



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 Intelligens Épületelektronika Kft.

Korszerű fűtési rendszerek szabályozása

ÖNÁLLÓ LABORATÓRIUM

Készítette
Gyulai László

Belső konzulens
dr. Kiss Bálint

Külső konzulens
Kurbucz Máté

2019. május 15.

Tartalomjegyzék

1. Szabályzó kiválasztása és analízise	1
1.1. Elvárások a szabályozás teljesítményével szemben	3
1.2. A létrehozott MPC tulajdonságai	3
1.2.1. Módosítások az MPC-ben	4
1.2.2. Az MPC költségfüggvénye	4
1.2.3. Fejlesztési lehetőségek a szabályozással kapcsolatban	5
2. Önálló labor munka	6
2.1. Költségek figyelembe vétele	6
2.2. Komfort figyelembe vétele	6
2.2.1. Kritérium a szabályozásra	7
2.2.2. Hőérzetbeli különbségek	7
3. Tesztek laborkörülmények között	8
3.1. A kísérleti rendszer	8
3.2. A Simulink konfigurálása	9
3.3. Szabályozótervezés az identifikált modellre	9
3.3.1. Mintavételi idő és predikciós horizont	10
3.3.2. A szabályozó költségfüggvénye	11
4. Gyakorlati megvalósítás lehetőségei	16
4.1. Technikai feltételek	16
4.2. Piaci lehetőségek	16
5. Összefoglalás	18

1. fejezet

Szabályzó kiválasztása és analízise

A fejezetben a Simulinkben átviteli függvényre megtervezem a szabályozást. A szabályzó választásakor világossá vált, hogy egy egyszerű PID típusú szabályozás nem képes a rendszert jól kezelni. Igaz, hogy a PID közismert és az iparban egyszerűsége miatt széles körben használt, de épületgépészeti alkalmazásnál egy szabályozás 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) szabályozást használnak [9]. Ehhez szükség van a szakasz modelljére, ami alapján a szabályzó szimulálhatja a szakasz kimenetét. Az MPC egy beavatkozási kiadása előtt több mintavételi perióduson, egy predikciós horizonton keresztül fut le, minden lehetséges beavatkozási sorozatra a kimenetet szimulálva. Ezen sorozatok közül a legjobbat kiválasztja és egy lépést végrehajt. Ezután a szimuláció újratekintődik. A végrehajtott, adott horizonton optimális beavatkozási jelet egy költségfüggvény minimalizálásával kapja. A költségfüggvényben különböző eltéréseknek vagy abszolútértékeknek különböző súlyok lehetnek.

A szabályozás 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 eltér.

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

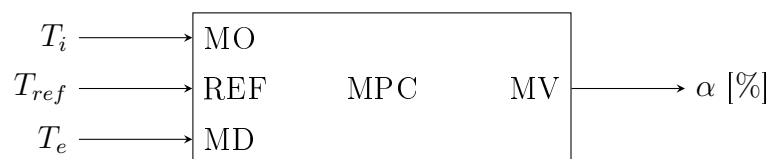
¹Mást tekintünk jó szabályozásnak egy tisztatérben, egy irodában, vagy egy nagyelődóban, hiszen mások a felmerülő igények, és így a kritériumok is.

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-szabályozás közötti különbség komfortban aligha érezhető.



1.1. 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	szabályozási 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
SF	scale factor	skálázási tényező

1.1. 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.

Elvárások a szabályozás teljesítményével szemben

Az MPC hangolása során lépésről 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 szabályozás költségfüggvényében,
4. hozzá kell adni a Simulink modell saját változói közé (Model workspace) a szabályozót 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 szabályozót a megadott szakaszmodellre.

A létrehozott MPC tulajdonságai

Az `mpc()` függvény még nem azonnal használható szabályozót. 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 szabályozás megváltozott paraméterekkel is működött a Simscape hálózatra, a referenciakövetés minősége megmaradt.

Módosítások az MPC-ben

A súlyozást módosítva adhatunk költséget a beavatkozásnak, csökkentve így például annak a frekvenciáját. Ez a referenciakövetést rontja, de esetünkben nem cél a tized °C-os pontosság, hanem az energiamegtakarítás. Pontosán fel kellene ezért írni a forintosított költségét a beavatkozásnak, és ezt minimalizálni. Ez viszont egy összetett kapcsolat és jelentősen függ az épületgépészettől. Így általánosan fogom a paraméterváltozások hatásait vizsgálni.

