



MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI
EGYETEM

Folyadék munkaközegű fűtőlapok hőmérséklet
szabályozása

Doktori (PhD) értekezés

Erdélyi Viktor Ferenc

Gödöllő

2025

A doktori iskola és program megnevezése:

Műszaki Tudományok Doktori Iskola

Műszaki Tudományi Doktori Program

Tudományterület: Műszaki tudományok

Tudományág: Agrárműszaki tudományok

Iskola vezetője: Prof. Dr. Bozó László
egyetemi tanár, az MTA rendes tagja
MATE, Környezettudományi Intézet

Program vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE, Műszaki Intézet

Témavezetők: Dr. Földi László
egyetemi docens, PhD
MATE, Műszaki Intézet

Dr. Buzás János
egyetemi docens, PhD
MATE, Műszaki Intézet

.....
témavezető(k) jóváhagyása

.....
doktori program vezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	6
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	11
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége	11
1.2. Célkitűzések	12
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	14
2.1. Megújuló energiák használata állattartásban	14
2.2. Napenergia	14
2.3. SimSolar szimulációs keretrendszer	16
2.4. Környezeti átlaghőmérséklet és napsugárzás közelítő függvények	17
2.5. Napkollektor.....	19
2.6. Hőtároló.....	20
2.7. Keringtető szivattyú	21
2.8. Tágulási tartály.....	22
2.9. Csővezeték rendszer.....	22
2.10. Felhasználói oldal elemei	22
2.10.1. Fojtószelep	22
2.10.2. Fűtőlap	24
2.11. Dinamikus rendszerek modellezése, numerikus módszerek	24
2.12. Identifikáció és validáció	28
2.13. Irányítástechnika	29
2.14. Mintavételezés.....	29
2.15. Gyakorlatban alkalmazott szabályozóalgoritmusok	29
2.15.1. Konvencionális szabályozóalgoritmusok.....	29
2.15.2. Nagy időállandójú rendszerek szabályozása.....	30
2.15.3. Robusztus szabályozók	31
2.16. Mesterséges Intelligencia (MI) alapú szabályozók	32
2.17. Kaszkád szabályozó	32
2.18. A szakirodalomi áttekintés összefoglaló értékelése	33
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	35
3.1. Blokkorientált modellezés.....	35
3.2. Termikus napenergiahasznosító rendszer felépítése	35
3.3. Kísérleti rendszer	36

3.4.	A beágyazott mérőrendszer.....	40
3.5.	SimSolar szimulációs keretrendszer	40
3.6.	Szabályozó algoritmusok	41
3.6.1.	Kétállású szabályozó.....	41
3.6.2.	Arányos szabályozó	42
3.6.3.	Arányos integráló szabályozó	43
3.6.4.	Arányos integráló, deriváló szabályozó	44
3.6.5.	Csúszómód-szabályozó	45
3.6.6.	Szabályozás minőségi jellemzői	47
3.6.7.	Nagyidőállandójú rendszerek szabályozása.....	49
3.6.8.	Szabályozó algoritmusok optimalizálása	50
3.7.	Adatgyűjtés, jelkondicionálás	50
3.7.1.	Shannon-Nyquist mintavételezési elmélet.....	50
3.7.2.	Villamos szűrőáramkörök	51
3.7.3.	Mintavételezett adatok szűrése	51
4.	EREDMÉNYEK	55
4.1.	Szimulációs keretrendszer.....	55
4.1.1.	Két hőenergiabemenettel felszerelt hőtároló modell	55
4.1.2.	Szivattyúmodell	57
4.1.3.	Fójtómodell	60
4.1.4.	Fűtőlap modell	70
4.1.5.	Bojlermodell.....	72
4.1.6.	Csőmodell	73
4.1.7.	Kétállású szabályozó hiszterézissel	75
4.1.8.	Kétállású szabályozó hiszterézissel és limitált kapcsolási frekvenciával	76
4.1.9.	Klasszikus PID szabályozó	77
4.1.10.	Klasszikus csúszómód-szabályozó	79
4.1.11.	Klasszikus csúszómód-szabályozó limitált beavatkozási frekvenciával	81
4.1.12.	Módosított csúszómód-szabályozó	82
4.1.13.	Módosított csúszómód-szabályozó limitált kapcsolási frekvenciával	83
4.1.14.	Kombinált szabályozáshoz alkalmazott különálló szivattyúsabályozás	84
4.1.15.	Kombinált módosított csúszómód-szabályozó.....	86
4.1.16.	Kiegészített szimulációs keretrendszer	87
4.2.	Fűtőlap modell paraméterérzékenységi vizsgálata.....	89
4.3.	Paraméter identifikáció, modellek validálása	90

