



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Irányítástechnika és Informatika Tanszék

iContrALL

Korszerű fűtési rendszerek szabályzása - kismargós munkapéldány

SZADOLGOZAT

Készítette

Gyulai László

Belső konzulens

dr. Kiss Bálint

Külső konzulens

Kurbucz Máté

2018. november 7.

Tartalomjegyzék

1. Modellalkotás, irodalomkutatás	3
1.0.1. —	4
2. Fűtőtestek modellje	5
2.1. Állandósult állapotbeli hőleadás	6
2.1.1. Hőleadás	6
2.1.2. Hőfelvétel	7
2.1.3. Energiamérleg állandósult állapotban	7
2.1.4. Javítás a radiátormodellen	8
2.1.5. A modell validálása	8
2.2. Dinamikus modell	9
2.2.1. Padlófűtés modellje	9
3. Ház modellje	12
3.1. Fűtési rendszer és ház kapcsolata	12
3.2. A modellalkotás folyamata	13
3.3. A megvalósított modell / a modell hatóköre, használhatósága, assumptions	13
3.4. Alkalmazott fűtési rendszerek	14
3.5. A modell átviteli függvénye	14
3.6. TABS	14

4. Modellek tesztje	15
4.0.1. Radiátor unit test	15
4.0.2. Padlófűtés unit test	15
5. Identification	16
5.1. Hagyományos szabályzás performanciája	17
6. Szabályzó kiválasztása és analízise	18
6.1. Ismerkedés az MPC szabályzással	18
6.1.1. A MATLAB MPC Toolbox elemei	19
6.1.2. Az automatikusan létrehozott MPC tulajdonságai	22
6.2. A szabályzó paramétereinek finomítása, hangolása, alapbeállítások felülírása	23
6.2.1. Az MPC költségfüggvénye	23
6.2.2. Offline MPC - supervisory control	24
6.2.3. Validálás	24
7. További teendők, finomítások, lehetőségek	25
8. Összefoglalás	26

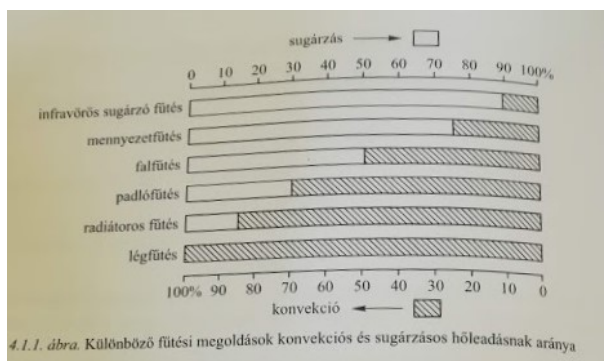
1. fejezet

Modellalkotás, irodalomkutatás

Munkámban elsősorban a különböző fűtési típusok közti különbségeket szeretném megvizsgálni. A ház modelljét először adottnak venném, az eltérést pedig a különböző fűtési módok jelentenék. Azaz megpróbálom felírni a környezet belső hőmérsékletre való ráhatását, eztán pedig modellezem többféle fűtőtest viselkedését.

Ehhez először áttekintettem a hőátadás lehetséges formáit és forrásait. Arra jutottam, hogy ha a levegő hőmérsékletére szabályzok, akkor az abba beleszóló tényezőket veszem sorra:

- konvektív hőátadás: a felszín közelében felmelegedett levegő áramlani kezd
- radiatív hőátadás: sugárzással kibocsátott energia a környezetbe



1.1. ábra. Alacsony hőmérsékletű fűtés és magas hőmérsékletű hűtés c. könyv ábrája

A levegő hőmérsékletére ezek a következőképp hatnak a leginkább:

- a fűtőtestek konvektív és radiatív hőátadással is melegítik a környezetet
- a radiatív energiát a tárgyak, falak nyelik el, amik ezáltal felmelegszenek (mintegy kapacitásként lesz egy hőtároló tömeg, ami a fűtés kikapcsolásával fenntartja a hőmérsékletet / lassítja a hűlést)

- a fűtetlen falfelületek hűtik a szobát (külső hőmérséklet befolyása)

Így a kezdeti modellben azzal a feltételezéssel élek, hogy ezen kívül más hatás nem lép fel.

