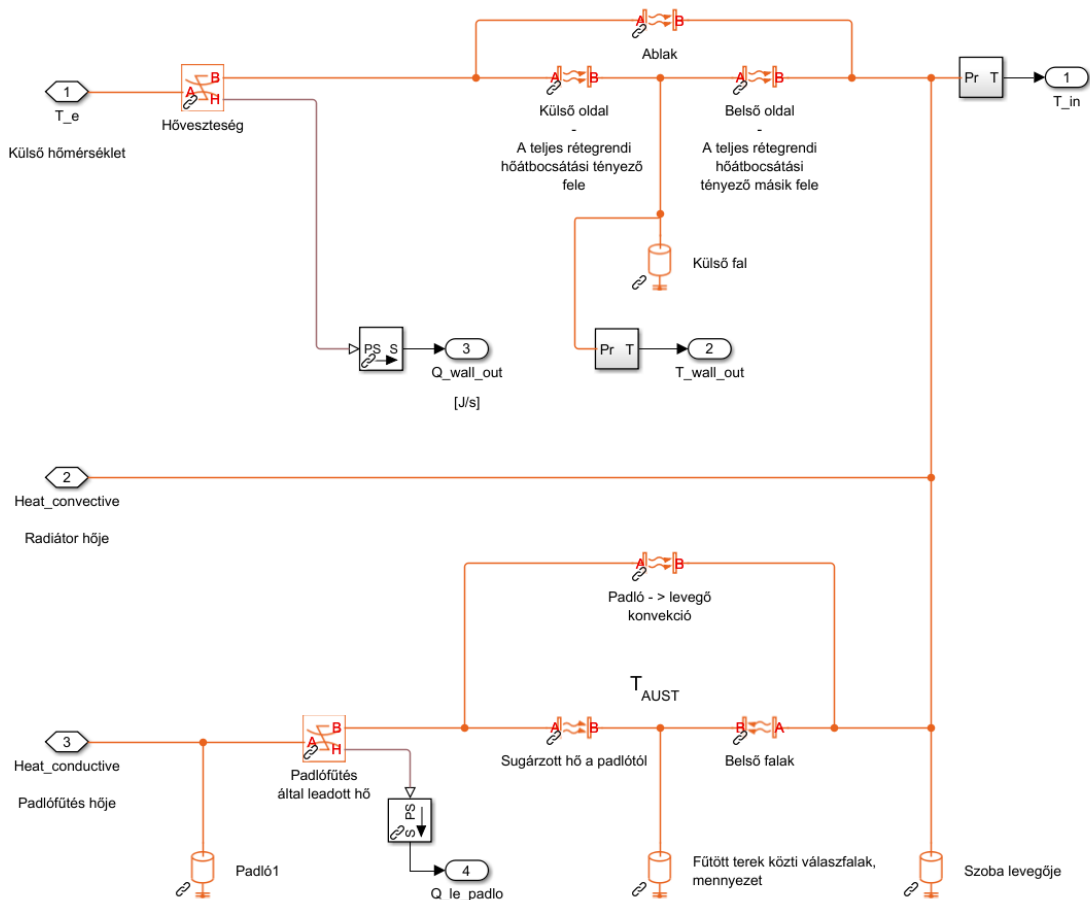
Ám nem szabad összekeverni az U értéket (rétegrendi hőátbocsátási tényező) és az α_i konvektív hőátadási tényezőt, amit a válaszfalakra, padlóra és mennyezetre adtam meg, hiszen ezeken a modell szerint a helyiség nem vesz hőt, csak a hőtároló elemeknek adódik át.

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. Feltételezzük, hogy a radiátoros fűtést egy szeleppel szabályozhatjuk, amit tetszőleges mértékben nyithatunk ki. A napsütés hőnyereségét is figyelembe vehetjük.

⁷ A hőigény számításához törvényi előírások alapján különböző korrekciós tényezőket használnak.

⁸ A költségoptimalizált követelményszintek megtalálhatók a 7/2006. rendelet [2] 5. mellékletében.

2.5. A modell



2.3. ábra. Helyiség termikus modellje

A helyiség modellje a 2.3. 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 fajhőjükénél 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	$2.7 \frac{\text{MJ}}{\text{K}}$

A falak hőtároló tömegénél a teljes válaszfal tömegének csak a felét vettem figyelembe, a másik fele egy másik helyiséghez tartozhat. A fenti értékek becslések, az energetikai tanúsítványban pontosan szerepelnek ezek az értékek is.

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 találhatóak 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.

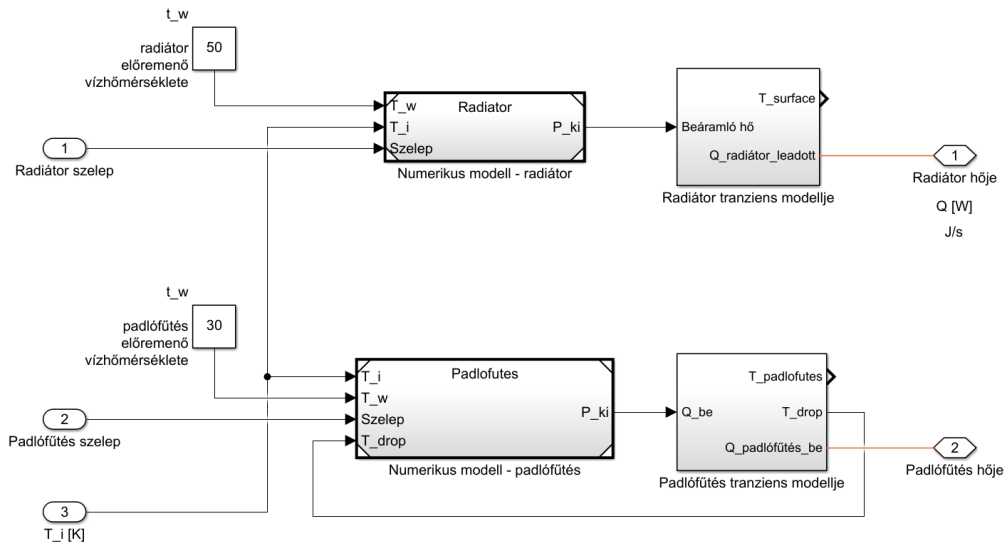
Amikor a fűtési rendszer viselkedését szimulálom, nekem kell megalkotni mind a szabályzott épületrész, mind a fűtési rendszer modelljét. Így tehát ez a modellezésen felül egy méretezési feladat is, amit egy kész épületnél már elvégeztek a tervezés során, és a megfelelő fűtési teljesítmény áll rendelkezésre.