4.3.1.	A bojler és a környezet közti hőátadási tényező paraméter identifikációja	91
4.3.2.	A tároló és a környezet közti hőátadási tényező paraméter identifikációja	93
4.3.3.	A fűtőlap és a környezet közti hőátadási tényező paraméter identifikációja	93
4.3.4.	Hőcserélő bordáscső hőátadási tényezőjének paraméter identifikációja	94
4.3.5.	A csövek hőátadási tényezőjének paraméter identifikációja	95
4.3.6.	Modellek validálása	95
4.4.	Új, energiafelhasználást is figyelembe vevő célértékfüggvény	96
4.5.	Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének kétállású szabályozása	99
4.5.1.	Vizsgálat optimális hiszterézissel, fojtószelep nyitással/zárással	100
4.5.2.	Vizsgálat optimális hiszterézissel, szivattyú ki-/bekapcsolással	101
4.6.	Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének PID szabályozása	103
4.6.1.	Fűtőlap hőmérsékletszabályozása PI szabályozóval, beavatkozó: fojtószelep .	103
4.6.2.	PI szabályozó „anti-windup” kompenzációval kiegészítve	104
4.7.	Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének csúszómód szabályozása	105
4.7.1.	Csúszómód szabályozás, fojtószelep nyitással/zárással	106
4.7.2.	Csúszómód szabályozás, szivattyú ki-/bekapcsolásával	107
4.8.	Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének módosított csúszómód szabályozása	108
4.8.1.	Fojtószelep nyitással/zárással	109
4.8.2.	Szivattyú ki-/bekapcsolással	110
4.9.	Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének kombinált szabályozása módosított csúszómód-szabályozóval	111
4.10.	Szabályozások értékelése egységes szempontrendszer alapján	112
4.10.1.	A szabályozások minőségi- és energiahatékonysági jellemzői	113
4.10.2.	A munkapont változásra adott válasz	115
5.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	121
6.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	122
7.	ÖSSZEFOGLALÁS	125
8.	SUMMARY	126
9.	MELLÉKLETEK	127
9.1.	M1: Irodalomjegyzék	127
9.2.	M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk	135
9.3.	M3: Az ET fojtó modell levezetése	138
10.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	142

JELÖLÉSJEGYZÉK

a_n	Runge-Kutta módszercsalád együtthatója	[-]
A	golyóscsap teljes áramlási keresztmetszet (Simscape modell)	[m ²]
$A_{Boi2Amb}$	bojler hőátadó felülete a környezet felé	[m ²]
A_f	fojtási keresztmetszet (javított modell)	[m ²]
A_{Leak}	golyóscsap szivárgási keresztmetszet teljesen zárt helyzetben (Simscape modell)	[m ²]
A_{Open}	golyóscsap fojtási keresztmetszet (Simscape modell)	[m ²]
$A_{Pad2Amb}$	fűtőlap hőátadó felülete a környezet felé	[m ²]
$A_{Pad2Storex}$	fűtőlapba épített hőcserélő hőátadó felülete	[m ²]
$A_{Pipe2Ambex}$	cső hőátadó felülete a környezet felé	[m ²]
$A_{Stor2Amb}$	hőtároló hőátadó felülete a környezet felé	[m ²]
$A_{Stor2Boiex}$	hőtárolóba épített hőcserélő hőátadó felülete, bojler kör	[m ²]
$A_{Stor2Collex}$	hőtárolóba épített hőcserélő hőátadó felülete, kollektor kör	[m ²]
$A_{Stor2Padex}$	hőtárolóba épített hőcserélő hőátadó felülete, felhasználói kör	[m ²]
b_1	módosított csúszófelület 1. paramétere	[1/°C]
b_2	módosított csúszófelület 2. paramétere	[-]
b_3	módosított csúszófelület 3. paramétere	[s/°C]
b_n	Runge-Kutta módszercsalád együtthatója	[-]
c	fajhő	[J/kgK]
c_n	Runge-Kutta módszercsalád együtthatója	[-]
c_v	állandó térfogaton értelmezett fajhő	[J/kgK]
C_d	áramlási tényező	[-]
E_{BoiOut}	bojlerből elvont hőenergia	[J]
E_C	kumulált energiafelhasználás	[J]
$E_{EST_{t-1}}$	előző becslés bizonytalansága	[-]
E_{EST}	becslés bizonytalansága	[-]
E_{MEA}	mérés bizonytalansága	[-]
EST_t	becslés értéke	[-]
EST_{t-1}	előző becslés értéke	[-]
H	hiszterézis értéke	[°C]
I	napsugárzás intenzitás	[W/m ²]
I_a	napsugárzás intenzitás amplitúdója	[W/m ²]
$\hat{I}_a$	napsugárzás intenzitás amplitúdó éves változást közelítőfüggvénye	[W/m ²]
J	célértékfüggvény	[-]