A modellben feltételezem, hogy a fűtőtest felületi hőmérsékletével tudunk beavatkozni. A modellben paraméter a fűtőtestek hőátadási tényezője és felülete. Zavarásként (?) hat a külső hőmérséklet értéke, amit mérni is tudunk. Kimenet a belső hőmérséklet (térben konstansnak véve azt / átlagolva a szoba levegőjére)

A modell felírásához a fűtőtest tulajdonságain kívül szükség van a szobában található levegő mennyiségére is. A zavarás hatását is fel kell írni, azaz hogy egy külső hőmérsékletváltozás hogyan jelenik meg a kimeneten. (Célszerű itt egy átviteli függvényt felírni először, szuperpozíciószerűen. A zavarás viszont nem a modell bemenetén és nem is a kimenetén hat.)

A felírandó átviteli függvények:

- levegő felmelegedése konstans külső hőmérsékletet feltételezve, fűtőtest egységugrással
- levegő felmelegedése fűtés kikapcsolt állapota mellett, környezeti hőmérséklet ugrásával

Ezeket ráadtam a rendszerre és két bemenetű, egy kimenetű rendszerként identifikáltam.

1.0.1. —

Fűtési típusok szerint:

- radiátoros fűtés hőátvitele
- padlófűtés hőátvitele

A fentiekre különböző értékű lesz a

- hőátadási tényező
- hőtároló tömeg
- költségfüggvény?
- előremenő vízhőmérséklet és ezzel a leadott teljesítmény maximumértéke

ami így eltérő ház-modelleket fog eredményezni.

2. fejezet

Fűtőtestek modellje

A következőkben egy radiátort és egy padlófűtést fogok modellezni, ezekre képlettel felírom az állandósult állapotbeli hőleadást. Szimuláció során viszont bekapcsolási tranziensekkel is számolnom kell, ami légbefúvásos rendszer esetén elhanyagolható lenne. Ehhez már a Matlab Simscape környezetét fogom használni, amely képes termikus rendszerek modellezésére.

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.¹ Az elképzelésemmel 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.

A fűtőtest hőleadása viszont 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 függnének. 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

¹A 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.

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.

TIKZPICTURE A MODELLRŐL, DIMENZIÓKRÓL

2.1. Állandósult állapotbeli hőleadás

Mivel a Matlab szimulációban a légbefúvásos fűtés modelljének teljesítmény kimenete van, olyan modellt szerettem volna felírni, ami beilleszthető az eredeti légbefúvó rendszer helyére. A ház hőveszteségeit a Matlab számolja², ebből pedig adódik a szoba levegőjének hőmérséklete. A rendszer szabályozását így visszavezettem a leadott teljesítmény szabályzására. A levezetett egyenletnek köszönhetően egy teljesítményigényhez meg tudom majd mondani hogy mennyire kell a szabályzószelepeket kinyitni.

Az *Épületgépészet a gyakorlatban*³ c. könyvben szó esik fűtési rendszerek méretezéséről. Itt adatként szerepel egy épületre a szobák hőigénye⁴ 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.

Nomenklatúra

2.1.1. Hőleadás

A fűtőtestek hőleadását befolyásolja a fűtőtestek közepes hőmérsékletkülönbsége (ld. a 2.2. egyenlet), a felülete és a hőleadási tényezője. Ezek közötti kapcsolatot adja az 2.1. egyenlet ([2, 358. o.]-ból):

$$\dot{Q}_{le} = k_e A_e \Delta t_m \quad (2.1)$$

ahol

\dot{Q}_{le} [W] a leadott hő

$k_e \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$ hőleadási tényező - ezt hőmérsékletfüggetlennek tekintem.

$A_e \text{ [m}^2\text{]}$ a radiátor felülete

$\Delta t_m \text{ [K]}$ a közepes hőmérsékletkülönbség:

$$\Delta t_m = \frac{t_s + t_r}{2} - t_i \quad (2.2)$$

ahol

t_s a radiátorba befolyó, t_r az onnan kifolyó víz hőmérséklete °C-ban

t_i a szoba hőmérséklete

A hőátadási tényező is hőmérsékletfüggő, de ezzel egyelőre nem foglalkozom, állandónak tekintem.

