



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.

# Modell prediktív fűtésszabályozás alkalmazási lehetőségei

ÖNÁLLÓ LABORATÓRIUM

*Készítette*  
Gyulai László

*Belső konzulens*  
dr. Kiss Bálint

*Külső konzulens*  
Kurbucz Máté

2019. május 20.

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b>	<b>1</b>
1.1. Motiváció . . . . .	1
1.2. A modell . . . . .	1
1.3. MPC áttekintés . . . . .	2
1.3.1. Az MPC költségfüggvénye . . . . .	3
<b>2. Költség- és komfortoptimum elérése</b>	<b>5</b>
2.1. OptiControl projekt . . . . .	5
2.2. Peak demand csökkentése . . . . .	5
2.2.1. Signal Preview . . . . .	5
2.2.2. Súlyozás módosítása . . . . .	6
<b>3. Szimulációs eredmények</b>	<b>8</b>
3.1. Költségek figyelembe vétele . . . . .	9
3.2. Komfort figyelembe vétele . . . . .	10
3.2.1. Hőérzetbeli különbségek . . . . .	10
3.3. Súlyozás további hangolása . . . . .	11
<b>4. Összefoglalás</b>	<b>13</b>

# 1. fejezet

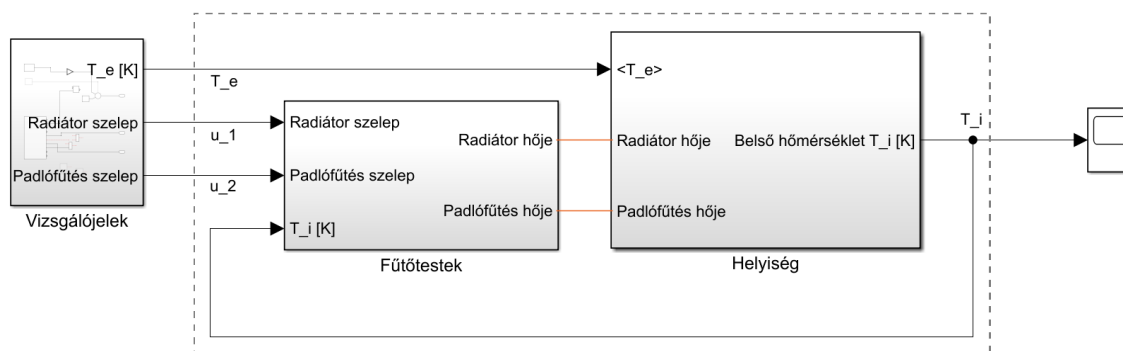
# Bevezetés

## Motiváció

A szakdolgozatban elkezdett munkát folytatva a cél az ottani MPC szabályozás finomhangolása, továbbfejlesztése volt. A felállított Simulink modellen a szabályozást kvantitatíven vizsgáltam meg, koncentrálna a költségek és a komfort közötti egyensúlyra.

# A modell

A korábbiakban használt *fűtési rendszer modelljét* nem változtattam meg, viszont a modellből kivezetve mértem a pillanatnyi hőleadást. Így megkaptam a hőmennyiségeket, amik a beavatkozás forintosított költségével arányosak.



**1.1. ábra.** *Fűtési rendszer modellje - fűtőttest és helyiség*

Adott környezeti hőmérséklet és belső hőmérséklet (alapjel) mellett ez az energia-mennyiség azonos volt, mivel a helyiség hőveszteségei csak ennek különbségétől függ-

nek. Az energiamegtakarítást tehát nem itt kell keresni, hanem a primer energia felhasználásánál. Ennek okai a következők:

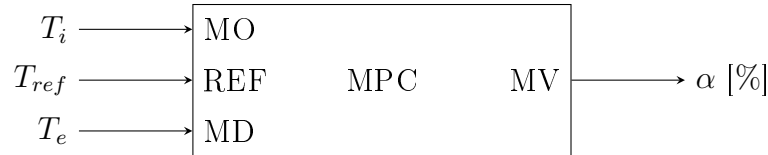
Az alacsony hőmérsékletű (sugárzó) fűtések, pl. a padlófűtés használata gazdaságosabb lehet a hagyományos radiátoros fűtésekénél a megújuló használatával. Ugyannyi leadott energia így olcsóbb ilyen rendszerekkel<sup>1</sup>, emellett pedig jobb hőérzetet biztosítanak.