J_a	abszolút integrálkritérium	[-]
J_{at}	abszolút, idővel súlyozott integrálkritérium	[-]
J_{et}	hatványos, idővel súlyozott integrálkritérium	[-]
J_l	lineáris integrálkritérium	[-]
J_{lt}	lineáris, idővel súlyozott integrálkritérium	[-]
J_s	négyzetes integrálkritérium	[-]
J_E	csak az energiafelhasználást vizsgáló integrálkritérium	[-]
J_{EQ}	energiafelhasználást és a szabályozás minőségi jellemzőket figyelembe vevő integrálkritérium	[-]
J_Q	csak a szabályozás minőségi jellemzőit vizsgáló integrálkritérium	[-]
$J_{\varepsilon max}$	identifikációhoz alkalmazott kritériumfüggvény	[%]
k_n	Runge-Kutta módszer család által számított köztes függvényérték	[-]
K_D	differentiáló tag erősítési tényezője	[-]
K_I	integráló tag erősítési tényezője	[-]
K_P	arányos tag erősítési tényező	[-]
K_v	a szelep áramlási tényezőjének maximális értéke, ennek az értéknek meg kell felelnie a teljesen nyitott pozíciónak	[-]
KG	Kálmán erősítési tényező	[-]
k	mérési adat száma	[-]
l_c	napkollektor hossza	[m]
l	golyóscsap golyófurat középpontjának a golyófészek csatlakozónyílás középpontjától mért elmozdulása	[m]
$\dot{m}$	tömegáram	[kg/s]
MEA	mérési adat	[-]
N_{Day}	nap sorszáma az évben	[-]
Δp	nyomáskülönbség	[Pa]
Δp_{Crit}	a kritikus Reynolds számhoz tartozó kritikus nyomáskülönbség	[Pa]
P_e	villamos fűtőteltjesítmény	[W]
p_j	paraméterek	[-]
PV	szabályozott jellemző	[°C]
q	a mozgó ellipszis középpontjának y koordinátája	[m]
Q	térfogatáram	[m ³ /s]
Q_{Boi}	bojlerkör térfogatárama	[m ³ /s]
Q_{Coll}	kollektorkör térfogatárama	[m ³ /s]
Q_{Pad}	felhasználói kör térfogatárama	[m ³ /s]
r	golyóscsap golyófuratának sugara	[m]
r_e	mozgó ellipszis magasságának fele	[m]