2.1.2. Hőfelvétel

A vízből felvett hő felírható:

$$\dot{Q}_{fel} = c \dot{m} \Delta t \quad (2.3)$$

ahol

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

$c \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$ a víz fajhője

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

$\Delta t = t_s - t_r \text{ [K]}$ a víz lehűlésének mértéke

2.1.3. 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 (2.2)-ba (2.1)-t:

$$\dot{Q}_{le} = k_e A_e \left(\frac{t_s + t_r}{2} - t_i \right) = k_e A_e \left(\frac{t_s + (t_s - \Delta t)}{2} - t_i \right) \quad (2.4)$$

Ahol felhasználtuk azt is, hogy $t_r = t_s - \Delta t$, majd Δt helyére beírhatjuk a (2.3) átrendezett alakját:

$$\Delta t = \frac{\dot{Q}_{fel}}{c \dot{m}} \quad (2.5)$$

Beírva (2.4)-ba (2.5)-t:

$$\dot{Q}_{le} = k_e A_e \left(t_s - t_i - \frac{\dot{Q}_{fel}}{c \dot{m}} \right)$$

$$\dot{Q}_{le} + \frac{k_e A_e \dot{Q}_{fel}}{2 c \dot{m}} = k_e A_e (t_s - t_i) \quad (2.6)$$

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

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

$$\dot{Q}(2 c \dot{m} + k_e A_e) = 2 k_e A_e c \dot{m} (t_s - t_i) \quad (2.7)$$

$$\dot{Q} = \frac{2 c \dot{m} k_e A_e}{2 c \dot{m} + k_e A_e} (t_s - t_i)$$

A fenti képletet kiegészítve kezelhető lenne a hőmérsékletfüggő hőleadási tényező.

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 $t_s - t_r$ szabja meg (2.3. egyenlet), viszont itt t_r -t kiejtettem az egyenletekből. Viszont az irodalom⁵ szerint a $\Delta t = t_s - t_r$ -re szabályozással megtakarítás érhető el. Meg kell vizsgálni, reális-e mindkét paraméter mérése, radiátorok esetén, vagy csak padlófűtésnél.

2.1.4. Javítás a radiátormodellen

A közepes víz hőmérséklet, a közepes felületi hőmérséklet is jöhet kimeneten ahhoz, hogy a steady-state model számolhassa a bemenő hőmérsékletet.

2.1.5. A modell validálása

Nyilvánvalóan nehéz lenne a felírt modellt egyénileg validálni, főleg hogy sehol sem talákoztam ilyen formában felírt képlettel a szakirodalomban. Szerencsére Cholewa [1] és Koca [3] 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:

A hőleadás egyenletével számolt és a tapasztalati úton kapott eredmények elég jól követik egymást. A fenti publikációkban figyelembe vették a hőleadási tényező hőmérsékletfüggését.⁶ Azaz a felfutási tranziens során is változik a hőátadási tényező.

2.2. Dinamikus modell

Nomenklatúra

2.2.0.1. Radiátor dinamikus 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.

Radiátor katalógusokból⁷ azt találtam, hogy az egyes radiátor típusokra ezek a paraméterek milyen értékűek.

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.

Ezen hőtároló elemek feltöltődése szimulálva adja a dinamikus viselkedést.

2.2.0.2. Hőkapacitás

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

2.2.1. Padlófűtés modellje

Aljzat, aljzatbeton: slab facade: frontal - homlokzat

⁶Intuitívan 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 fújuk, illetve szélben a kinti hőmérséklet kisebbnek érződik. Hasonlóan melegebb tárgy esetén a légáramlás felgyorsul, amiatt hogy a melegebb levegő felfelé száll.

⁷Purmo Ventil Compact - purmo.com

2.2.1.1. 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 [1] T. Cholewa⁸ (5.) egyenlet alapján számítható de az a geometriától is nagyban függ. Helyette Kilkis1994 (4) és (6) javasolt, illetve a [1]-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.