Az MPC költségfüggvénye

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. Ez után a szabályozási horizontnak megfelelő számú beavatkozást végez, nem adja ki a teljes sorozatot.

Agachi [10] szerint:

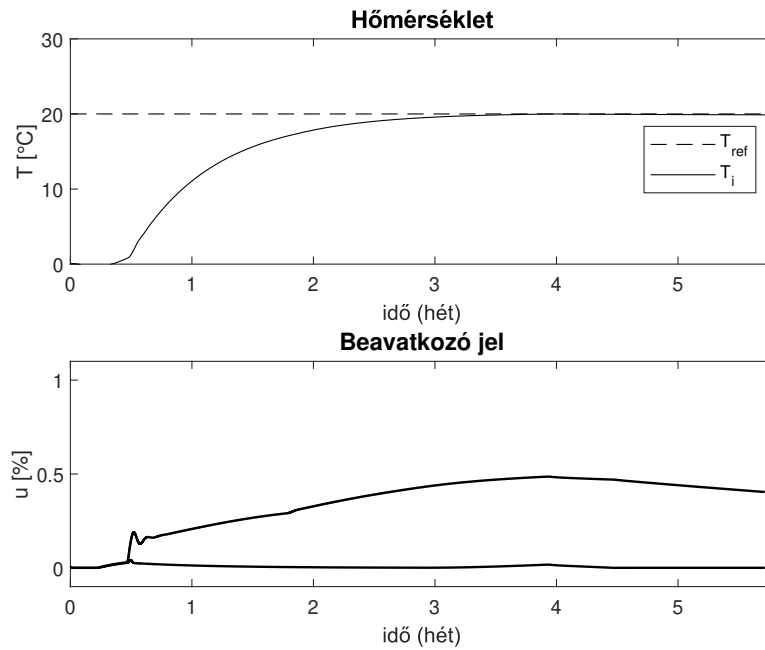
$$J = \sum_i^p (w_u \Delta u^2 + w_e (r_i - y_i)^2) \quad (1.1)$$

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 belül³.

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

³A jövőbeli változásokat ismerhetjük, ha van egy referenciajelünk, vagy lehet becslés rá egy időjárás-előrejelzés.

Bővebben az elmélettről: <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>



1.2. ábra. *A zárt szabályozási kör ugrásválasza*

A fenti ábrán látható a helyesen súlyozott MPC-vel a zárt szabályozási kör viselkedése. Ebben vannak tökéletlenségek, ezekre a fizikai modellnél térek majd rá. A szabályozó paraméterei az alábbi táblázatban láthatók.

T_s	1800 s
p	50 minta (25 óra)
c	1
w_u	0.005
$w_{\Delta u}$	50
w_y	20
SF	30

1.2. táblázat. *MPC szabályozó paraméterei*

Fejlesztési lehetőségek a szabályozással kapcsolatban

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

2. fejezet

Önálló labor munka

A munka során célul tűztem ki, hogy gyakorlatban használható, a felmerülő igényeket jobban kielégítő szabályozást állítsak fel.

Számos szempont merülhet fel,

A korábban identifikált lineáris modellt használtam fel

Költségek figyelembe vétele

A fűtés energiaköltségét legkönnyebben az összes felhasznált energia mennyiségéből kaphatjuk meg. Ezen kívül célszerű még megvizsgálni a maximális teljesítményigényt is (peak demand), illetve az energiaátalakítás teljesítményszintektől függő hatásfokát.

A csúcsidőszakban lecsökkent teljesítményigény különösen előnyös lehet akkor, ha a tarifák ebben az időszakban magasabbak.

A helyiség Simscape modelljéből ki lehetett vezetni a ténylegesen leadott hőmennyiséget, amiből már meg lehet állapítani a forintosított költségeket.

Komfort figyelembe vétele

A szabályozás ezen minőségi jellemzője a hibajellel arányos. Ennek átlaga egy referenciától mért átlagos eltérést ad, abszolút integrálva a hibát pedig kiválaszthatjuk a zavarokra minimális hibával működő szabályozást.

Kritérium a szabályozásra

Előírt tartományban kell a hőmérsékletnek maradnia (lásd szabvány ill. ETH Zürich).

Hőérzetbeli különbségek

Az időjárás-előrejelzések is megadnak hőérzetet a napsütés, szél függvényében. Napos időben és szélcsendben melegebbnek tűnik az idő: hasonlóan kijelenthető, hogy sugárzó fűtések használatával a levegő hőmérséklete alacsonyabban is tartható ugyanakkora komfort eléréséhez.