r_x	x irányú sugár	[m]
r_y	y irányú sugár	[m]
R	golyóscsap golyójának sugara	[m]
R_{Bore}	golyófurat sugara	[m]
R_{DE}^2	differenciálegyenlet modell determinációs együtthatója	[-]
R_{H-W}^2	Hottel-Whillier modell determinációs együtthatója	[-]
Re_{Crit}	kritikus Reynolds szám, a szelepen keresztüli lamináris áramlás felső Reynolds-szám határértéke	[-]
R_{ET}^2	ET-modell determinációs együtthatója	[-]
R_{Port}	golyóscsap csatlakozó sugara	[m]
R_{SS}^2	Simscape modell determinációs együtthatója	[-]
RSS	eltérés négyzetösszege	[-]
s	csúszófelület	[-]
S	kétállású szabályozó belső állapota	[-]
SP	alapjel	[°C]
t	idő	[s]
T_a	hőmérséklet amplitúdó	[°C]
$\hat{T}_a$	hőmérséklet amplitúdó éves változást közelítőfüggvénye	[°C]
T_{ci}	napkollektorba belépő hőszállító közeg hőmérséklete	[°C]
T_{co}	napkollektorból kilépő hőszállító közeg hőmérséklete	[°C]
T_m	napi átlaghőmérséklet	[°C]
$\hat{T}_m$	napi átlaghőmérséklet éves változását közelítő függvény	[°C]
T_w	környezeti hőmérséklet	[°C]
T_{Amb}	beltéri környezeti hőmérséklet	[°C]
T_{Boi}	bojler hőmérséklete	[°C]
$T_{Boi2Stor}$	bojlerből a hőtároló felé kilépő fluidum hőmérséklete	[°C]
$T_{Coll2Stor}$	kollektorból kilépő, hőtárolóba belépő hőmérséklet	[°C]
T_{Pad}	fűtőlap hőmérséklete	[°C]
$T_{Pad2Stor}$	fűtőlaphoz a hőtárolóba belépő fluidum hőmérséklete	[°C]
T_{PipeIn}	csőbe belépő fluidum hőmérséklete	[°C]
$T_{PipeOut}$	csőből kilépő fluidum hőmérséklete	[°C]
TSS	négyzetek összege	[-]
T_{Stor}	hőtároló hőmérséklete	[°C]
$T_{Stor2Coll}$	hőtárolóból kilépő, kollektorba belépő hőmérséklet	[°C]
$T_{Stor2Boi}$	hőtárolóból a bojler felé beérkező fluidum hőmérséklete	[°C]
$T_{Stor2Pad}$	hőtárolóból a fűtőlap felé kilépő fluidum hőmérséklete	[°C]

u	rendelkezőjel	[-]
v_{on}	bekapcsolt állapothoz tartozó numerikus érték	[-]
V_{Boi}	bojler térfogata	[m ³]
V_{Pad}	fűtőlap térfogata	[m ³]
V_{Stor}	hőtárolótartály térfogata	[m ³]
w_c	napkollektor szélessége	[m]
x	a Descartes koordinátarendszer független változója	[m]
x_c	a kör középpontjának x koordinátája	[m]
$\bar{x}_r$	mozgóátlag	[-]
y	a Descartes koordinátarendszer függő változója	[m]
$\tilde{y}$	mérési eredmény	[°C]
$\hat{y}$	szimuláció eredménye	[°C]
$\bar{y}$	mérési eredmények számtani átlaga	[°C]
y_A	a mozgó ellipszis egyik szélének vetületi pontja	[m]
y_B	a mozgó ellipszis másik szélének vetületi pontja	[m]
y_c	a kör középpontjának y koordinátája	[m]
α	a golyóscsap karakterisztikus szöge	[°]
ε	szabályozási hiba	[°C]
κ_{aw}	hőátadási tényező az abszorber és a környezet között	[W/m ² K]
$\kappa_{Boi2Amb}$	bojler felületi hőátadási tényezője környezet irányában	[W/m ² K]
κ_{ex}	hőcserélő hőátbocsátási tényezője	[W/m ² K]
κ_{mw}	hőátadási tényező a hőszállító közeg és a környezet között	[W/m ² K]
$\kappa_{Pad2Amb}$	fűtőlap felületi hőátadási tényezője környezet irányában	[W/m ² K]
$\kappa_{Pipe2Amb}$	cső felületi hőátadási tényezője környezet irányában	[W/m ² K]
$\kappa_{Stor2Amb}$	hőtároló felületi hőátadási tényezője környezet irányában	[W/m ² K]
λ	csúszóegyenes meredeksége	[-]
λ_{Bore}	a golyóscsap golyó furatának karakterisztikus paramétere	[-]
λ_{Port}	a golyóscsap golyófészek csatlakozónyílás karakterisztikus paramétere	[-]
ν	kinematikai viszkozitás	[m ² /s]
ρ	sűrűség	[kg/m ³]
$\bar{\rho}$	átlagos folyadéksűrűség	[kg/m ³]
σ_i	szivattyú teljesítményfokozatának kapcsolási határértéke	[°C]
τ	idő	[s, h]
τ_0	identifikáláshoz / optimalizáláshoz használt időtartomány kezdete	[s]
τ_0	napi napsugárzás maximumhoz tartozó időpont	[h]

τ_1	identifikáláshoz / optimalizáláshoz használt időtartomány vége	[s]
τ_h	napkeltétől napnyugtáig tartó időintervallum fele	[h]
$\hat{\tau}_h$	napkeltétől napnyugtáig tartó időintervallum felének éves változását közelítő függvény	[h]
τ_ω	időeltolás	[h]
$\hat{\tau}_\omega$	időeltolás éves változást közelítőfüggvénye	[h]
φ	a golyóscsap záróelem szögelfordulása	[°]
φ'	a golyóscsap záróelem szögelfordulása (Simscape)	[rad]
φ_{max}	a golyóscsap teljes elzárásához tartozó szög	[°]
ω_1	az új kritériumfüggvény 1. súlyfaktora	[1/Js]
ω_2	az új kritériumfüggvény 2. súlyfaktora	[1/°C²s]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésem ezen fejezetében mutatom be a téma jelentőségét, illetve a célkitűzéseimet a témával kapcsolatban.