A modellben a kétféle fűtőtesthez két külön beavatkozó jel tartozik, mely a két szelep kinyitásának mértéke. A beavatkozók dinamikája is eltér, a prediktív irányítás ezt figyelembe véve tud egy egyensúlyt találni.

A csúcsterhelés csökkentése számos előnnyel jár. Szakaszos üzem helyett folyamatos teljesítményigény esetén a megújuló források előnyösebben hasznosíthatók.

## MPC áttekintés

A modell-prediktív szabályozást alapjaiban a szakdolgozatomban mutattam be. A szabályozó, illetve a zárt szabályozási kör blokkvázlata és a rövidítések magyarázata szerepel az alábbiakban. [2] alapján



**1.2. ábra.** Az MPC be- és kimenetei

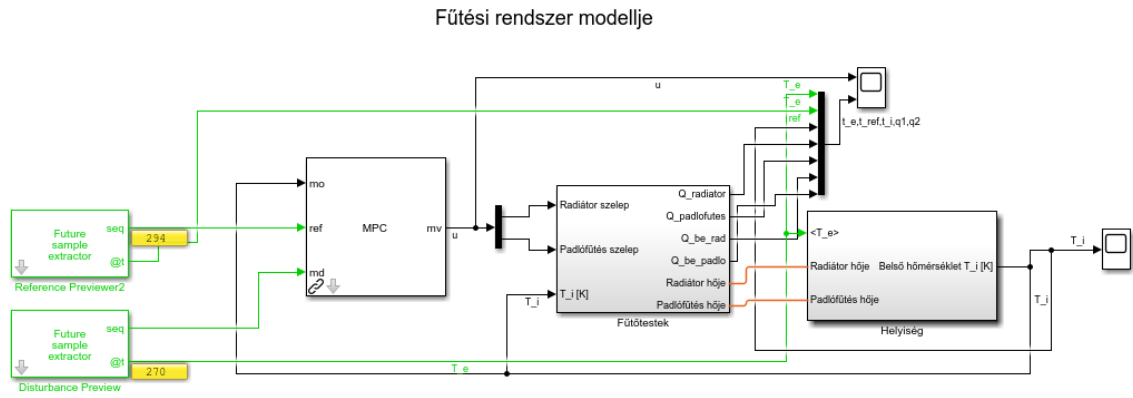
MPC	model predictive control	modell-prediktív szabályozás
MO / OV	measured output, output variable	mért kimenet (szabályzott jellemző)
MD	measured disturbance	mért zavarás
MV	manipulated variable	beavatkozó jel
REF	reference signal	referenciajel
$T_s$	sampling time	mintavételi idő
p	prediction horizon	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

<sup>1</sup>Sugárzó fűtésekkel kevesebb primer energia szükséges a jobb hatásfok, kisebb veszteségek miatt.

A kiindulási MPC-t már létrehoztam az alábbi lépésekkel:

1. a 2 bemenetű, 1 kimenetű szakaszt identifikáltam átviteli függvényével
2. létrehoztam az MPC-t a megfelelő mintavételi idővel, beállítottam a jelek fizikai korlátait, illetve a skálázást. Az MPC két beavatkozó jele a modell 2 szelepének nyitására tartozik.
3. Simulinkben futtatam a szimulációt, Scope használatával mentve az adatokat az analízishez



1.3. ábra. Szabályzó szimulációja Simulinkben

## 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 [3] 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 belül.

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

## 2. fejezet

# Költség- és komfortoptimum elérése

### OptiControl projekt

Az ETH Zürich kutatássorozata, az OptiControl [1] (2007 és 2013 között) a prediktív irányítások használatát vizsgálta és tesztelte irodaépületeken. Az egyetem mellett a Siemens mérnökeit és más partnereket is bevontak. A projektből számos ötletet merítettem, és szimuláltam ezeket a Simulink környezetben.