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. Az alábbi ábrán látható ezen rendszerek kapcsolata.



3.1. ábra. Fűtőtestek modellje

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

²A termikus hálózatok alkotóelemeiben a hővezetési tényezők és határoló elemek megfeleltethetők ellenállásoknak és kondenzátoroknak.

3.1. Állandósult állapotbeli hőleadás numerikus modellje

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 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 függenek. 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 nem számolnak.

3.1.1. Hőleadás alapegyenletei

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

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

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.

⁴A 7.1. fejezetben 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.

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

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

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 [$\frac{J}{kg K}$] 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 figye-

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

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.

lembe vennem.

Beírva a (3.1)-be (3.2)-t:

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

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. A Simscape hálózatok és azok paraméterei az egyes fűtőtesteknél találhatók.

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, m_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 víz hőmérséklet. Megújuló energiát használó rendszerekre ez előnyösebb, mint a régi, széntüzelésű kazánok által előállított 80–90 °C-os előremenő víz hőmérséklet.

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.

⁸AUST: Average unheated surface temperature, azaz a fűtetlen felületek átlagos hőmérséklete

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.

(*Kilkis* [7]):

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

ahol

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

c [$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$] 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. Én is így használom fel ezeket a padlófűtés modelljében: a felmelegedett padló sugárzással adja át a hőt a falaknak és a mennyezetnek.

Cholewa [5] a h_r paramétert méréssel határozta meg, amivel ezután az alábbi formában számolható a sugárzó hő mennyisége:

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

ahol

\dot{Q}_r [W] a leadott sugárzó hő

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

A [m^2] 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

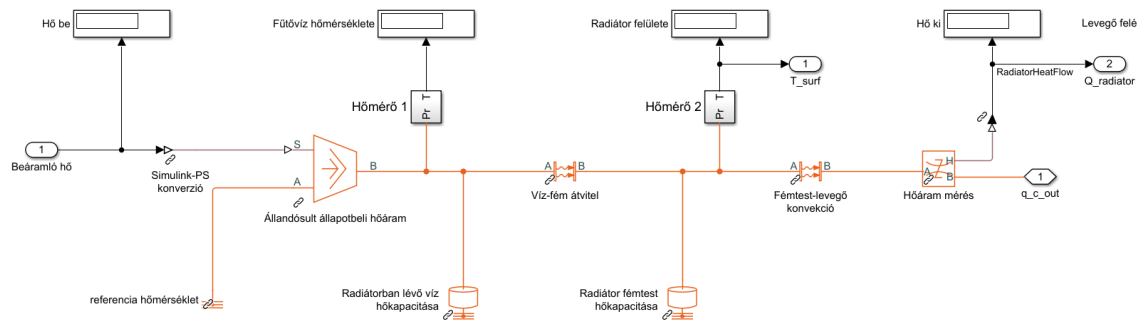
3.7. egyenletben szereplő paraméterek értéke az állandósult állapotbeli hőleadáshoz:

3.1. táblázat. Radiátor adatai állandósult állapotbeli számításokhoz

\dot{m}	maximális tömegáram	0.05 kg/s
h_t	hőátadási tényező	7 W/(m ² K)
A	felszín	4 m ²
t_{drop}	hőmérsékletesés	0 °C

Ahol a $t_{drop}=0$ közelítés azért megengedhető, mert a fémtesten kicsi a hőmérséklet-esés, így az átlagos felületi hőmérséklet közel azonos az átlagos vízhőmérséklettel. A tranziensben a két hőtároló tömeg a pontosabb szimuláció miatt szerepel külön.

3.3.1. A tranziens viselkedés



3.2. ábra. Radiátor Simscape modellje

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 vagy 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 katalógusokból azt találtam, hogy az egyes radiátor típusokra ezek a paraméterek milyen értékűek.

A termikus modell paraméterei egy 90 cm magas, 1,8 m hosszú C22 típusú radiátorra⁹ az alábbi táblázatban találhatóak:

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

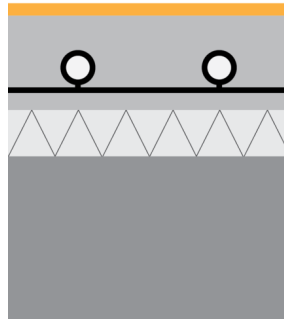
3.2. táblázat. Radiátor adatai a tranziensekhez

fémtest tömege	90 kg
fémtest fajhője	464 J/(kg K)
fűtővíz tömege	16 kg
víz fajhője	4189 J/(kg K)

A radiátor hossza, magassága, konstrukciója alapján a tömegek kiszámíthatók, illetve az acél hőkapacitása katalógusadatként szerepel. A szimulációban a Simscape termikus hőtároló elem blokkjaiba a fenti adatokat írtam.

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. A beton hőellenállása nem hanyagolható el, ezért a szimulációban ezt a hőmérsékletesést is figyelembe veszem.



3.3. ábra. Padlófűtés felépítése

Olesen számításait¹⁰ használtam a méretezéshez. A 18 m² alapterületű helyiségben 15 m²-nek vettem a fűtött területet. Ebből, és a hőigényből 45 W/m² teljesítményigény adódott. Az előremenő víz hőmérséklet kiszámítva $t_w = 36^\circ\text{C}$ biztosan fedezi a hőigényt $\dot{m} = 0.05 \text{ kg s}^{-1}$ tömegáram mellett.

Cholewa [5] és Koca [8] falfűtés és mennyezetfűtés esetére mért h_r és h_c sugárzó és konvektív hőátadási tényezőket. Ezen mérési eredmények paramétereit helyettesítettem be a hőleadás egyenletébe ahhoz hogy eldöntsem, helytálló-e a felírt modell. Az

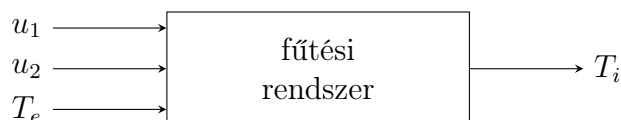
¹⁰A számítások Olesen kurzusának anyagában találhatók.

https://www.iee-cense.eu/-/media/Sites/Iee-cense/information/information-for-teachers/lecture-,-d-,2/presentation-slides/lecture_2c_dimensioning.ashx

4. fejezet

Identifikáció

A szabályzó tervezésénél használt szakaszmodell a Simulinkben megvalósított fizikai modell viselkedését leíró lineáris rendszer. Ebben a fejezetben a korábbiakban ismertetett hálózatot identifikálom.