Ezért célszerű T_{AUST} -t is megvizsgálni.

Zavarelnyomás

3. fejezet

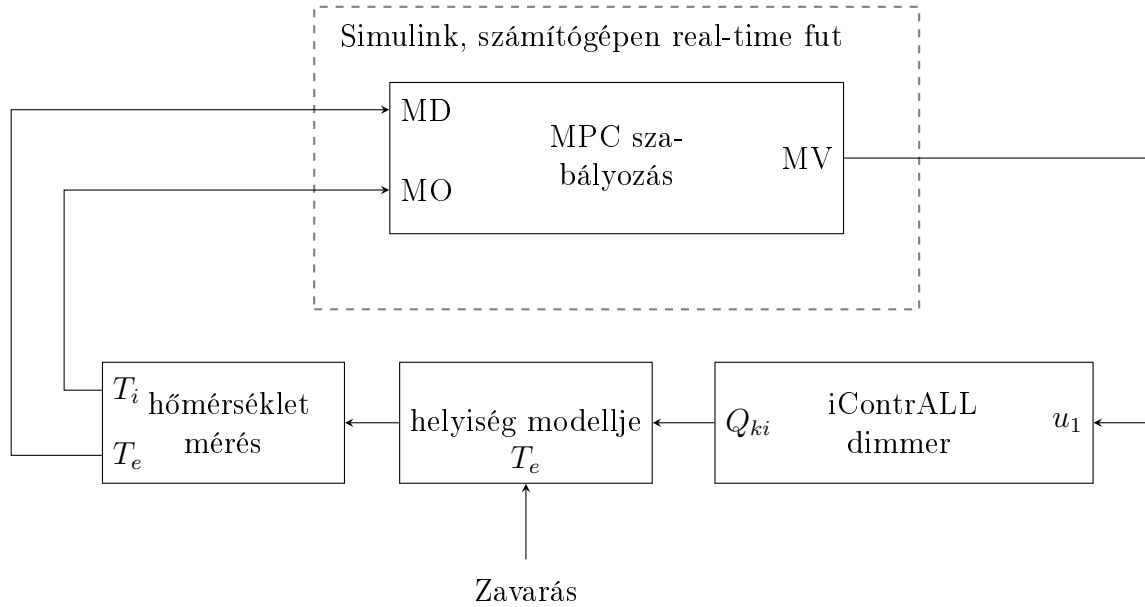
Tesztek laborkörülmények között

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.



3.1. ábra. A doboz belseje hőmérővel és szabályozható izzókkal



3.2. ábra. *A valós idejű mérések szereplői*

A Simulink konfigurálása

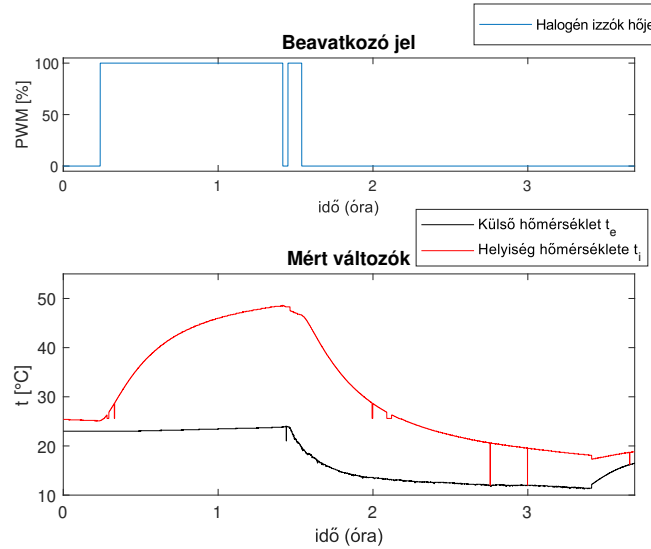
A valós idejű futáshoz Simulink Real-time szükséges. A real-time működés itt azt jelenti, hogy a szabályozót a Simulink mintavételi időnként futtatja le. Azaz ha a kísérleti rendszerre 30s-es mintavételi idejű szabályozót tervezek, akkor az MPC félpercenként mintát fog venni a hőmérsékletekből és ki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

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

Szabályozótervezés az identifikált modellre

Mivel a kísérleti rendszeremnek nincsen energetikai tanúsítványa, identifikáltam az ugrásválaszával (3.3. ábra).