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.
- [1] T. Cholewa et al. / Energy and Buildings 66 (2013) 599–606 - Table 5: coefficient
- Kilkis1994 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.

$$\dot{Q}_r = h_r A_e (t_{surf} - t_{AUST}) \quad (2.8)$$

⁸On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.065>

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

2.2.1.2. Problémák, eltérések a radiátoros fűtéshez képest

Tegyük fel ho

3. fejezet

Ház modellje

A szabályzótervezéshez rendelkezésre kell, hogy álljon a szabályzott szakasz modellje. Ehhez egy könnyen módosítható, koncentrált paraméterű rendszert vettem fel. Felépítettem egy hálózatot¹, ahol minden elemhez lehet fizikai tartalmat rendelni. Majd ahhoz, hogy ehhez szabályzót lehessen tervezni, identifikáltam azt az ugrásválaszával.

3.1. Fűtési rendszer és ház kapcsolata

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.

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 új építésű házaknál kötelező az energetikai tanúsítás², ami egy meglehetősen részletes lajstromot ad az épület hőtechnikai tulajdonságairól. Ez alapján lehet egy hozzávetőlegesen jó modellünk az épületről, illetve a fűtési rendszerről is található 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.

¹Fodor HáRe alapján nézzük meg a különbséget rendszer és hálózat között.

²TNM 2006 rendelet alapján kötelező az energetikai tanúsítvány pl. *átlagos* lakóépületekre, irodákra.

3.2. A modellalkotás folyamata

White-box grey-box black-box

Említést érdemel, hogy a szakirodalomban hogy állnak hozzá ehhez a kérdéshez, a szabályzótervezés során néhányan egyáltalán nem alkotnak modellt, csak a mért adatokat használják fel. Lényegében én is mért adatokat használok, tulajdonképpen, mivel a modellt olyan alakban kéne felírni, hogy a szabályzó azt futtatni tudja. (?)

Viszont az ident toolbox tf identjénél kihasználtam azt, hogy a rendszer jellegét ismerem, azaz hogy hány pólusa és hány zérusa van a szakasznak / felnyitott körnek. Így lett egy nagyon jól illeszkedő átviteli függvényem.

Én összeraktam a fizikai modellt simulinkben (ez white-box) majd annak az ugrásválaszát mértem. Így nem egy állapotteres modell, hanem egy átviteli fv. "keletkezett".

Egyzónás hőmérsékletszabályzást veszek alapul, azaz egy referenciajelem és egy mért hőmérséklet 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 állapotteres 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.

3.3. A megvalósított modell / a modell hatóköre, használhatósága, assumptions

Figyelembe kell vennem a ház hőveszteségeit és hőtároló képességét is. Kell a határoló elemek felszíne, hőátbocsátási tényezője, a hőtároló elemek fajhője. 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.

felület	méret	kalorikus hőátbocsátási tényező	hőtároló tömeg	hőkapac
külső fal	4.5 m ²	$2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	4.5*200kg	e.g. $4.5*200*840 \frac{\text{J}}{\text{K}}$
ablak	4 m ²	$4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	0	0
belső válaszfalak	50 m ²	7	50*100kg	50*100*840
padló	16 m ²	11	16*200kg	169*200*840
mennyezet	16 m ²	? rad / conv		

3.1. 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.

A modell mintavételi ideje? A teljesítményeket megnöveljük és semmi mást, az nem lesz ekvivalens.

3.4. Alkalmazott fűtési rendszerek

Az alkalmazott fűtési rendszerek az épületet annak különböző pontjain gerjesztik. (Belső változóira nem egyformán hatnak: a kimeneten a változás intenzitása és sebessége más-más.) A teljes plant modell a fűtési rendszer és a ház sorba kötésével adódik.

A kettő között az interface az, hogy hol avatkozunk be. Így a ház bemenetei igazából a belső változókra vonatkozó "zavarások" (a külső hőmérséklethez képest)

3.5. A modell átviteli függvénye

A Simulinkben identifikáltam, aztán az adatokat a sys ident toolbox-szal dolgoztam fel, tudva a modell struktúráját. (az átviteli fv. számlálójának, nevezőjének a fokszámaikat)

3.6. TABS

4. fejezet

Modellek tesztje

4.0.1. Radiátor unit test

4.0.1.1. Állandósult állapot numerikus modellje

Annak ellenőrzése, hogy a 2.7 egyenlet jó-e. Azaz elfogadható-e ez a közelítés állandósult állapotban, illetve a tranziens alatt mennyire feasible.