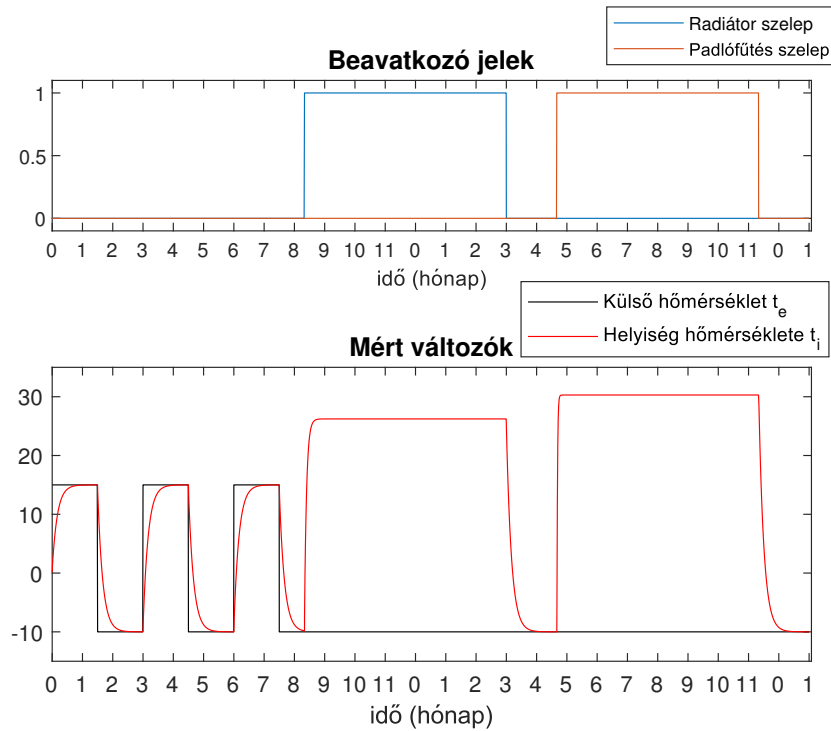
4.1. ábra. *A szabályzott szakasz összevont modellje*

A Simulinkben vizsgálójeleket használok: a több bemenetű, egy kimenetű rendszert egyszerre csak egy bemenetén gerjesztem. 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.

A szelepekkel való beavatkozás hiányában a T_i belső és T_e külső hőmérséklet különbsége (a helyiség időállandójának megfelelően) kiegyenlítődik.

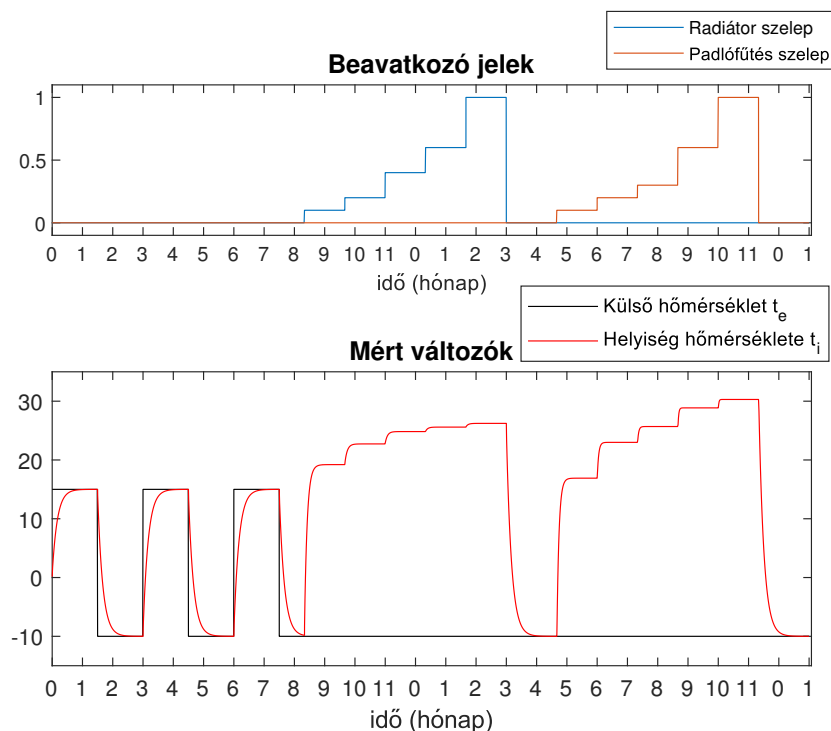
4.1. A szakasz ugrásválasza

Lineáris hálózatoknál gyakori vizsgálójel az egységugrás, illetve az impulzusgerjesztés. Az identifikációhoz ugrásválaszt vizsgáltam, de mivel a rendszernek 3 bemenete van, ezekre nem egyszerre, hanem időben eltolva adtam ugrásgerjesztést, mindig megvárva, hogy az előző hatás tranziense lecsengjen.