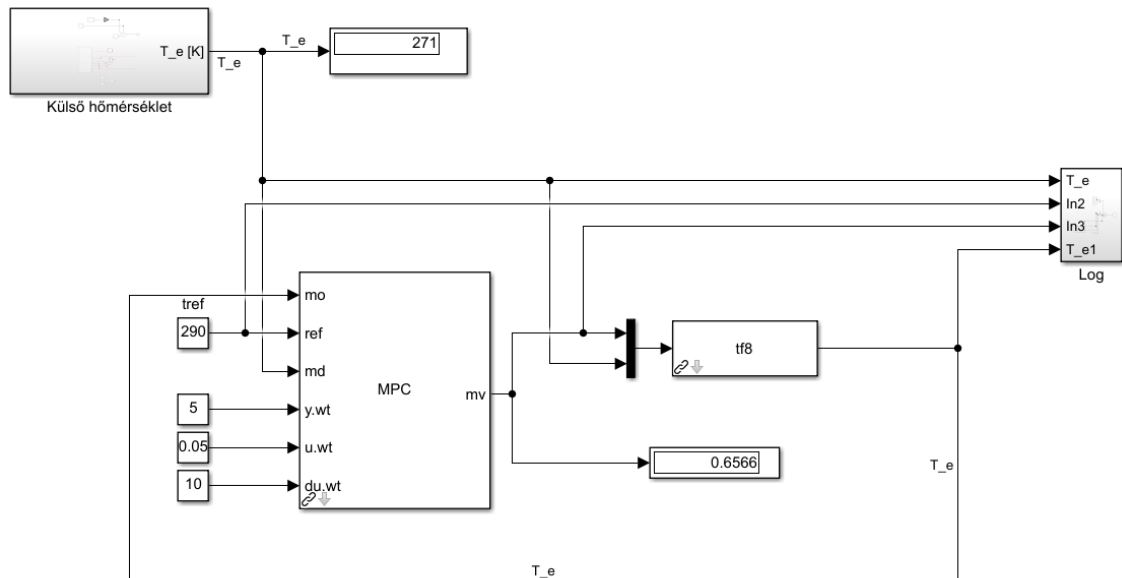
A valós idejű méréshez használni kívánt szabályozót érdemes először szimulációban megvizsgálni. Ekkor adott a szabályzott szakasz identifikált lineáris modellje, az MPC-t pedig létrehoztam a modellhez az előző fejezet szerint. Az ott felmerülő nehézségeket, problémákat a fizikai rendszeren szerzett tapasztalatok miatt sikerült megoldani. A Simulinkben a tervezés a 3.4. ábra szerinti elrendezésben történt, használva az MPC szabályozás közbeni (online) hangolásának lehetőségét.



3.3. ábra. Identifikációhoz használt mérési adatsor

Mintavételi idő és predikciós horizont

Az MPC paraméterezésére *Agachi [10]* könyvében találhatóak ajánlások. A predikciós horizontot eszerint úgy kell megválasztani, hogy az a szakasz releváns dinamikáját lefedje. Mivel a felfutási ideje a kísérleti rendszernek körülbelül 1 óra, ezért ezt ekkorra 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 másodpercnek vettem.



3.4. ábra. Lineáris modellre MPC szimulációja

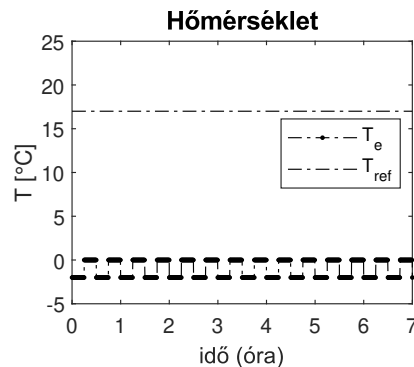
A fentiek mellett viszont a szabályozó nem adott ki beavatkozójelet egészen egy predikciós horizontnyi ideig, azaz majdnem 1 órán keresztül¹. Az MPC képes a költségfüggvényben figyelembe venni a predikciós horizonton belül a referenciajel jövőbeli változásait (ez a *Signal Previewing*), ezt kipróbáltam 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 állapotterres szakaszmodelljének² becsült állapotára, a zavarjel becsült értékére, a zaj becsült értékére (ez esetben üres vektor), a legutóbbi beavatkozójelre és egy kovarianciamátrixra (ezt nullmátrixnak vettem).

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.