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Napjainkban rendkívül fontos, hogy megfelelő mennyiségű és minőségű húst tudjunk előállítani. Emiatt az állattartás nagyüzemi szinten kell történni. A termelést energiahatékony módon, az állatjólléti irányelvek figyelembevételével kell megvalósítani.

A sertéstartás egyik legenergiaigényesebb aspektusa a fűtés, mely a termelési költségek jelentős hányadát adja, illetve környezeti hatása is szignifikáns. Figyelembe véve az Európai Unió új energiahatékonsági célkitűzését, amely 2030-ra 32,5%-os energiamegtakarítást irányoz elő az EU számára az 1990-es referenciaértékhez képest (EU, 2019), fontos az energiahatékony fűtési megoldások kutatása. Emellett a hatályos 2023-ban módosított 39/2018. (XII. 13.) AM rendeletben foglaltak szerint az állatjólléti támogatás elnyerésének feltétele az 5.§ első bekezdésének c) és e) pontja szerint a verekedés, kimarás elkerüléséhez szükséges feltételek megteremtése, valamint a megfelelő mikroklíma kialakítása (Kormány, 2023). Ennél is fontosabb az állat egészségére is fokozottan veszélyes testfelületi lehűlés, mely a hideg padlófelület egyik következménye lehet, vagy a kontaktfűtőlapok által okozott túlzott felmelegedés miatti izzadás és a huzat együttes következménye, mely az állatok hurutos gyomor- és tüdőmegbetegedését okozhatja.

Mivel a kimarás (fül és farokrágás) jelensége magas stressz szinthez köthető (Johnson et al., 2018), melynek egyik kiváltó oka a sertés hőmérsékletre, illetve más tényezőkre való érzékenysége, valamint a megfelelő mikroklíma feltétel is tartalmazza a megfelelő hőmérséklet kialakítását, így mind állatjólléti, mind gazdasági szempontból fontos a kérdés.

A központi statisztikai hivatal nyilvános adatai alapján Magyarországon 2024. június 1-én 162400 anyakocát tartanak számon (kerekített érték) melyek megközelítőleg évente kétszer 8-12 kismalacot ellenek (ksh, 2024).

A sertéstartásban, malacnevelőnek nevezett istállótípusnál a malacok komfortérzetét különböző fűtési technikákkal igyekeznek növelni (Barótfi et al., 1979). Ilyen ezek közül a kontaktfűtőlapok alkalmazása, melyek folyadék munkaközegűek, vagy direkt elektromos fűtésűek lehetnek.

A fenn említett megoldás folyadék munkaközeggel történő energiaellátására gyakran használnak gázzal vagy biogázzal (Tóth L., 2021) üzemeltetett kazánokat, egyes esetekben termikus napenergiahasznosítással megtámogatva.

A legfőbb probléma e rendszerek használatánál jellemzően az egyenetlen hőmérsékleteloszlás a malacnevelőn belül több ponton elhelyezett fűtőlapok között. Ennek oka, hogy ezek a rendszerek nagy időállandójú rendszereknek tekinthetők, melyek szabályozása a változó körülmények mellett (lap szennyezettsége, légáramlás stb.) nehezen megoldható. Emiatt gyakran a költségesebben, illetve magasabb széndioxidlábnyommal üzemeltethető villamos megoldások mellett döntenek a gazdák.

1.2. Célkitűzések

A kutatás során olyan szabályozási algoritmusok vizsgálata a cél, melyek képesek ellátni nagy időállandójú rendszerek megfelelő minőségű és energiahatékonyságú hőmérsékletszabályozását, továbbá az erre a területre vonatkozó módszerek továbbfejlesztése és az alkalmazhatóság korlátainak megállapítása.