4.2. ábra. Szimuláció a bemeneteket külön-külön gerjesztve

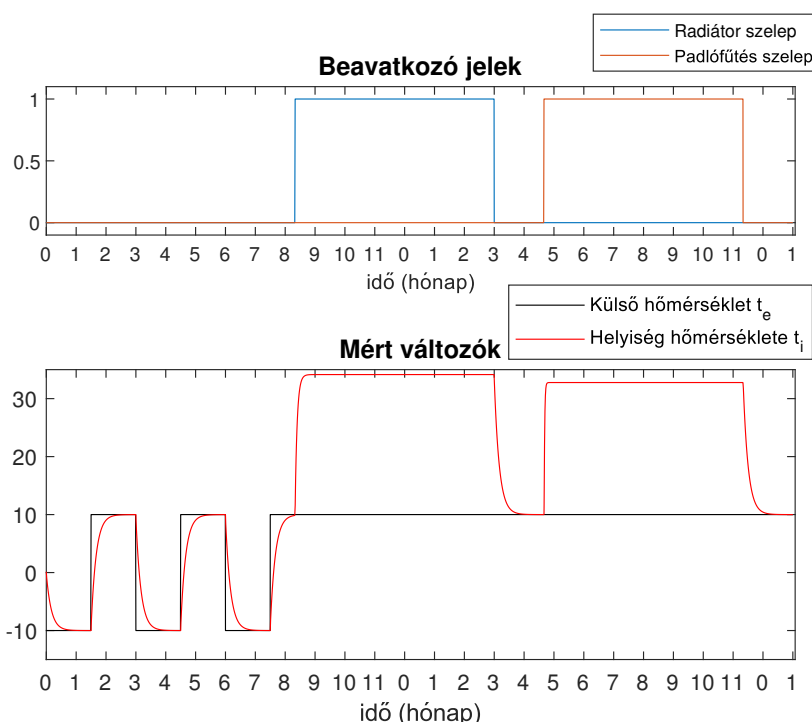
Lineáris hálózat esetén a kimeneten a válasz az ugrásgerjesztések szuperpozícióval adódik. A fenti ábrán látható, hogy a szelepek teljes kinyitásával kb. 35 °C-kal emelkedett a belső hőmérséklet. Lineáris hálózat esetén feleakkora beavatkozó jellel 17.5 °C-os hőmérséklet-emelkedésre számíthatnánk.



4.3. ábra. Szimuláció 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. A szelepek tehát nemlineáris bemenetek, a szuperpozíció elve nem működik¹.

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.



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

Látható, hogy a különböző bemenetekre adott gerjesztések hatása a kimeneten sem számítható szuperpozícióval: 20 °C-kal megemelt t_e külső hőmérséklet esetén a fűtőtestek nem fognak 20 °C-kal magasabb belső hőmérsékletre fűteni. Ez vonatkozik két szelep együttes kinyitására is: a hőmérséklet nem fog jelentősen megemelkedni.

A fenti hatásokat nemlineáris modellekkel lehetne lekövetni, viszont az ezekkel kapcsolatos (hiányos) ismereteim miatt erre szabályzótervezéssel nem próbálkoztam. Viszont egy nemlineáris modellt tudtam identifikálni a mérési adatokra, ami a fenti problémák egy részét kiküszöbölte.

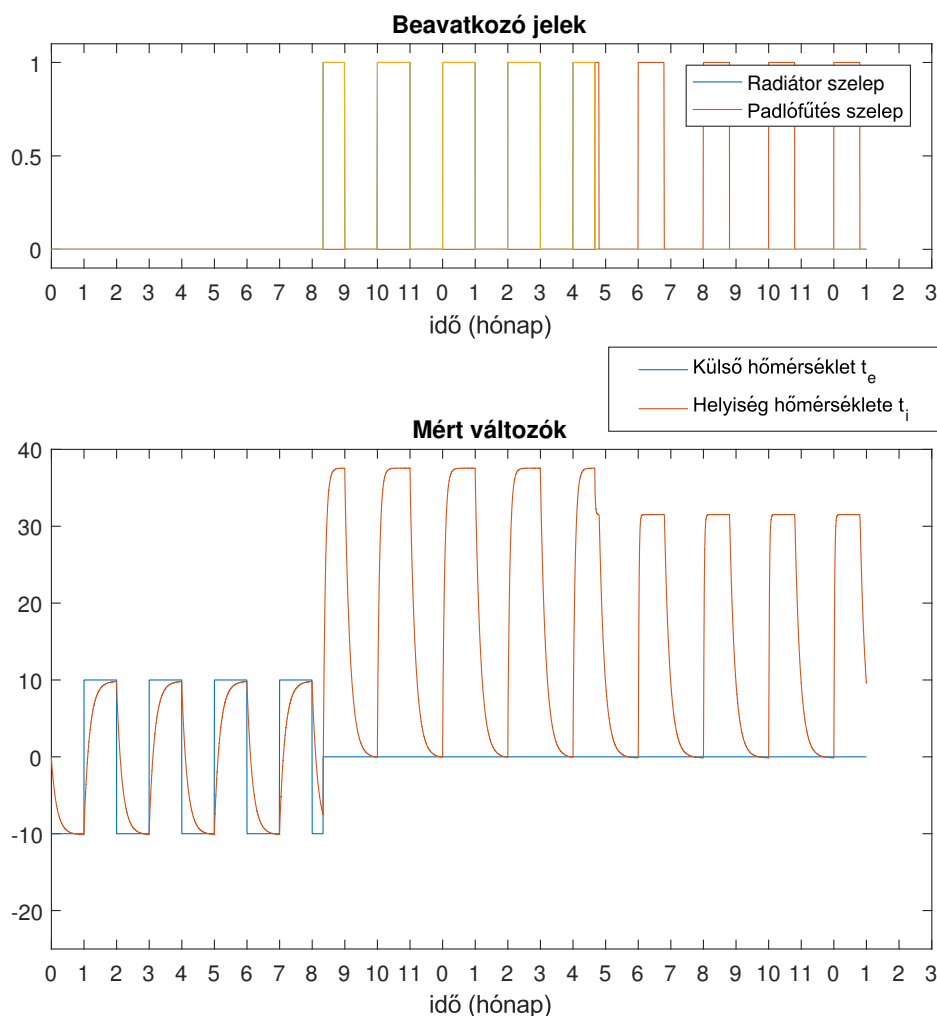
¹A szakasz másik nemlinearitása a szaturáció: a szelepet csak [0..1] tartományban lehet működtetni – a szabályzótervezésnél ezt figyelembe fogom venni.

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

4.2. Átviteli függvény illesztése az adatokra

Az identifikációhoz adatfájlt 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* alkalmazásba betölthetők az adatok. Az adatsorra átviteli függvényeket illeszttek: a pólusok, zérusok a száma a Simscape modell alapján meghatározható, RC-hálózatok analógiájával. Ekkor például a radiátorok felmelegedési idejét is leköveti a modell. A teljes helyiség időállandójához képest viszont például 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 körülbelül 30 naposak voltak és több periódusnyi mérésre volt szükség.