A projektben MPC szabályozás és RBC (Rule Based Control) performanciáját vetették össze.

Az általuk használt MPC modell meglehetősen részletes: figyelembe veszi a napsütés, illetve az irodában használt elektromos fogyasztók hatását is.

A projekt összefoglalója egy szabályzóval hasonlítja össze a hagyományos megoldásokat, én viszont arra voltam kíváncsi, hogy az általuk használt stratégiák mennyiben befolyásolják az MPC viselkedését.

### Peak demand csökkentése

#### Signal Preview

A prediktív szabályozókban lehetőség van arra, hogy a predikciós horizonton belül a szabályozó figyelembe vegye a referenciajel jövőbeli változását, illetve a mérhető zavarások várható értékét. (Erre previewing vagy look-ahead néven szokás hivatkozni.)

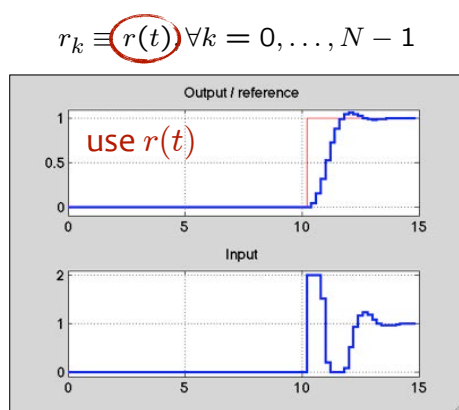
Erre abban az esetben van lehetőség, ha például elő van írva a napi hőmérséklet alapjel, ahogyan ez megtehető egyszerű programozható termosztátoknál is, amelyek egyszerű RBC (Rule Based Control) elven kapcsolnak be vagy ki.

Időjárás-előrejelzést figyelembe véve pedig a külső hőmérséklet értékére adható becslés, ami tovább csökkentheti az energiafelhasználást: Ha a szabályozó csak a pillanatnyi zavarás értékét ismeri, akkor ennek megváltozásakor a referenciajel is hirtelen megváltozhat. Amennyiben a szabályozó a zavarás becsült értékét előre ismeri, optimalizálni tudja az energiafelhasználást. Ha például a külső hőmérséklet hirtelen emelkedik, akkor könnyen túlmelegedhet a helyiség, felesleges energiafogyasztást eredményezve.

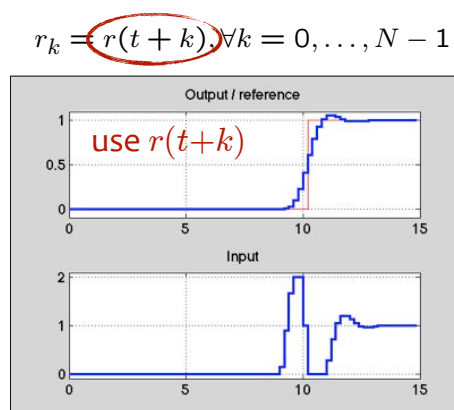
## ANTICIPATIVE ACTION (A.K.A. “PREVIEW”)

$$\min_{\Delta U} \sum_{k=0}^{N-1} \|W^y(y_{k+1} - r_{k+1})\|^2 + \|W^{\Delta u} \Delta u(k)\|^2$$

- Reference **not known** in advance (causal):



- Future reference samples (partially) **known** in advance (anticipative action):



Same idea also applies to reject **measured disturbances** entering the process

2.1. ábra. Signal previewing hatása (forrás: [4])

## Súlyozás módosítása

A költségfüggvényben a beavatkozónak különböző súlyokat rendelhetünk, ezzel szintén korlátozhatók a beavatkozó jelek.

A csúcsidőszakban csökkenthető a teljesítményigény, ha a tarifákidőben változnak. Ez elérhető például a súlyok futás közbeni módosításával.



Ezt vizsgálták az *OptiControl projektben* [1] is, kora reggel és késő este alacsonyabb tarifát feltételezve. (A TABS jelenti a padlófűtést, a Ventilation pedig a légfűtést.)

