



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Irányítástechnika és Informatika Tanszék

iContrALL

Korszerű fűtési rendszerek szabályzása

SZADOLGOZAT

Készítette

Gyulai László

Belső konzulens

dr. Kiss Bálint

Külső konzulens

Kurbucz Máté

2018. november 19.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. Ház modellje	6
2.1. A modellalkotás folyamata	6
2.2. Épületfizikai alapösszefüggések	7
2.3. A megvalósított modell	7
2.4. Fűtési rendszer és ház kapcsolata	9
3. Fűtőtestek modellje	10
3.1. Állandósult állapotbeli hőleadás	11
3.1.1. Hőleadás alapegyenletei	12
3.1.2. Hőfelvétel alapegyenletei	13
3.1.3. Energiamérleg állandósult állapotban	13
3.2. Dinamikus hőátadás modellje	14
3.2.1. Hőkapacitás	14
3.2.2. Hőleadás hőmérsékletfüggése	15
3.2.3. Sugárzó és konvektív teljesítmény szétválasztása	15
3.3. Radiátor modellje	16
3.3.1. Paraméterek	16
3.3.2. A modell validálása	17
3.4. Padlófűtés modellje	17

4. Identification	19
4.1. Hagyományos szabályzás performanciája	20
5. Szabályzó kiválasztása és analízise	21
5.1. Ismerkedés az MPC szabályzással	22
5.1.1. Elvárások a szabályzás teljesítményével szemben	22
5.1.2. A MATLAB MPC Toolbox elemei	23
5.1.3. A létrehozott MPC tulajdonságai	23
5.2. A szabályzó paramétereinek finomítása, hangolása, alapbeállítások felülírása . .	24
5.2.1. Az MPC költségfüggvénye	25
5.2.2. Offline MPC - supervisory control	26
5.2.3. Validálás	26
6. Gyakorlati megvalósítás	27
6.1. A Simulink konfigurálása	27
7. További teendők, finomítások, lehetőségek	29
8. Összefoglalás	30

Abstract

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 a funkciókat akár az iContrALL okosház platformba is be lehet illeszteni.

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[1] is megfogalmaz szabályokat és ajánlásokat ezzel kapcsolatban. Eszerint “új fűtési rendszer létesítésekor és meglévő fűtési rendszer korszerűsítésekor a helyiségenkénti hőmérséklet-szabályozást javasolt megvalósítani gazdaságossági számítás 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 vonatkozó szabályokat. Forrás:

e-epites.hu/e-tanustas/az-energetikai-tanustivany-kiallitasa-2016-tol

ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings/nearly-zero-energy-buildings

²A LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) egy komplex minősítési rendszer, a szakdolgozat tematikájához az *Energia és légkör* kategória tartozik. Bővebben: <https://www.terc.hu/tudastar/leed>
A WELL hét szempontot vesz figyelembe – levegőellátás, víz, egészséges táplálkozás, természetes fény, testmozgás, kényelem és szellemi frissesség – és ezek technikai feltételeire tesz javaslatokat.

³Épületgépészeti rendszer [1] szerint a HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) rendszerek, a melegvíz-ellátásra és világításra szolgáló berendezések összessége.

A szabályzáshoz a klasszikus elképzelések szerint vagy ismerjük a szabályzott szakasz modelljét, vagy identifikálnunk kell azt, vagy fel kell írni rá a gerjesztés-válasz kapcsolatot, pl. átviteli függvényeket. A 2.-3. fejezetekben felállítok egy helyiség és a hozzátartozó fűtőtestek modelljét. Itt röviden foglalkozok méretezési kérdésekkel is, illetve ezeket felhasználom a modell megalkotásához. Publikációk, könyvek, adatlapok alapján validálom a felírt összefüggéseket, az ottani mérések adataiból kiindulva. ([2, 313, 361. o.] - fűtőtest mérés, be kell helyettesíteni)

Nem csak a törvény javasolja helyi szabályzás kiépítését, hanem Csoknyai [2, 118. o.] is összegyűjtötte azokat a zavarásokat, amelyeket egy elosztottan működő rendszer jobban tud kezelni, mint egy központi szabályzás. Épületautomatikai rendszerek használatával, pl. a fűtésszabályzás iContrALL okosotthon rendszerébe integrálásával 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 (pl. redőny).