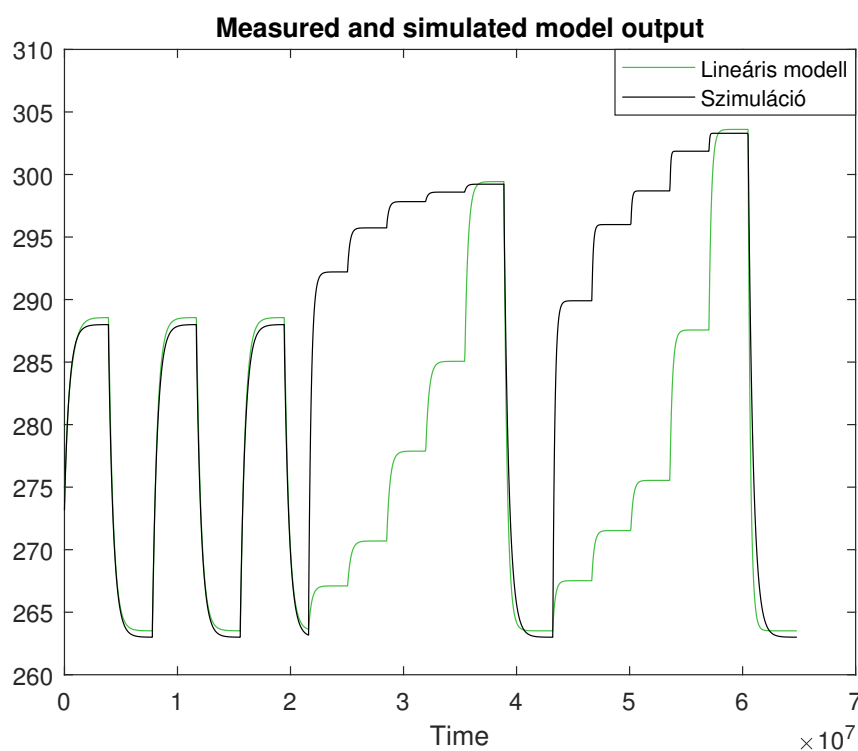


4.5. ábra. Identifikáció során

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 le. 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 nagyjából 30 naposak az egész rendszert tekintve, ami 10 nap körüli időállandót jelent. Szakirodalom szerint a falszerkezetek időállandója megközelítőleg 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.



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 egy szabályzás jóságát többféleképp is értelmezhetjük¹. Egyes esetekben hibahatárt megszabva lazíthatunk például a referenciakövetési feltételeken.

Az identifikált modellre 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. Az MPC egy beavatkozójel kiadása előtt 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 újratekintődik. A végrehajtott, adott horizonton optimális beavatkozójelet egy költségfüggvény minimalizálásával kapja. A költségfüggvényben különböző eltéréseknek vagy abszolútértékeknek különböző súlyja lehet.

A szabályzás tehát képes egy horizontig előre tekinteni, és azon belüli optimális beavatkozást végrehajtani. (Az angol nyelvű irodalom erre *receding horizon* névvel hivatkozik.) Az optimalizációt minden mintavételkor végrehajtja, így képes korrigálni, ha a jósolt kimenet és a tényleges kimenet eltérő.

A zárt szabályzási körben a stabilitás viszont nem garantált, erre külön módszerek léteznek (úgynevezett *terminal cost*, azaz végső költség, illetve időben változó

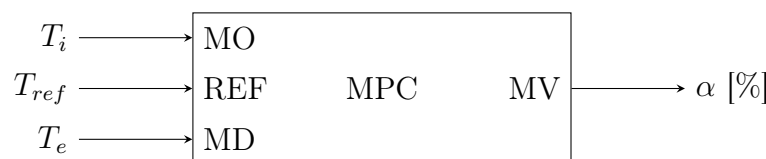
¹Mást tekintünk jó szabályzásnak egy tisztatérben, egy irodában, vagy egy nagyelőadóban, hiszen mások a felmerülő igények, és így a kritériumok is.

súlyozás). Mivel a vizsgált rendszerem nyílt körben is stabil, ezekkel nem kell foglalkoznom.

A stabilitás a beavatkozó jelek és a zavarjel (külső hőmérséklet) korlátosságából fakad. Ezeket is be lehet állítani a szabályzón, így az MPC a szelepekre csak 0 és 1 közötti beavatkozó jelet fog kiadni. A változások hatásait is figyelembe vehetjük, mivel a szelepeket 4-5 perc teljesen kinyitni.

A helyiség hőmérséklet-szabályozásakor a legfontosabb feladat a költségfüggvény súlyainak helyes beállítása². Ezek ugyanis befolyásolják a referenciakövetést - az állandósult állapotbeli hibát és lengést - és a beavatkozójel nagyságát, frekvenciáját is.

Az épületgépészeti rendszereknél a nagyobb frekvenciájú beavatkozójel könnyedén jelenthet alacsonyabb hatásfokot. Viszont ha megengedünk valamennyi ingadozást állandósult állapot körül, a terhelést kiegyenlíthetjük. Egy irodában, vagy lakásban például 0.1°C-os vagy 1°C-os pontosságú hőmérséklet-szabályzás közötti különbség komfortban aligha érezhető.



5.1. ábra. Az MPC be- és kimenetei

MPC	model predictive control	modell-prediktív szabályozás
MO / OV	measured output, output variable	mért kimenet (szabályzott jellemző)
MD	measured disturbance	mért zavarás
MV	manipulated variable	beavatkozó jel
REF	reference signal	referenciajel
T_s	sampling time	mintavételi idő
p	prediction horizon	predikciós horizont
c	control horizon	szabályzási horizont
J	cost function	költségfüggvény
w_u	weight (control signal)	beavatkozó jelet büntető együttható
$w_{\Delta u}$	weight (rate of control signal)	beavatkozó jel változását bünteti
w_y	weight (measured output)	hibajelet büntető együttható

5.1. táblázat. A fejezetben ismertetett rövidítések és angol szakkifejezések

²A súlyozást kiegészíthetik a fizikai korlátok is. Ha a szelepek nyitási- és zárási sebessége korlátozott, akkor ezt nem lehet túllépni alacsony súly használatával sem.