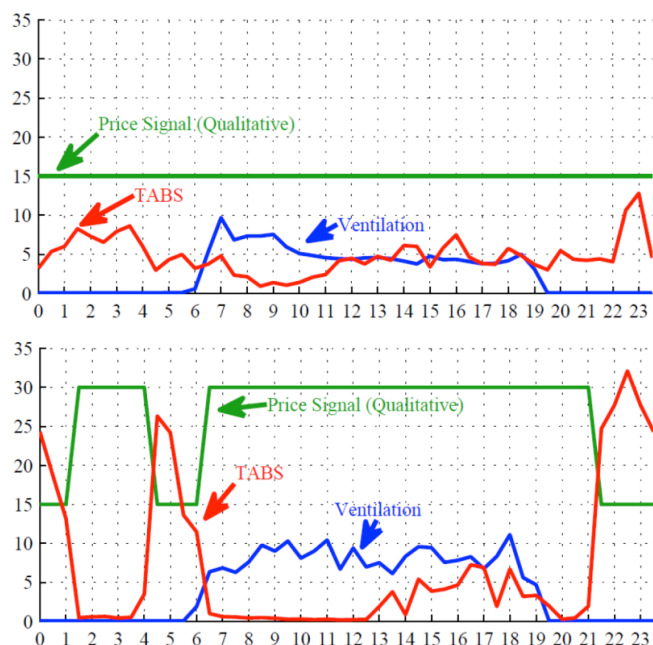


Figure 6-1: Average diurnal cycles of imposed MPC price signals and of measured average specific heating power (in  $[W/m^2]$ ) for TABS and ventilation from the target building. The horizontal axis shows the hour of day. Top: reference case (November 11, 2012 to February 4, 2013); bottom: load shifting experiment (February 5 to 14, 2013).

**2.2. ábra.** *Különböző tarifák figyelembe vétele az OptiControl projektben*

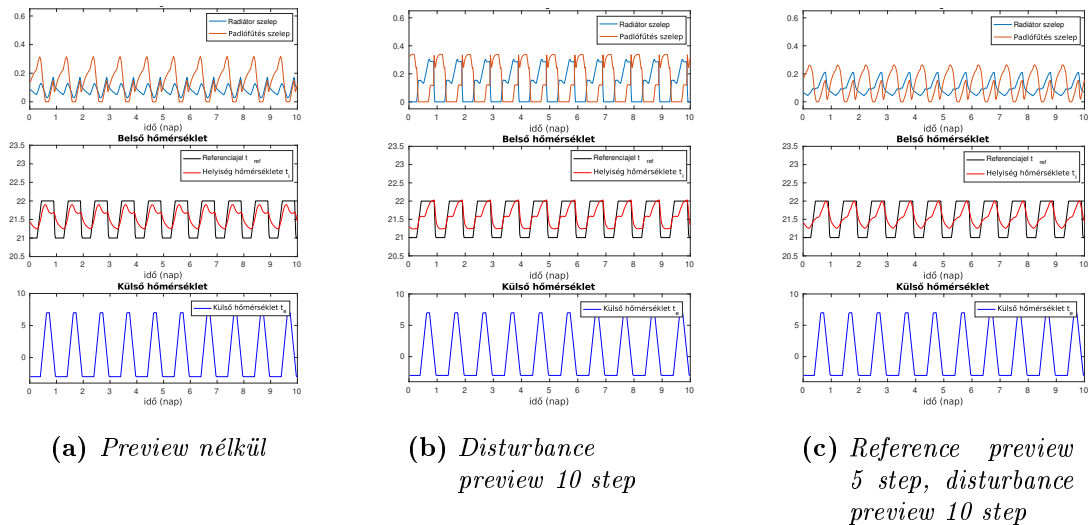
## 3. fejezet

# Szimulációs eredmények

Az alábbiakban a signal previewing hatása látható. A referenciajel nappal  $22^\circ\text{C}$ , éjszaka  $21^\circ\text{C}$  volt. A külső hőmérséklet  $-3^\circ\text{C}$  és  $7^\circ\text{C}$  között változott,  $1.8^\circ\text{C}/\text{óra}$  változási sebességgel. A referenciajel fel- és lefutása hasonlóan korlátos volt. A szimuláció blokkvázlata a preview blokkokkal a 1.3. ábrán látható.