A szabályozó költségfüggvénye

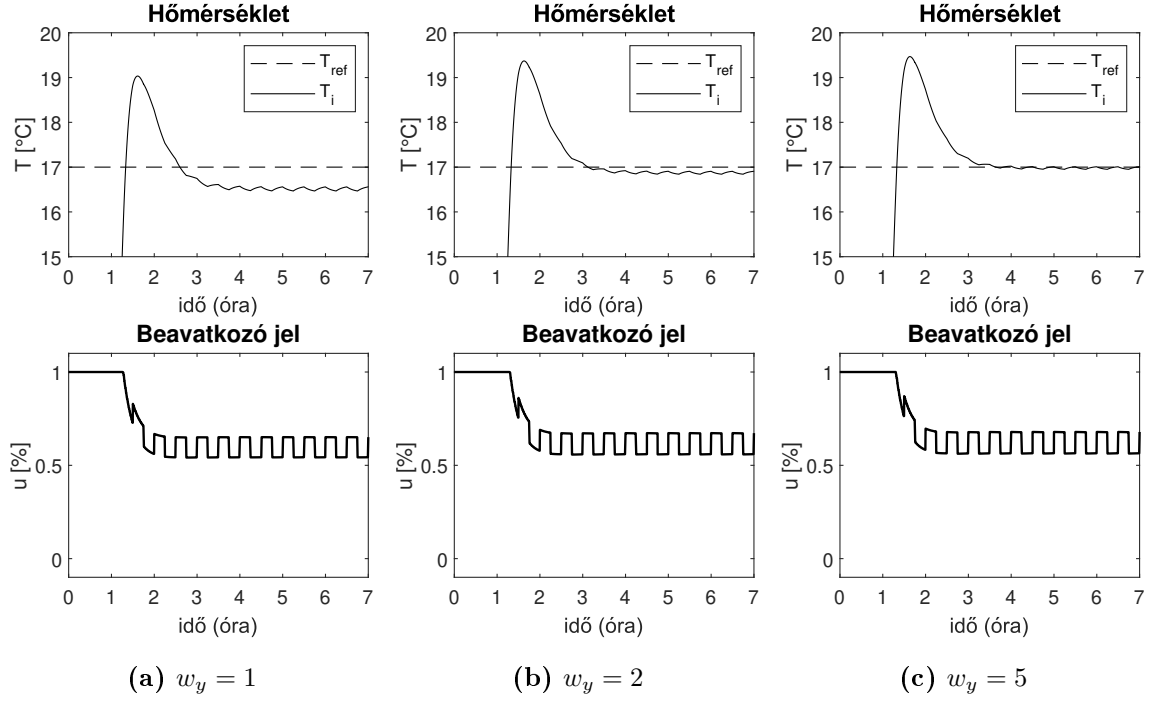
A költségfüggvény súlyait iteratíván választottam ki. A paraméterek akár a szabályozó futása közben is módosíthatók, hatásuk azonnal látható. Először a referencia-követést leginkább befolyásoló w_y paramétert állítottam be.



3.5. ábra. Referenciajel és zavarás a szimuláció során

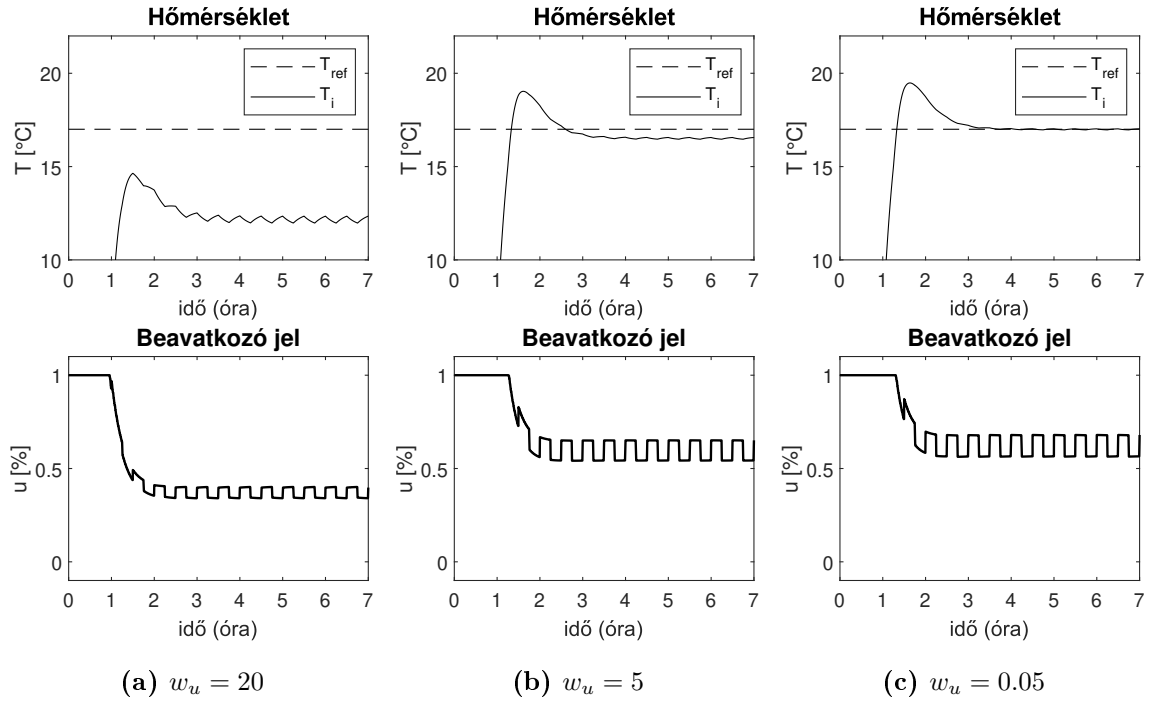
¹Ha 300 másodperces mintavételi időt használtam és 10 mintányi predikciós horizontot, ugyanez volt a helyzet. Ez idő alatt az MPC valószínűleg az állapotbecslőjét inicializálja.