5.1. Elvárások a szabályzás teljesítményével szemben

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

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 korlátaikat és súlyukat a szabályzás költségfüggvényében,
4. hozzá kell adni a Simulink modell saját változói közé (Model workspace) 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 átviteli függvényénél, 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 (MO, MD, MV) Ezután az `"mpc(tf, Ts)"` függvénnyel létrehozhatjuk az MPC szabályzót a megadott szakaszmodellre.

5.2. A létrehozott MPC tulajdonságai

Az `"mpc()"` függvény még nem azonnal használható szabályzót. Az alapértelmezett súlyok és a normalizálatlan bemenetek miatt a legkisebb költségű beavatkozás akár az is lehet, hogy a szabályzó nagy követési hiba ellenére nulla beavatkozó jelet ad ki.

A költségfüggvény akkor működik jól, ha a modellbemeneteket normáljuk. Be kell állítani az MPC mért változóinak tulajdonságánál a modell kimenetének skálázását, amit az állandósult állapotbeli értékek, illetve a jellemző változásoknak megfelelően kell beállítani.

A helyiség modelljénél nagy eltérések vannak, hiszen a szelepek normálva vannak, a hőmérséklet értékeket viszont kelvinben értelmezem. Így a skálafaktort a 30..300 közötti nagyságrendben célszerű választani, mivel a hőmérsékletértékek nagyságrendileg 30 °C-nyi tartományban változnak.

A Simulinkben identifikált modell egy munkapont körül (adott környezeti hőmérséklet mellett) volt csak pontos, ám ez a referenciakövetést nem rontotta el. A szabályzás megváltozott paraméterekkel is működött a Simscape hálózatra, a referenciakövetés minősége megmaradt.

5.2.1. 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 minimalizálni³. Ez viszont egy összetett kapcsolat és jelentősen függ az épületgépészettől. Így általánosan fogom a paraméterváltozások hatásait vizsgálni.

5.2.2. 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 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 végrehajtja⁴. $J = w_u u + w_e e$, ahol a hibát a szabályzóban lévő szakaszmodell alapján számítjuk. *Agachi [11]* szerint:

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

ahol N a predikciós horizont, w_u a beavatkozó jel változásának súlya, w_e a hibajel súlya. A referenciajel jövőbeli változásait figyelembe lehet venni a predikciós horizonton belül⁵.

³*Feng [10]* is szelepet használt, de az ott felírt költségfüggvényt nem pontosan értem.

⁴Ezt formalizálni kellene egyenletben is.

⁵A jövőbeli változásokat ismerhetjük, ha van egy referenciajelünk, vagy lehet becslés rá egy

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 szelepeknek 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.

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.

5.2.3. Fejlesztési lehetőségek a szabályzással kapcsolatban

Épületautomatikai rendszerek használatával, például a fűtésszabályzás iContrALL intelligens otthon rendszerével a fellépő zavarásokat (emberek jelenléte, napsütés,

időjárás-előrejelzés.

Bővebben az elméletéről: <https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/signal-previewing.html>, illetve a felhasznált Simulink blokkok: <https://www.mathworks.com/help/mpc/examples/improving-control-performance-with-look-ahead-previewing.html>

szél) mérhetjük. A szabályzás a zavarások hatásmechanizmusának ismeretében jobb zavarelnyomást tud elérni, sőt az integrációval további beavatkozók is használhatók (például árnyékolástechnikai eszközök).

5.2.4. 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

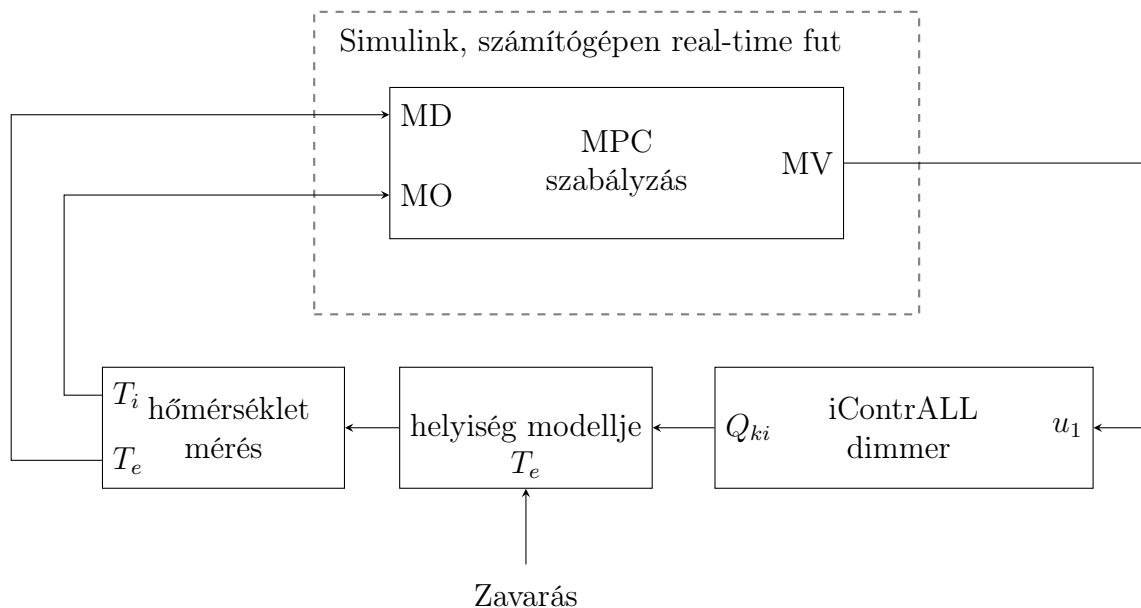
6.1. A kísérleti rendszer

Az elméleti eredmények validálásához elkészítettem egy szoba kicsinyített modelljét. Ez egy kartondobozban kapott helyet. A doboz hőtároló képessége elég csekély, ezért extra hőtároló tömegeket helyeztem bele, OSB falapot és egy elektromos kályhából vett samott téglát. A fűtési teljesítményt halogén izzókkal juttattuk a rendszerbe. Ezek teljesítménye szabályozható, így ez a bemenet lineáris a szelepekkel ellentétben, azaz kétszer nagyobb beavatkozójelre kétszer nagyobb teljesítmény kerül a rendszerbe. A hőmérsékletet mérjük a dobozban és azon kívül is. Zavarásként a mérőszoba ablakát kinyitjuk, így a doboz környezeti hőmérséklete lecsökken.