Az egyenletben a mintavételi idő egy szorzóként jelenik meg,

Az egyenlet wattban adja a kimenetét. A teszt egy formája lehet, ha a gyári adatokat (fűtési teljesítmény) összevetem az általam számoltakkal.

4.0.1.2. Tranziens Simscape modellje

A bejövő hő függvényében a hőleadás tranziensei. A bejövő hőt a képlet numerikusan számítja. A tranziens vizsgálat Simscape-ben szimulálok. Ez folytonos rendszert feltételez.

4.0.1.3. Szabályzás célja

Állandósult állapotban olyan bemenő hőáramot elérni, ami épp fedezi a veszteségeket.

4.0.2. Padlófűtés unit test

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

Viszont a mintavételi idők megváltoztatásától azért *féltem*, 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.

5.1. 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.

6. fejezet

Szabályzó kiválasztása és analízise

Az identifikált modellekre többféle szabályzót tervezek, illetve próbálok ki.

6.1. Ismerkedés az MPC szabályzással

Ahhoz, hogy az MPC szabályzás működését, tulajdonságait meg tudjam figyelni, lépésről lépésre fogok feature-öket hozzáadni.

A kezdeti cél egy "sima" szabályzás. Kérdés, hogy egyáltalán tud-e illet az MPC. Gyanítom, hogy a hibaminimalizáló függvény megfelelő megadásával tud: ha egy négyzetes hibaminimalizáló van rajta, *biztosan "jó"* lesz.¹

Plant bemenetek lehetnek:

- kazán bekapcsolása
- előremenő hőmérséklet - unmeasured VAGY uncontrolled inputként
- 1 db. fűtőtest (most radiátor) szelepének tömegárama (szelep áteresztése)
- Később több fűtőtest vagy többféle fűtőtestek (padlófűtés, különböző teljesítményű radiátorok) szabályozása
- környezeti hőmérséklet: mért bemenet - később predikció is lesz rá. Hatása a kimeneten már identifikálva lett, 3 pólussal és 2 zérussal tökéletesen lekövethető.
- napsugárzás zavaró hatása - szimulálható a bizonytalansága valószínűleg nagy lesz

Belső változók - fűtési rendszer és ház kapcsolata

- napsugárzás - radiatív, az ablak felületével és a szöggel arányos

¹Bármit is jelentsen a *jó* szabályzás.

- fűtőtestek sugárzó és konvektív hőárama

Paraméterek a plantben nem állandók:

- hőátadási tényezők hőmérsékletfüggők, áramlási sebesség-függők (szél)
- szellőztetés, belső hőterhelés hatása

Az elvárás a következő lépésben az, hogy ha egy t_0 időpontban a rendszer egy adott állapotban van, és várható egy zavarás Δt idő múlva (vagy mértem egy zavarást MOST és a hatása csak később jelenne meg a kimeneten), akkor a rendszer megfelelően beavatkozzon.

(Azaz ha fél óra múlva 10°C -al melegebb lesz, ne fűtsön.)

6.1.1. 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.

```
tf_19_toMPC=setmpcsignals(tf19, 'Manipulated',[2 3], 'MeasuredDisturbances' ,1)
```

```
tf_19_toMPC =
```

```
From input "u1" to output "y1":
```

$$3.776e-05 s^2 + 5.958e-09 s + 8.529e-15$$

$$s^3 + 0.002341 s^2 + 9.301e-09 s + 8.241e-15$$

```
From input "u2" to output "y1":
```

$$7.74 s + 0.000236$$

$$s^4 + 1.269e04 s^3 + 4262 s^2 + 3.299 s + 8.454e-06$$

From input "u3" to output "y1":

$$6.361e-05$$

$$s + 2.637e-06$$

Input groups:

Name	Channels
Manipulated	2,3
Measured	1

Output groups:

Name	Channels
Measured	1

Name: tf19

Continuous-time identified transfer [function](#).