A szakasz modelljére Simulinkben átviteli függvényt identifikálok, erre megtervezem az MPC szabályzást. Az alapértelmezett paramétereket módosítom a fizikai korlátoknak megfelelően, amelyek a beavatkozókra vagy a szakaszra vonatkoznak.

Az MPC-nek rendkívül sok paraméterezési lehetősége van, amiktől függően a szabályzás agresszívebb vagy robusztusabb lehet.

Az MPC szabályozás gyakorlati kipróbálásához fizikai tesztrendszert állítunk fel, itt az MPC tervezési kérdésekre koncentrálok, átviteli függvény modellből.

2. fejezet

Ház modellje

A szabályzótervezéshez rendelkezésre kell, hogy álljon a szabályzott szakasz modellje. Ehhez egy könnyen módosítható, koncentrált paraméterű hálózatot vettem fel, ahol minden elemhez lehet fizikai tartalmat rendelni. Ahhoz, hogy ehhez szabályzót lehessen tervezni, identifikáltam azt az ugrásválaszával.

A modell paraméterei ideális esetben az épület energetikai tanúsítványából kiolvashatók. Így a Matlab-ba ezeket az adatokat felvéve, és a tervezési lépéseket ott elvégezve a szabályzót rögtön használatba vehetjük, nincs szükség hosszas kalibrációs időszakra beüzemelésnél. A modellbeli eltéréseket esetlegesen kompenzálni lehet később, mérési adatok felhasználásával.

2.1. A modellalkotás folyamata

A modellt többféle úton is megkaphatjuk, de mindegyiknek lesz előnye és hátránya is: fizikai összefüggések alapján felírhatunk egy olyan modellt, amiben a hatásmechanizmusok pontosan szerepelnek, de a paraméterek a ténylegestől eltérőek lehetnek. Ha ezek nem ismertek, black-boxként is kezelhetjük a rendszert, de az identifikációhoz nagyon sok mérésre van szükség, hogy a mérési hibákat, zavarásokat kiküszöbölhessük.

Én a fizikai modell felírását választottam, de a szabályzótervezéshez így is egy átviteli függvényt használok. Ehhez azonban mégis sokkal egyszerűbb eljutni, mint mérésekkel: a Simulinkben megvalósított hálózatra az identifikáció sokkal egyszerűbb, mint valós rendszerre. A vizsgálójelek tetszőlegesen megválaszthatók, pl. a külső hőmérséklet hatása is pontosan meghatározható. A ház egy MISO rendszer, terepi méréseket használva csak hosszas mérésekből lehet szétválasztani

a bemenetek (fűtés, külső hőmérséklet, napsütés) hatását a belső hőmérsékletre. Ha később páratartalom szabályzása is szóba kerül, még bonyolultabb a helyzet.

Egyzónás hőmérsékletszabályzást veszek alapul, azaz egy referenciajelem és egy mért hőmérsékletem van, a modellben a szoba levegőjének hőmérsékletét mindenhol ugyanakkorának feltételezem. A szabályzás külső behatások ellenében történik, úgy mint alacsonyabb külső hőmérséklet, illetve a napsütés, szellőzés hatása. Nem foglalkozok viszont belső zavarással, pl. több szoba különböző típusú fűtésével, vagy a belső hőterheléssel, ami pl. emberek jelenlétéből fakad.

Természetesen lehetett volna nagyon sok állapotú állapoteres modellt is létrehozni, ám rengeteg nem mérhető belső változója lett volna, emiatt nem biztos hogy teljesen irányítható vagy megfigyelhető rendszert kaptam volna, így pedig a szabályzótervezés nem működik.

ÁBRA WHITE-BOX MODELRŐL, ÉS BLACKBOX IDENTIFIKÁCIÓRÓL. ILLETVE WHITEBOX IDENT.

2.2. Épületfizikai alapösszefüggések

A fizikai modell felírásához szükség van néhány alapösszefüggésre.

Hővezetés, hőáramlás, hőszugárzás

Hőátbocsátási tényező számítása

Hőtároló képesség

$$Q_{ki,fal} = U_{fal} A_{fal} \Delta T = 200W \quad (2.1)$$

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

2.3. A megvalósított modell

Figyelembe kell vennem a ház hővesztéseit és hőtároló képességét is, a () és () egyenletek alapján, melynek paraméterei a 2.1. táblázatban találhatók. Az alábbi táblázat értékeinek nagy

részét ki lehet tölteni a tanúsítványból. Az épület hőigénye numerikusan is szerepel, ám ez pl. éves átlagolással adódik, nem csak a fűtési rendszert, hanem a várható időjárást is figyelembe veszi, illetve az energiaigénynél nem csak a fűtési, hanem használati melegvíz előállítására felhasznált energiát is.