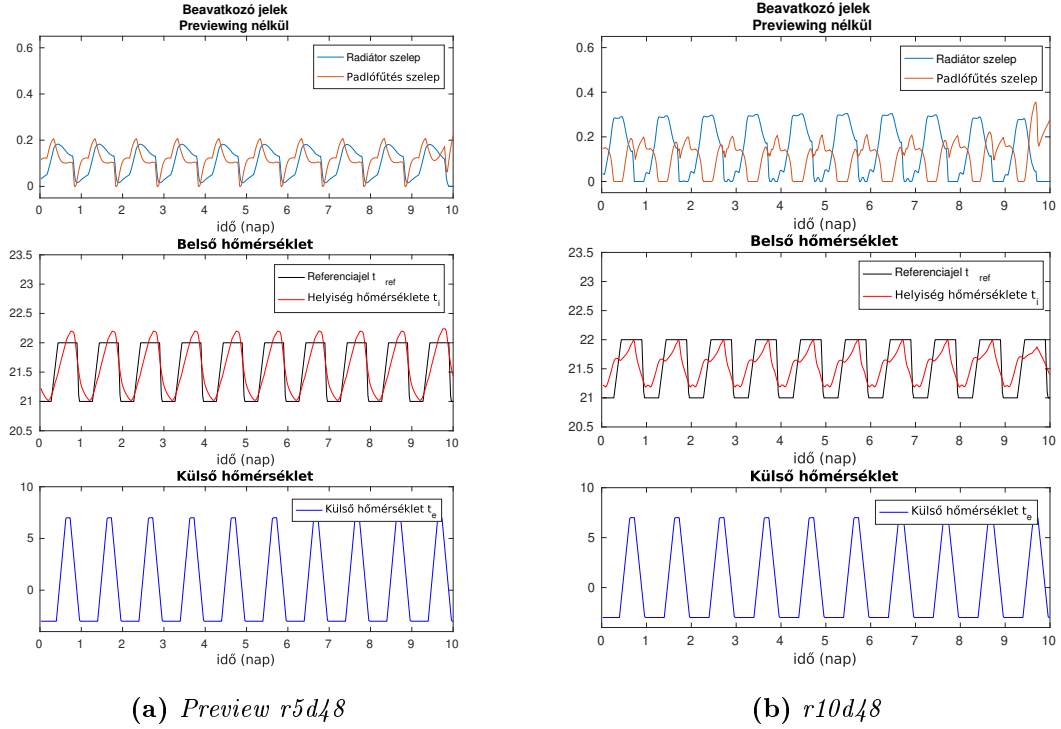
A grafikonokon a szimuláció 10 napnyi szelete látható, a nagyobb felfűtési tranziensek lecsengése után. A legfelső ábra mutatja a beavatkozó jeleket, a középső a belső hőmérsékletet, az alsó pedig a külső hőmérsékletet (mért zavarás).

Több esetet vizsgáltam: a 3.1a ábrán látható szabályozás a referenciajel és a zavarjel pillanatnyi értékét ismerte csak. A 3.1b. ábra szerinti referenciakövetés adódott, ha a zavarás értéket 5 órával előre ismertük. Ez jelentősen lecsökkentette a maximális teljesítményigényt (lásd 3.3b. ábra). A 3.1c. ábrán látható esetben a referenciajel is előre ismert volt, 2.5 órával. Látható, hogy az alapjel felfutása előtt megáll a hőmérséklet csökkenése.



3.1. ábra. MPC viselkedése – previewing hatása

Meg kell jegyezni, hogy a previewing néhány esetben egy siettetést hozott a rendszerbe, azaz még 21 °C-os alapjel volt előírva, amikor már jóval megemelte a hőmérsékletet. Ha ezeket a követési tulajdonságokat módosítani szeretnénk, érdemes a szabályozó súlyfüggvényében további módosítást végezni.