6.2. A Simulink konfigurálása

A valós idejű futáshoz Simulink Real-time szükséges. A real-time működés itt azt jelenti, hogy a szabályzót a Simulink mintavételi időnként futtatja le. Azaz ha a kísérleti rendszerre 30s-es mintavételi idejű szabályzót tervezek, akkor az MPC fél-percenként mintát fog venni a hőmérsékletekből és ki fog adni egy beavatkozójelet. Így a real-time ez esetben nem jelent például szigorú korlátokat a futásidőre.

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.



6.1. ábra. A valós idejű mérések szereplői

6.3. Mintavételi idő és predikciós horizont

Az MPC paraméterezésére *Agachi [11]* könyvében találhatóak ajánlások. A predikciós horizontot eszerint úgy kell megválasztani, hogy az a szakasz releváns dinamikáját lefedje. Mivel a felfutási ideje a kísérleti rendszernek kb. 1 óra, ezért ezt ekkorára választottam. A predikciós horizont ajánlott nagysága 10-20 mintavétel a számítási igény csökkentése miatt (így $T_s = 300$ s adódna), viszont a mérés során gyakrabban szerettem volna látni a változásokat, a mintavételi időt 30 másodpercre vettem.

A fentiek mellett viszont a szabályzó nem adott ki beavatkozójelet egészen egy predikciós horizontnyi ideig, azaz majdnem 1 órán keresztül¹. Az MPC képes a költségfüggvényben figyelembe venni a predikciós horizonton belül a referenciajel jövőbeli változásait (ez a *Signal Previewing*), ezt kipróbáltam annak érdekében, hogy ezt a "holtidőt" csökkentsem, ám ellentétes hatást értem el.

A Simulink blokk viszont támogatja az MPC-nek kezdeti érték megadását. A kezdeti érték nélküli MPC-t szimulációban (azaz nem valós időben) futtattam, majd leolvastam annak belső állapotát. Az `mpcstate` függvénnyel létre kellett hoznom egy objektumot, ami a Simulinkben a szabályzót inicializálja. Ehhez szükség volt a szabályzó állapotteres szakaszmodelljének² becsült állapotára, a zavarjel becsült értékére, a zaj becsült értékére (ez esetben üres vektor), a legutóbbi beavatkozójelre és egy kovarianciamátrixra (ezt nullmátrixnak vettem).

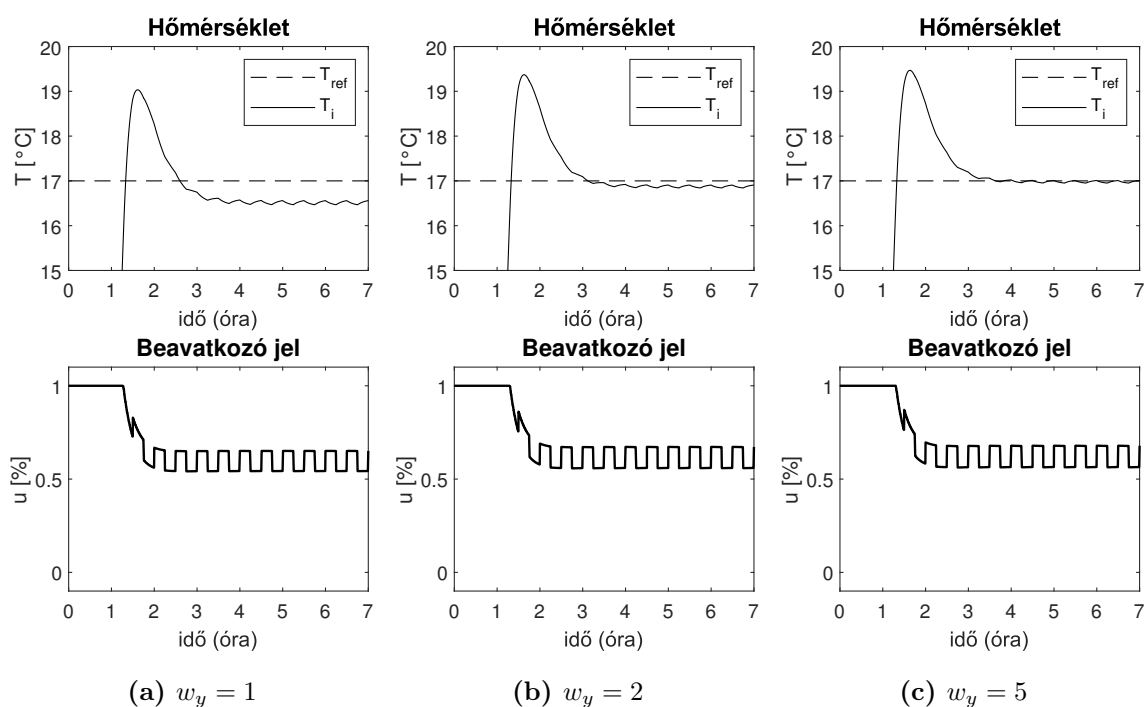
¹Ha 300 másodperces mintavételi időt használtam és 10 mintányi predikciós horizontot, ugyanez volt a helyzet. Ez idő alatt az MPC valószínűleg az állapotbecslőjét inicializálja.

²Amikor az MPC-t létrehozuk, a szakaszmodellt a Matlab állapotteressé alakítja.