A Matlab Simscape model és Lapusan¹ hőátadásnál a réteges szerkezetekben számolt konvekcióval és kondukciónal is. Viszont ezek az adatok egyben is kezelhetők, a követelményeket ezekre a költségoptimalizált követelményszint² 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 (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. Viszont itt célszerű lenne a konvektív hőátadást is beleszámolni.

felület	méret	h_t , átlag	hőtároló tömeg	hőkapac
külső fal	4.5 m ²	2 $\frac{W}{m^2 K}$	900kg	756 $\frac{kJ}{K}$
ablak	4 m ²	4 $\frac{W}{m^2 K}$	0	0
belső válaszfalak	50 m ²	7 $\frac{W}{m^2 K}$	5000kg	4.2 $\frac{MJ}{K}$
padló	16 m ²	11 $\frac{W}{m^2 K}$	3200kg	2.7 $\frac{MJ}{K}$
mennyezet	16 m ²	5 $\frac{W}{m^2 K}$	3200kg	2.7 $\frac{MJ}{K}$

2.1. táblázat. Egy szoba határoló felületei és azok termikus tulajdonságai

A példában a schönherzes kollégiumi szoba határoló elemeit 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.

¹Development of a Multi-Room Building Thermodynamic Model Using Simscape Library - Ciprian Lapusan

²A költségoptimalizált követelményszintek megtalálhatók a 7/2006. rendelet [1] 5. mellékletében.

Hőigény:

A külső falon

$$Q_{ki,fal} = U_{fal} A_{fal} \Delta T = 200W \quad (2.2)$$

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

Amennyiben a méretezési hőmérséklet $\Delta T = -2^\circ\text{C}$, ami a téli átlaghőmérséklet Magyarországon.³

2.4. Fűtési rendszer és ház kapcsolata

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 tanúsítás⁴ egy 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 interneten 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: 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.

³Épületfizika kurzus alapján vettem az átlaghőmérsékletet -2°C -nak.

⁴TNM 2006 rendelet alapján kötelező az energetikai tanúsítvány pl. *átlagos* lakóépületekre, irodákra.

3. fejezet

Fűtőtestek modellje

A fűtőtestek feladata, hogy az adott szobában teljesítményt szolgáltatassanak / (hőt¹) adjanak le. A leadott teljesítmény növeli a levegő és az épületszerkezet hőjét (3.7. egyenlet). A levegőnek, padlónak, falaknak tömegüknél és fajhőjüknel fogva mind-mind van egy hőtároló képességük (2.1. táblázat), így ezen elemek hőmérséklete nem változhat ugrásszerűen, hanem egy bizonyos idő alatt tudnak feltöltődni vagy hőenergiájukat leadni.

A hasonlóság nem véletlen a villamos hálózatokkal. Felfedezhető, hogy a hőáramot a hőmérsékletkülönbség hozza létre, nagysága pedig fordítottan arányos a hővezetési tényezővel.

Ebben a fejezetben először hőtani alapösszefüggéseket ismertetek, amelyekből előáll majd a fűtőtestek teljesítményét leíró modell. A modell által számolt teljesítményt egy Simscape-ben megvalósított termikus hálózatra vezetem², ami a fűtőtest tranziens viselkedését adja meg. Így szimulálható a szoba felfűtése, tranziensével együtt.

Állandósult állapotra a fűtőtestek teljesítménye felírható a szabályzott jellemzők és a környezeti jellemzők függvényében. Mivel vizsgált fűtési rendszerek hője melegvízből származik, **szabályzott jellemzőként** a kazán (hőszivattyú, stb.) által előállított melegvíz hőmérséklete, illetve a keringető szivattyú tömegárama jöhet szóba.³ Az elképzeléssel jobban összhangban áll az utóbbi választása, hiszen ezzel elosztottan, szobánként is szabályozható az egyes fűtőtestekbe táplált hőmennyiség: a víz tömegáramát folytonosan tudom szabályozni egy szelep segítségével, a fűtőtestekbe betáplált víz hőmérséklete (ún. előremenő hőmérséklet) állandó.