**3.2. ábra.** Szabályozók különböző singal preview-val

## Költségek figyelembe vétele

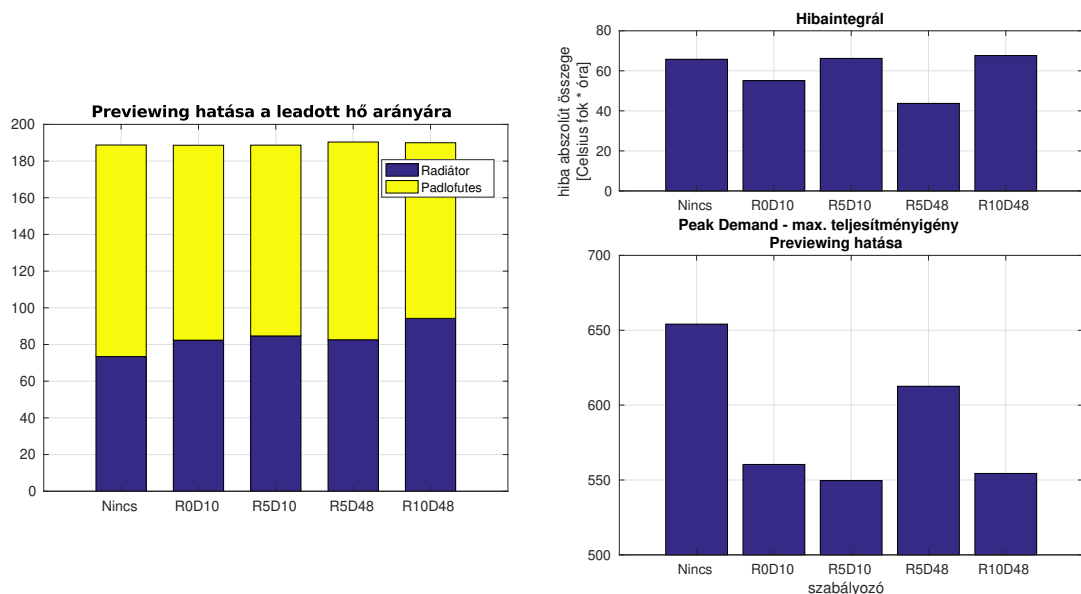
A fűtés energiaköltségét legkönnyebben az összes felhasznált energia mennyiségéből kaphatjuk meg. Ezen kívül célszerű még megvizsgálni a maximális teljesítményigényt is (peak demand), illetve az energiaátalakítás teljesítményszintektől függő hatásfokát.

A szimulációban helyiség Simscape modelljéből kivettem a ténylegesen leadott hőmennyiséget, amiből a radiátoros- és padlófűtés közötti arányra voltam kíváncsi. Abból adódóan, hogy további zavarást nem iktattam a rendszerbe, minden szabályozó beállítás mellett az összes energiafelhasználás azonos volt. Valós környezetben történő méréseknél lehetne vizsgálni azt, hogy mely konfiguráció a legelőnyösebb, ezért én csak a módszert mutatom be, ami alapján lehetséges megtalálni az ideális értéket.

## Komfort figyelembe vétele

A szabályozás ezen minőségi jellemzője a hibajellel arányos. Ennek átlaga egy referenciától mért átlagos eltérést ad (ez az állandósult állapotbeli hiba). Ha a hiba abszolút integrálját vesszük, akkor kiválaszthatjuk a zavarokra minimális hibával működő szabályozást. Ezt a mennyiséget  $K_h$ , azaz kelvinóra mértékegységben értjük.

Az alábbi ábrákon látható a költségek és komfort metrikája egyes szabályozókra, a previewing függvényében. (A rövidebb jelölésrendszer érdekében R0 jelöli, ha a referenciajelből csak az aktuális értéket ismerjük, D10 pedig azt, ha a zavarjel (disturbance) értékét 10 lépésre előre ismerjük.)