²Amikor az MPC-t létrehozzuk, a szakaszmodellt a Matlab állapotterressé alakítja.



3.6. ábra. MPC viselkedése különböző w_y értékekre

A 3.6c. ábrán látható esetben volt a legjobb a referenciakövetés, így ezt a paramétert rögzítettem. Következőnek a w_u paraméter értékét választottam meg. Ez a beavatkozójel nagyságát bünteti.

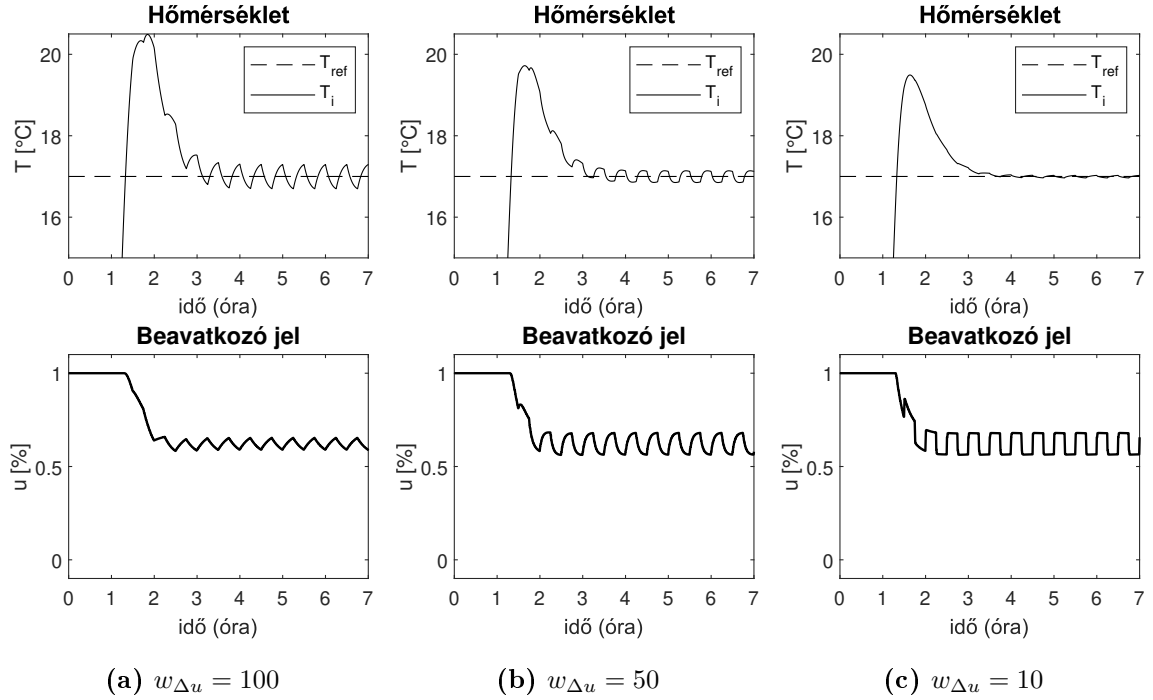


3.7. ábra. MPC viselkedése különböző w_u értékekre, $w_y = 5$ mellett

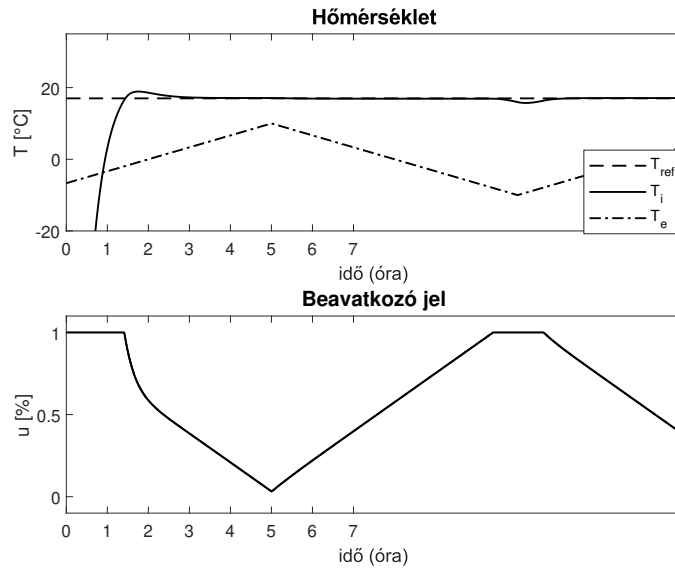
A 3.7. ábrán látható, hogy nagy súly a költségfüggvényben lecsökkent beavatkozó-

jelet, és így nagy követési hibát okoz. A két felsorolt paraméter valójában egymás ellenében hatnak³.

A beavatkozást kevésbé büntettem, így a referenciakövetés megmaradt, viszont a túllövés lecsökkent. Most már két fix paraméter mellett választottam súlyt a beavatkozási jelel változási sebességéhez.



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

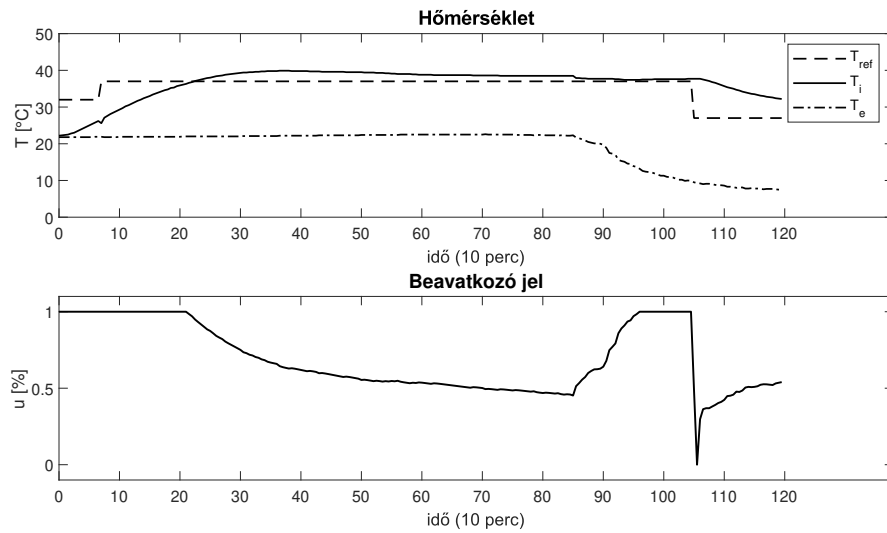


3.9. ábra. A zárt szabályozási kör ugrásválasza

³Bővebben a paramétereikről: <https://uk.mathworks.com/help/mpc/ug/tuning-weights.html>

A 3.8. ábrán jól megfigyelhető, hogy nagy súly esetén a beavatkozójel frekvenciája lecsökken⁴. Ez az épületgépészeti rendszerekben alacsonyabb energiafelhasználással járhat. Ám a három esetben különböző mértékű lengés tapasztalható állandósult állapotban: ezek közül az igényeknek, illetve a specifikációnak megfelelőt kell kiválasztani. A zavarelnyomást megvizsgáltam nagyobb tartományban változó külső hőmérséklettel is, ez látható a 3.9. ábrán.

A szabályzót kipróbáltam a kísérleti rendszeren is, a 3.2. ábra szerinti elrendezésben. A pontozott vonal a doboz környezeti hőmérséklete, a csökkenést az ablak kinyitásával értem el. A külső hőmérséklet 85 perc környékén 23 °C-ról csökkenni kezdett egészen 8 °C-ra, de az MPC már a zavarás kezdetekor megnövelte a beavatkozó jelét és tartotta a referencia értéket.