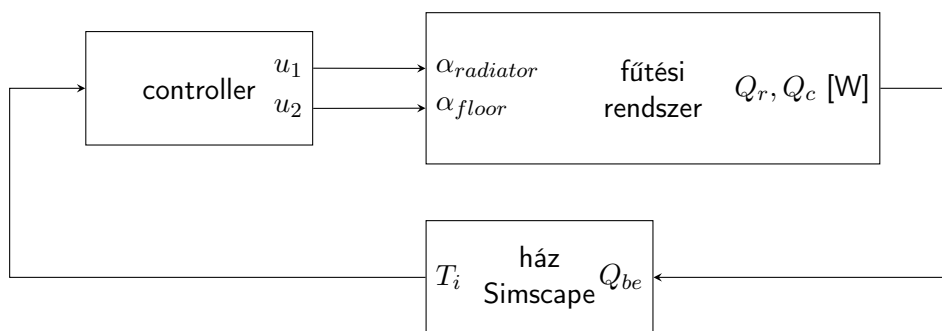
¹A hő mértékegysége J, a teljesítményé [W] = [$\frac{J}{s}$]

²A termikus hálózatok alkotóelemei nem ellenállások és kondenzátorok, hanem hővezetési tényezők és hőtároló 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 pl. távhő formában rendelkezésre áll.

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 hőmérséklete. (A hőleadás típusa dönti el, hogy ezek közül melyik mérvadó, lásd a sugárzó és konvektív fejezetet.) Ezen bemenő paraméterek és a fizikai tulajdonságok alapján megadható az állandósult állapotbeli teljesítmény. Ennek levezetése a következő section-ben 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. Így egy adott referencia trajektória esetén figyelembe kell venni ezen rendszerek dinamikáját is. A pontos 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 simscapes section-ben láthatjuk.



3.1. ábra. A szimulációban szereplő elemek kapcsolata

3.1. Állandósult állapotbeli hőleadás

Mivel a Matlab szimulációban a légbefúvásos fűtés modelljének teljesítmény kimene-
te van, olyan modellt szerettem volna felírni, ami beilleszthető az eredeti légbefúvó
rendszer helyére. A ház hőveszteségeit a Matlab számolja⁴, ebből pedig adódik a szo-
ba levegőjének hőmérséklete. A rendszer szabályozását így visszavezettem a leadott
teljesítmény szabályzására. A levezetett egyenletnek köszönhetően egy teljesítmény-
igényhez meg tudom majd mondani hogy mennyire kell a szabályozószelepeket kinyitni.

Az *Épületgépészet a gyakorlatban*⁵ c. könyvben szó esik fűtési rendszerek méretezé-
séről. Itt adatként szerepel egy épületre a szobák hőigénye⁶ és névleges hőmérséklete.
Ehhez választanak megfelelő méretű radiátort, hogy azokban a kiszámolt sebességgel

vizet keringetve a hőleadás elég legyen az adott helyiségbe. (Ehhez figyelembe kell venni minden radiátorra a keringő víz hőmérsékletét is, különösen ha azok sorba vannak kötve és a hőmérsékletesések is jelentősek.)

Hasonlóan méretezési feladatot mutat be a [2, 4.2.7.3] is. 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 hőleadását befolyásolja a fűtőtestek közepes hőmérsékletkülönbsége (ld. a 3.2. egyenletet), a felülete és a hőleadási tényezője. Ezek közötti kapcsolatot adja az 3.1. egyenlet ([2, 358. o.]-ból):

$$\dot{Q}_{le} = h_t A_e \Delta t_m \quad (3.1)$$

ahol

\dot{Q}_{le} [W] a leadott hő

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

A_e [m²] a radiátor felülete

Δt_m [K] a közepes hőmérsékletkülönbség:

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= t_s - t_i \\ t_s &= \frac{t_w + t_r}{2} - t_{drop} \end{aligned} \quad (3.2)$$

ahol °C-ban szerepelnek:

t_s a fűtőtest felületi hőmérséklete

t_i a szoba hőmérséklete

t_w a radiátorba befolyó⁷, t_r az onnan kifolyó víz hőmérséklete

t_{drop} hőmérsékletesés a közepes fűtővízhőmérséklethez képest⁸

⁷Consider using T_w for supply water temp instead of T_s to avoid misinterpretation as sampling time.

⁸A 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.