(a) Leadott hőmennyiség megoszlása a beavatkozók között

(b) "Comfort violation" (abszolút hibaintegrál) és "peak demand"

3.3. ábra. Szabályozók összehasonlítása komfort és költség szempontjából

## Hőérzetbeli különbségek

A szabályozás performanciáját tovább árnyalja, hogy azonos levegőhőmérséklet esetén is lehet különböző a hőérzetünk. Elég arra gondolni, hogy az időjárás-előrejelzések is megadnak hőérzetet is, amely napsütés esetén a ténylegesnél magasabb, szél esetén alacsonyabb lehet.

A épületekben a sugárzó fűtések magasabb hőérzetet biztosítanak, ezért a referenciajelet alacsonyabbra is lehet állítani.

## Súlyozás további hangolása

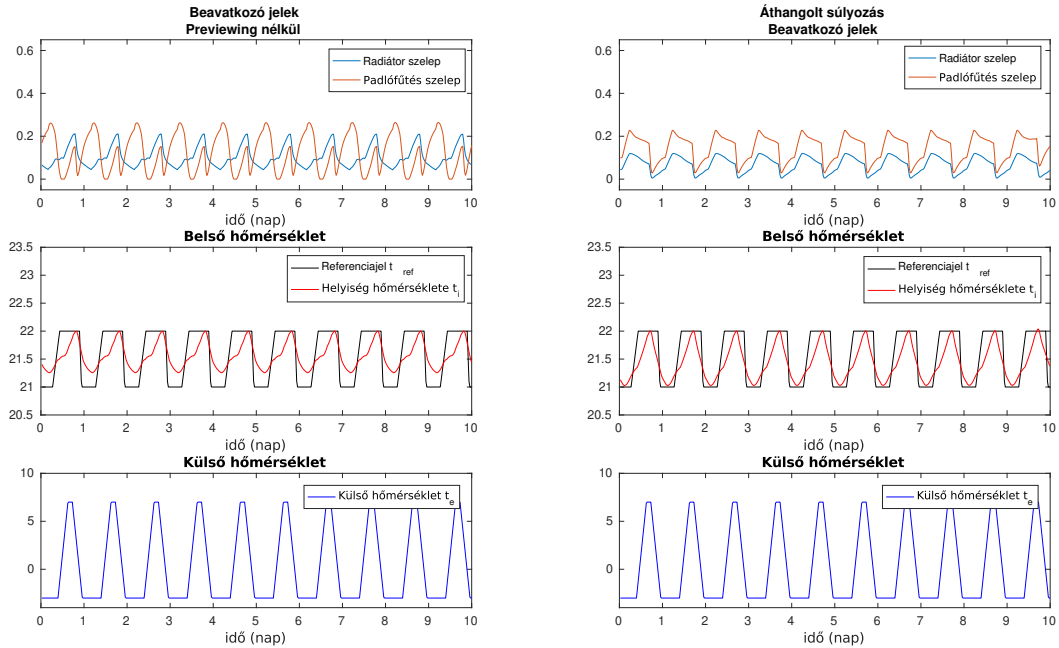
A korábbi szimulációkból látható, hogy azonos költségfüggvény esetén is más-más lesz a szabályozók viselkedése. Ezért a previewing beállítása után is szükség lehet a súlyok állítására, ezt vizsgáltam meg az alábbiakban.

Kiválasztottam a 3.3b. ábra szerint a két legalacsonyabb teljesítményigényű szabályozót. Az *R10D48* szabályozó (a previewing lépésszámából következik a jelölés, ld. az alábbi táblázat) súlyait tovább hangoltam, ez szintén leolvasható a táblázatból.