3.10. ábra. Mérés a fizikai rendszeren a behangolt MPC-vel

A tárgyaltakon felül további lehetőségek is vannak a költségfüggvények megadására. *Thieblemont és Schirrer* [11] megmutatta, hogy különösen jó eredmény érhető el MPC szabályozás és megújuló energiák kombinált használatával. A költségfüggvényekben például laza megkötéseket is lehet tenni, amik az adott jelet korlátozzák ugyan, de mégis túlléphetők - ilyenek egy napelemes rendszernél könnyen előfordulhatnak. Ekkor a laza felső korlát lehet a napelemes rendszer teljesítménye, de ezen felül is lehet energiát felhasználni a hálózatról.

Szintén *Thieblemont* [12] készített felmérést az időjárás-előrejelzéssel kombinált MPC használatáról. (Itt a már korábban említett Signal Previewing funkció használatos

⁴A beavatkozás alaphfrekvenciáját a 3.5. ábra szerinti zavarjel adja, viszont a felfutás sebessége a $w_{\Delta u}$ paramétertől függ.

a jövőbeli bemenetek becsléséhez.) Az itt olvasható tapasztalatok és a bemutatott módszerek iránymutatást adhatnak a jövőbeni fejlesztésekhez.

4. fejezet

Gyakorlati megvalósítás lehetőségei

Technikai feltételek

A legfontosabb technikai követelmény egy arányos szelep, ami a tömegáramot automatikusan, emberi beavatkozás nélkül képes befolyásolni. Ilyen például a Herz 7990¹, *Csoknyai* [7] könyvében szerepelnek a Herz cég gépészeti termékei.

A Simulinkből történő hőmérsékletméréshez nagyon sok fejlesztésre volt szükség az iContrALL központi egységén. A rendszerbe való további integrációhoz ki kell dolgozni egy jobban skálázható megoldást (több hőmérő részére), ami meglehetősen időigényes. Ráadásul a hőmérők egyelőre egy külön központi egység közbeiktatásával kommunikálnak, ami nem teszi rugalmassá a használatot. A beavatkozó jelek kiadása hasonló megfontolásokat igényel, integrációja ennek is időigényes.

Annak tehát, hogy egy helyiségenkénti hőmérséklet-szabályozás működjön, számos előfeltétele van. A felsoroltak pedig mind szoftveres, mind hardveres fejlesztéseket, beruházásokat igényelnek.

Piaci lehetőségek

A félévben lehetőségem volt az épületgépészettel gyakorlatban is találkozni, így jobban meg tudtam ítélni a bemutatott módszer piacképességét.

Ebben 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

¹A szelep adatlapja: http://herzmediaserver.com/data/01_product_data/01_datasheets/eng/7708-7990_en.pdf

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 nélkül², egy kész rendszerre is használható-e egy MPC szabályozás.

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.

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. (Ezek pontos típusát nem tudom, de valószínűleg kétállásúak, és nem folytonosan szabályozhatók.) 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 a látottak alapján nem áll rosszul a piac, de ahhoz, hogy egy összetett szabályozásra költsenek egy épület tervezői, garanciát kellene adni az így elérhető megtakarításokra, amiket LEED vagy WELL tanúsítványokban extra pontokkal értékelnek.

²Azok 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 nyúlnak hozzá.

5. fejezet

Összefoglalás

A félév során egy olyan témakörrel foglalkoztam, amihez szükség volt az alapképzés során szerzett összes rendszer- és irányításelméleti tudásra. Kellő hálózatelméleti szemlélettel az épületfizikai összefüggéseket szinte egy betűcserével be lehetett fogadni, hiszen a jelenségek analógok az elektromos hálózatokkal.

Számos tapasztalattal lettem gazdagabb a szabályozásokkal kapcsolatban is, a kutatómunka során rengeteg forrást áttekintettem. A tématerületbe való betekintés motivációt ad a mesterképzés tárgyaihoz is, mivel már ismerem az ilyen típusú szabályozók egyes gyakorlati alkalmazásait.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm a segítséget és a motivációt konzulenseimnek, szüleimnek, munkatársaimnak. Az épületbejárás szervezéséért köszönet a BME Építész Klubnak.

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] 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] Csoknyai István. *Több, mint hidraulika.* Herz Armatura Hungaria Kft, 2013.
- [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] Paul Agachi, Zoltan Kalman Nagy, Vasile Cristea, and Arpad Imre-Lucaci. *Model Based Control - Case Studies in Process Engineering*. 11 2006.
- [11] 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.
- [12] 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.