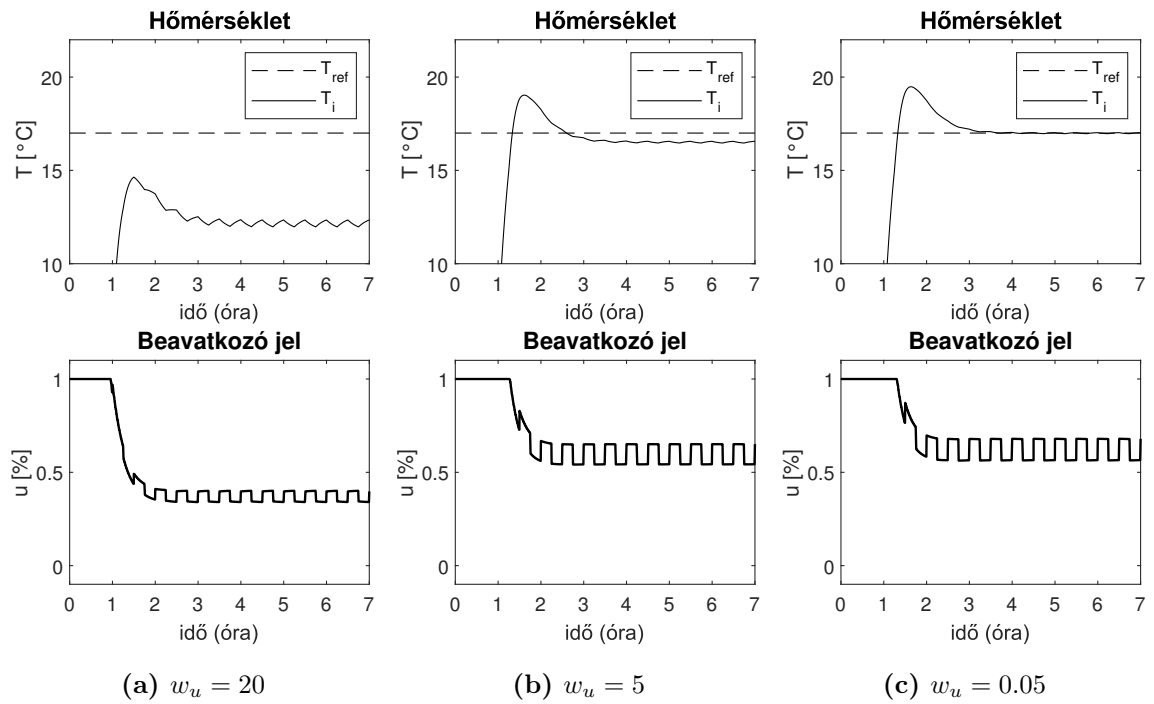
Azzal, hogy a fenti objektumban a legutóbbi beavatkozójelet maximálisnak vettem, valós idejű futás esetén, a fizikai rendszer ugrásválaszánál nem kellett kivárnom egy órát, azaz a predikciós horizontnyi időt, hanem a szabályzó rögtön maximális beavatkozójelet adott ki.

6.4. Szabályozótervezés az identifikált modellre

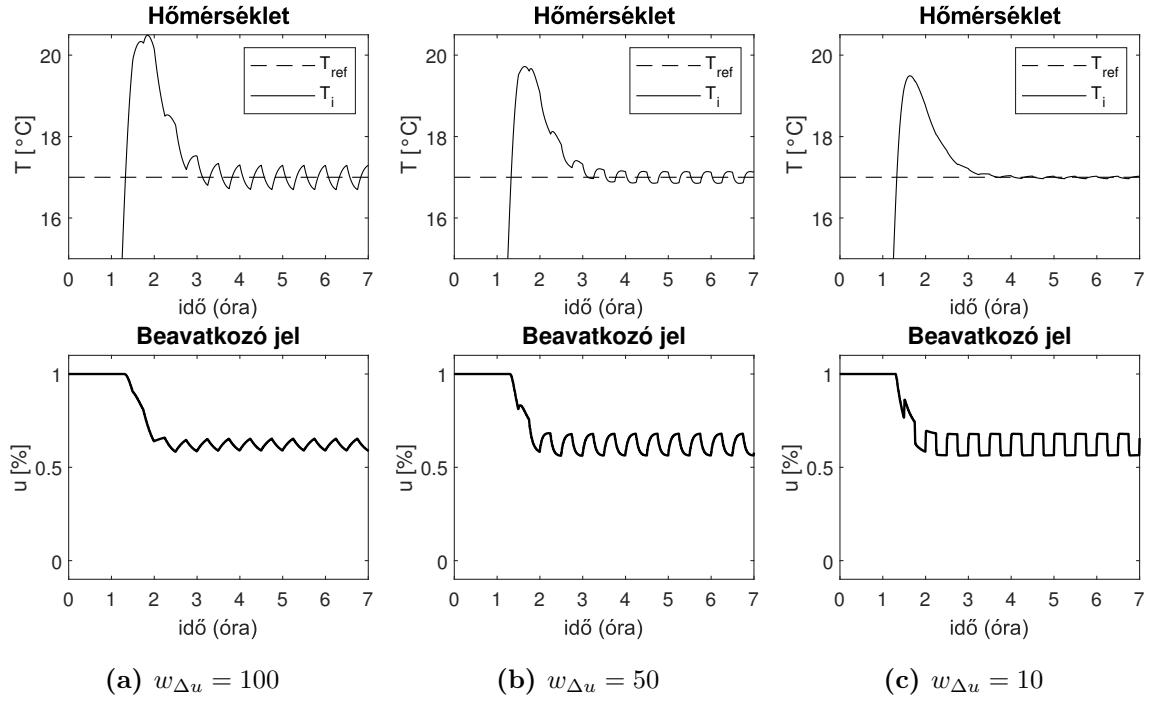
A valós idejű méréshez használt szabályzót érdemes először szimulációban megvizsgálni. Ekkor az identifikált lineáris modell a szabályzott szakasz, a szabályzóparaméterek megváltoztatását pedig gyorsan meg lehet figyelni.



6.2. ábra. MPC viselkedése különböző w_y értékekre



6.3. ábra. MPC viselkedése különböző w_u értékekre, $w_y = 5$ mellett



6.4. ábra. MPC viselkedése $w_{\Delta u}$ értékekre, $w_y = 5$, $w_u = 0.05$ mellett

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, melyekkel 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 szabályozás 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 termosztátok és a távhőszelepek Johnson Controls gyártmányúak voltak.

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

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 gondoskodnak. 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.

A technikai feltételekben tehát nem áll rosszul a piac, de ahhoz, hogy egy összetett szabályzásra költsenek egy épület tervezői, garanciát kellene adni az így elérhető megtakarításokra, amiket LEED vagy WELL tanúsítványokban extra pontokkal értékelnek.

8. 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.
- [10] Jingjuan (Dove) Feng, Frank Chuang, Francesco Borrelli, and Fred Bauman. Model predictive control of radiant slab systems with evaporative cooling sources. *Energy and Buildings*, 87:199 – 210, 2015.
- [11] Paul Agachi, Zoltan Kalman Nagy, Vasile Cristea, and Arpad Imre-Lucaci. *Model Based Control - Case Studies in Process Engineering*. 11 2006.