$T_s$	30 perc	
p	24 óra (48 lépés)	
c	1	
szabályozó	eredeti	súlyozott
$w_u$	[0 0]	[0.01 0.005]
$w_{\Delta u}$	[0.1 0.1]	[0.1 0.05]
$w_y$	1	1
SF	1	300 (MV,DV)
Ref. preview	5	10
Dist. preview	10	48

3.1. táblázat. MPC szabályozó paraméterei

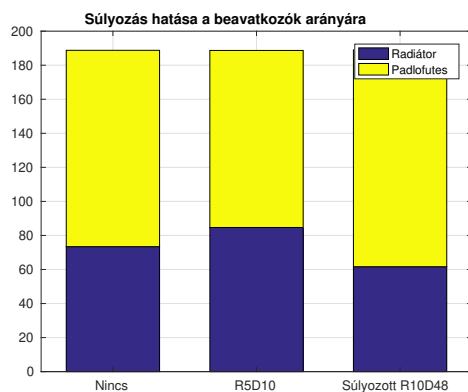
Összehasonlítható a két vizsgált szabályozó viselkedése:



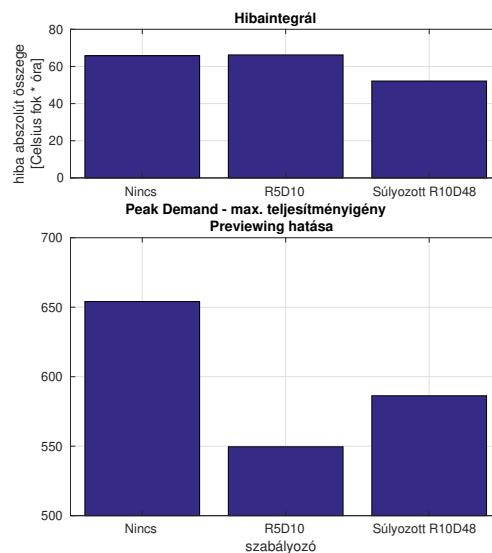
(a) Referencia 5 lépéssel, zavarás 10 lépéssel előre ismert

(b) Referencia 10 lépéssel, zavarás 48 lépéssel előre ismert, módosított súlyozással

A számszerű eredmények azt mutatják, hogy az abszolút hibaintegrált tovább tudtuk csökkenteni, és eközben (a korábbihoz képest, ld. 3.3a. ábra) jobban használtuk a padlófűtést.



(a) Referencia 5 lépéssel, zavarás 10 lépéssel előre ismert



(b) Referencia 10 lépéssel, zavarás 48 lépéssel előre ismert, módosított súlyozással

## 4. fejezet

# Összefoglalás

Az elvégzett munka célja gyakorlatban is alkalmazható MPC hangolási módszerek kipróbálása volt. A forrásaim alapján megvizsgáltam, hogy a signal previewing és a súlyozás hogyan befolyásolja a szabályozást, mind a beavatkozó jelekkel arányos költségeket, mind az alapjelkövetéssel arányos komfortot.

Azt hiszem, hogy ezeket a módszereket a gyakorlatban is ki lehet használni és a hagyományos megoldásoknál alacsonyab energiafelhasználást lehet elérni.

# Irodalomjegyzék

- [1] Dimitrios Gyalistras et al. Markus Gwerder. Final Report: Use of Weather And Occupancy Forecasts For Optimal Building Climate Control – Part II: Demonstration. [https://opticontrol.ee.ethz.ch/Lit/Gwer\\_13\\_Rep-OptiCtrl2FinalRep.pdf](https://opticontrol.ee.ethz.ch/Lit/Gwer_13_Rep-OptiCtrl2FinalRep.pdf), 2013. [Online].
- [2] Alberto Bemporad, N. Lawrence Ricker, Manfred Morar (MathWorks). Model Predictive Control Toolbox<sup>TM</sup> Reference. [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/mpc/mpc\\_ug.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/mpc/mpc_ug.pdf), 2019. [Online].
- [3] Paul Agachi, Zoltan Kalman Nagy, Vasile Cristea, and Arpad Imre-Lucaci. *Model Based Control - Case Studies in Process Engineering*. 11 2006.
- [4] Alberto Bemporad). Course on Model Predictive Control (IMT Lucca). [http://cse.lab.imtlucca.it/~bemporad/teaching/mpc/imt/1-linear\\_mpc.pdf](http://cse.lab.imtlucca.it/~bemporad/teaching/mpc/imt/1-linear_mpc.pdf), 2019. [Online].