3.1.2. Hőfelvétel alapegyenletei

A vízből felvett hő felírható:

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

ahol

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

c [$\frac{J}{kg K}$] a víz fajhője

\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 felvétellel, mivel akkor nem történik hőfelhalmozás, hőtárolás. Azaz ekkor a radiátor hőkapacitását nem kell figyelembe vennem.

Beírva a (3.2)-ba (3.1)-t:

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

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

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

Beírva (3.4)-ba (3.5)-t:

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

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

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

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

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

Állandósult állapotra a szükséges beavatkozójel adott kimenő teljesítményhez: 3.7 egyenletet kell $\alpha \dot{m}$ -ra (ill. csak α -ra) rendezni.

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. Viszonta 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. Dinamikus hőátadás modellje

Ezen hőtároló elemek feltöltődése szimulálva adja a dinamikus viselkedést.

3.2.1. Hőkapacitás

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

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

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

Aljzat, aljzatbeton: slab facade: frontal - homlokzat

3.2.2. Hőleadás hőmérsékletfüggése

3.2.3. Sugárzó és konvektív teljesítmény szétválasztása

Fun facts:

- A falakra az $\alpha = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ érték a sugárzó és konvektív hőleadást is tartalmazza. A konvektív hőleadás függ a felületi áramlási sebességtől: falsaroknál ez az érték alacsonyabb, kb. a fele.
- A sugárzó hő a Stefan-Boltzmann törvény alapján függ az emisszivitástól. (Annak a mértéke, hogy a test a feketetesthez képest mennyi hőt bocsát ki). A hőmennyiség a hőmérséklet negyedik hatványával arányos. A **sugárzott hő meghatározásához** még meg kell keresni és be kell írni a Simscape blokkba a megfelelő együtthatókat. Valami általános összefüggést kell találni, hogy a radiátor milyen arányban melegíti a külső falat, ahol van, ill. az ablakra milyen hatással van: még nem kezelem le ezeket az aszimmetriákat, hanem minden hőmérsékleteloszlást homogénnek veszek. A Stefan-Boltzmann törvény direkt alkalmazása helyett a szabványokban és irodalomban található közelítésekkel élek.
- A $q_r \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$ *radiant heat flux density* a [5] T. Cholewa (5.) egyenlet alapján számítható de az a geometriától is nagyban függ. Helyette Kilgis1994 (4) és (6) javasolt, illetve a [5]-ből is lehet mért értékekkel számolni / a szabványok ajánlását használni.
- A hőhidak a hőveszteségek meglepően nagy részéért felelősek, jelentős hibát követünk el, ha ezekkel nem számolunk. Meg kell keresni az energ. tanúsítványokban hogy hol tüntetik fel ezek mértékét.
- [7, 5.188. o.] szerint az operatív hőmérséklet $t_{op} = \frac{h_r T_{mrt} + h_c T_{air}}{h_{tot}}$, ahol $T_{mrt} = \frac{\sum_{k=1}^n A_k \epsilon_k T_k}{\sum_{k=1}^n A_k \epsilon_k}$.
Az ϵ emittancia a StefBol képletből való.

Fűtött padló, falak, mennyezet esetén jelentős szerepe van a sugárzó hőleadásnak.

- A.Laouadi / Building and Environment 39 (2004) 421 – 431 - p424, eq. 10-11: radiant heat transfer model
- TEMPERATURE CONTROL STRATEGIES FOR RADIANT FLOOR HEATING SYSTEMS, Zhi Long Zhang: 40.o.
- [5] T. Cholewa et al. / Energy and Buildings 66 (2013) 599–606 - Table 5: coefficient
- Kilgis1994 A simplified model for radiant heating and cooling panels: itt van képlet sugárzóra

- Kiegészítés: [2, 349. o.]

A sugárzó hőleadási tényező bevezetésével viszont linearizálhatjuk a hőleadást, a hőleadás így egyszerűen lineárisan függ majd a hőmérséklet-különbségtől.

$$\dot{Q}_r = h_r A_e (t_{surf} - t_{AUST}) \quad (3.9)$$

ahol

\dot{Q}_r [W] a leadott sugárzó hő

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

A_e [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 $\Delta t_k = \frac{t_{ws} + t_{wr}}{2} - t_i$. Ezzel a következő alakban számolhatunk:

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, vagz előbb a ház modelljét, hőszükségletét felírni, elvégre is a házhoz tervezni

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

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

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 - Simscape termikus hőtároló elem blokként víztérfogata, a víz fajhője még egy hőtároló elem.