Parameterization:

Number of poles: [3 4 1] Number of zeros: [2 1 0]

Number of free coefficients: 14

Use "tfdata", "getpvec", "getcov" [for](#) parameters and their uncertainties.

Status:

Estimated using TFEST on time domain data "tf_3in1out__68d".

Fit to estimation data: 82.28% ([stability enforced](#))

FPE: 1.707, MSE: 1.706

```
>> mpc_control_slab=mpc(tf_19_toMPC,1)
```

```
—>Converting linear model from System Identification Toolbox to statespace.
```

```
—>The "PredictionHorizon" property of "mpc" object is empty. Trying
```

```
PredictionHorizon = 10.
```

—>The "ControlHorizon" property of the "mpc" object is empty. Assuming 2.
 —>The "Weights.ManipulatedVariables" property of "mpc" object is empty.
 Assuming default 0.00000.
 —>The "Weights.ManipulatedVariablesRate" property of "mpc" object is
 empty. Assuming default 0.10000.
 —>The "Weights.OutputVariables" property of "mpc" object is empty.
 Assuming default 1.00000.
 MPC object (created on 30-Oct-2018 20:51:50):

Sampling time: 1 (seconds)
 Prediction Horizon: 10
 Control Horizon: 2
 Plant Model:
 MATLAB Command Window Page 6

2 manipulated variable(s) —>| 8 states |
 | |—> 1 measured output
 (s)
 1 measured disturbance(s) —>| 3 inputs |
 | |—> 0 unmeasured
 output(s)
 0 unmeasured disturbance(s) —>| 1 outputs |

Indices:
 (input vector) Manipulated variables: [2 3]
 Measured disturbances: [1]
 (output vector) Measured outputs: [1]
 Disturbance and Noise Models:
 Output disturbance model: default (type "getoutdist
 (mpc_control_slab)" [for](#) details)
 Measurement noise model: default (unity gain after scaling)
 Weights:
 ManipulatedVariables: [0 0]
 ManipulatedVariablesRate: [0.1000 0.1000]
 OutputVariables: 1

```
ECR: 100000
State Estimation: Default Kalman Filter (type "getEstimator
(mpc_control_slab)" for details)
Unconstrained
>> mpc_control_slab.ManipulatedVariables(1).Min = 0;
>> mpc_control_slab.ManipulatedVariables(2).Min = 0;
>> mpc_control_slab.ManipulatedVariables(2).Max = 1;
mpc_control_slab.ManipulatedVariables(1).Max = 1;
```

6.1.2. Az automatikusan létrehozott MPC tulajdonságai

Az MPC szabályzót létrehoztam a toolbox-szal, az identifikált szakaszból. Beállítottam a be-és kimenetek jellegét, korlátait. A ki-és bemeneteket helyesen bekötve már működött is a szabályzás.

6.1.2.1. 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 túppontos referenciakövetésre, a hőmérséklet kb. 1°C -ot ingadozhat. ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) Ha ezt megengedjük, a beavatkozás költsége lecsökkenhet.

6.1.2.2. Robosztusság

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

6.2. A szabályzó paramétereinek finomítása, hangolása, alapbeállítások felülírása

A mintavételi időt megnőveltem. 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.
-
-
-
-
-
-

6.2.0.1. 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 °C-os pontosság, hanem az energiamegtakarítás. Pontosan fel kellene ezért írni a forintosított költségét a beavatkozásnak, és ezt minimalizálni.

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 hatásokkal működnek. Online weight tune elképzelhető, pl. a beavatkozó jeltől függően.

6.2.1. 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 vízhőmérsékletre szabályozni, annak a költsége szemléletesebb.

6.2.1.1. 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 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.

6.2.2. 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.

6.2.3. Validálás

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

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

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

7. fejezet

További teendők, finomítások,
lehetőségek

8. fejezet

Összefoglalás

Irodalomjegyzék

- [1] 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.
- [2] Csoknyai István. *Több, mint hidraulika*. Herz Armatúra Hungária Kft, 2013.
- [3] 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.