3.3.2. A modell validálása

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

3.4. Padlófűtés modellje

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 fűjjük, illetve szélben a kinti hőmérséklet kisebbnek érződik. Hasonlóan melegebb tárgy esetén a légáramlás felgyorsul, amiatt hogy a melegebb levegő felfelé száll.

4. fejezet

Identification

A Simulink modellt bemenetein gerjesztem (külső hőmérséklet ablak 40 °C 5 napig, majd fűtés 60 °C előremenő hőmérsékleten valve = 1 állásban.¹⁾)

Ay IDDATA Simulink blokkba bevezetem a be- és kimeneteket. A mintavételi idő először egy másodperc volt. A Matlab Workspace-ben megjelenik egy iddata, ezt tudom az ident toolboxba importálni. Erre átviteli függvényeket illeszték. Az átviteli függvények pólusainak, zérusainak a száma a Simscape modell alapján meghatározható, illetve intuícióból.

Nyilvánvalóan célszerű az identifikációnál minél nagyobb változásokat mérni. Nem tartottam "értelmét" 1°C-os step jelre identifikálni. Így beállítottam nulla kezdeti értéket a ház összes paraméterére. (Falak, fűtési rendszer, stb. Nyilvánvaló, hogy ilyenkor nem a realizmus a cél, hiszen a nagy változásokra jön elő a rendszer dinamikája.) Nulla kezdeti értékből a környezeti hőmérsékletet 0-ról 40°C-ra emeltem, ennek a beállási ideje több nap volt, majd megvártam a lecsengést, ezután pedig a beavatkozókát vezéreltem ki teljesen. (Max. szelep kinyitás)

Egy ilyen szimuláció a fenti szekvenciával kb. 50 napnyi viselkedést fog át, ez másodperces mintavételi idővel rengeteg adat, amivel meggyűlik az Ident Toolbox baja is.

5 perces mintavételi időekkel már sokkal gyorsabban lefutott a Simulinkben a szimuláció és a toolboxban az identifikáció, lényegében azonos eredményt adva. (Indoklás???)

Viszont a mintavételi idők megváltoztatásától azért *félttem*, mert nem tudtam, hogy reagál rá a Simscape vagy az MPC.

Zérusok hatása röviden. Mit tud. Hánytárolós rendszer. Néhány kép. MISO identifikáció.

¹A stratégia lehet t_s előremenő hőmérséklet vagy $\alpha \cdot \dot{m}$ tömegáram szabályzása $\alpha = [0..1]$ beavatkozájjal.

4.1. Hagyományos szabályzás performanciája

PI, miért nem jó Csak SISO-ra működik és itt esetünkben itt több bemenetről van szó mindenképpen. Irodalom: S. Prívara et al.

5. fejezet

Szabályzó kiválasztása és analízise

Már a modell identifikációját is bonyolította az egynél több bemenet. Illetve kettő van kimenetből is. A szabályzásnál különösen nehéz több bemenetű rendszerre tervezni, esetleg a modellek szétválasztásával lehetséges: külön beavatkozási jelet 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 beavatkozási jele sorozatra a kimenetet szimulálva. Ezen sorozatok közül a legjobbat kiválasztja és egy lépést végrehajt. Ezután a szimuláció újratekintődik. Az optimális beavatkozási jelet 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 költség függvény 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

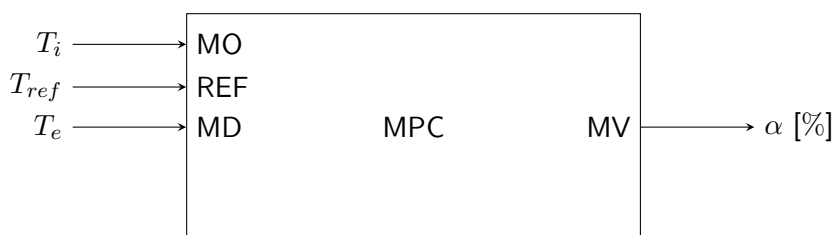
MO Measured output of the plant - a visszacsatolt jel

REF A referencijel

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) , stabilitás / 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 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 $mpc(\tau_f, T_s)$ függvénnyel létrehozhatjuk az MPC szabályzót a megadott szakaszmodellre.

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

5.1.3.1. 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. ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) Ha ezt megengedjük, a beavatkozás költsége lecsökkenhet.

5.1.3.2. 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.

5.2.0.1. 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 $^\circ\text{C}$ -os pontosság, hanem az

energiamegtakarítás. Pontosan fel kellene 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

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 víz hőmérsékletre szabályozni, annak a költsége szemléletesebb.

5.2.1.1. Súlyozás

A beavatkozó jelek és a szakasz kimenete is súlyozható, hogy azok a költségfüggvénybe mennyire szólnak 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 beavatkozási jel 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 költségfüggvényt, hogy annak az esetnek a kialakulása legyen valószínűbb.

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

5.2.2. Offline MPC - supervisory control

4.4. *Approaches without real-time dynamic optimization*² Döntési fa, affin leképezés ilyenek.

Elkészíteni az offline döntési hálót viszont nehezebb.

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 hőmérséklet-különbség lineáris függését tartalmazza és nem a Stefan-Boltzmann törvény szerinti negyedik hatvány szerintit

²Thieblemont-ból. A real-time update nélküli MPC a legegyszerűbb és a leggyorsabban kiszámolható. Gyakran más irányítási technikákon alapul.

6. fejezet

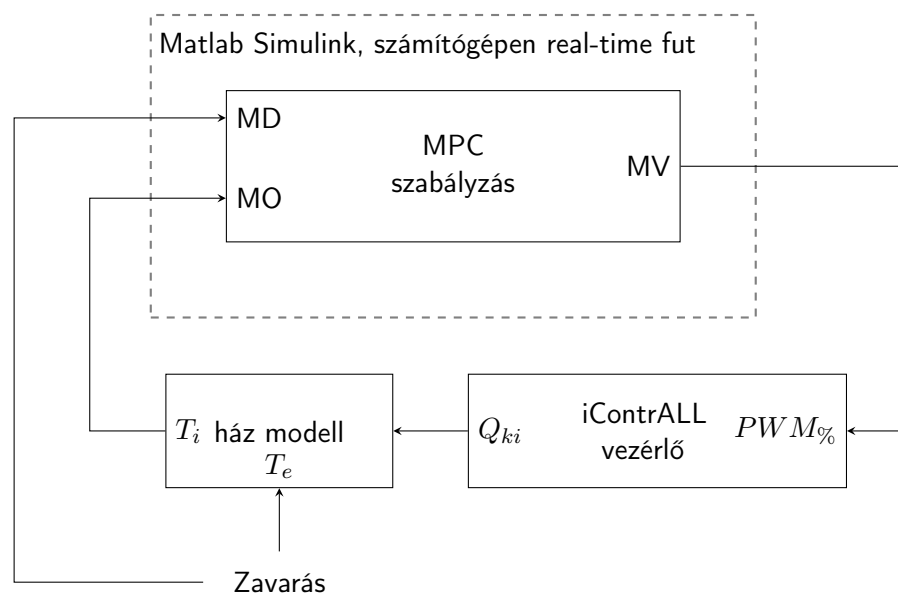
Gyakorlati megvalósítás

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 megköte-
tések, 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 beol-
vassa, az MPC-t lefuttatja, a beavatkozó jeleket pedig elküldi a beágyazott számítógépnek.



6.1. ábra. A szimulációban szereplő elemek kapcsolata

7. fejezet

További teendők, finomítások,
lehetőségek

8. fejezet

Összefoglalás

Irodalomjegyzék

- [1] Magyar joganyagok. 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet. NetJogtár. <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A0600007.TNM>.
- [2] Csoknyai István. *Több, mint hidraulika*. Herz Armatúra Hungária Kft, 2013.
- [3] Hélène Thieblemont, Fariborz Haghighat, Ryoza Ooka, and Alain Moreau. Predictive control strategies based on weather forecast in buildings with energy storage system: A review of the state-of-the art. *Energy and Buildings*, 153:485 – 500, 2017.
- [4] Alexander Schirrer, Markus Brandstetter, Ines Leobner, Stefan Hauer, and Martin Kozek. Nonlinear model predictive control for a heating and cooling system of a low-energy office building. *Energy and Buildings*, 125:86 – 98, 2016.
- [5] Tomasz Cholewa, Marian Rosiński, Zenon Spik, Marzenna R. Dudzińska, and Alicja Siuta-Olcha. 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] R.D. Watson and K.S. Chapman. *Radiant Heating and Cooling Handbook*. McGraw-Hill handbooks. McGraw-Hill, 2002.
- [8] Aliihsan 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.