Célom egy fűtésrágító termikus napenergiahasznosító berendezéssel összekapcsolt malacnevelőkben alkalmazott folyadék munkaközegű kontaktfűtőlapot alkalmazó rendszer kismintamodelljének felépítése, melyen történő mérések alapján matematikai modellek felállítása, így egy validált szimulációs keretrendszer megalkotása, melynek segítségével lehetőség nyílik:

különböző szabályozó algoritmusok:

- kétállású,
- arányos integráló differenciáló (PID),
- csúszómód,
- módosított csúszómód,

különböző beavatkozásszervek:

- szivattyú,
- fojtószelep,

vizsgálatára.

A szimulációs keretrendszer segítséget nyújthat valós rendszerek kialakításánál.

A kutatás a következő részfeladatokra bontható:

1. A vizsgált rendszer kismintamodelljének felállítása.
2. A kismintamodell mérő beágyazott rendszerének elkészítése.
3. A rendszer részegységeinek matematikai modellezése:
 - Hőtároló tartály modellje,
 - Fűtőlap modell,
 - Szivattyú modell,
 - Fojtószelep modell,
 - Csőhővesztesség modell.
4. A matematikai modellek alapján blokkorientált szimulációs keretrendszer elkészítése.
5. A vizsgálandó szabályozási algoritmusok és stratégiák meghatározása, modellbe illesztése.
6. A szabályozási algoritmusok optimalizálásához, valamint minősítéséhez egységes szempontrendszer felállítása, a szempontok alapján az optimalizációt lehetővé tevő módszer és kritériumfüggvény meghatározása.
7. Szabályozók egységes szempontrendszer szerinti optimalizálása.
8. Szabályozók egységes szempontrendszer szerinti minősítése az alábbi szempontok alapján:

- Idővel súlyozott négyzetes integrálkritérium (Integral of Time-weighted Squared Error (ITSE)) kritériumfüggvény,
- Energiafogyasztás,
- Munkapont változására adott válasz (fűtőlápok termikus paraméterei),
- Célhőmérséklet változására adott válasz,
- A szabályozási algoritmusok és stratégiák komplex, technológiai szemléletű összehasonlítása.

A fenntartható fejlődés sarkalatos pontja az energiahatékonyság, így dolgozatomban egy olyan megoldás létrehozása a cél, mely a napenergia termikus hasznosításával kiegészítve folyadék munkaközegű fűtőlápok optimális hőmérsékletszabályozását képes elvégezni.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A dolgozatom ezen fejezete a hazai és nemzetközi szakirodalom segítségével mutatja be az állattartásban is alkalmazott napenergiahasznosítási lehetőségeket, a napkollektorokat, a szoláris hőtárolókat, valamint a napenergia termikus hasznosítását szolgáló berendezések további részeit, ezen kívül a dolgozatban vizsgált szabályozási algoritmusokat, az alkalmazott mérési és jelkondicionálási módszereket, valamint blokkorientált modellezést.

2.1. Megújuló energiák használata állattartásban

Irodalmi források szerint napjainkban mind az iparban mind a mezőgazdaságban egyre elterjedtebb módon alkalmazzák a nap energiáját fűtési célokra (Xie et al., 2019).

Általánosságban elmondható, hogy a világ energiafogyasztásának mintegy 40-50%-át teszi ki az épületek energiaszükséglete (Ortiz et al., 2010). Mun és kollégái kutatásai tanúsága szerint malacneveldek esetében 15% energiamegtakarítást lehet elérni kiegészítő napenergiás fűtés alkalmazásával (Mun et al., 2015). Paris és társai különböző állatok tartásának energiaszükségletét vizsgálta, és megállapították, hogy a sertéstartás a második legnagyobb energiaszükségletű, valamint, hogy az etetés energiaigénye után az istálló mikroklímájának kialakítása a legnagyobb. Javasolja megújuló alkalmazását (Paris et al., 2024). Jahangir és társai az ipari állattartás széndioxid lábnyomát vizsgálja és megállapítja, hogy megújuló energiaforrások alkalmazásával átlagosan akár 176,15 kg széndioxid kibocsájtást is meg lehetne spórolni állatonként megújuló energiák alkalmazásával (Jahangir et al., 2022). Tryhuba társaival szintén a széndioxid kibocsájtást vizsgálja, bár ők szarvasmarha tenyésztésre fókuszálnak, de megállapítják, hogy a fosszilis energiák kiváltásával egy Ukrajnai állattartó telepen akár 73% energiamegtakarítást is képesek voltak realizálni (Tryhuba et al., 2025). Magnolo és társai ugyancsak a megújuló energiaforrások állattartásbeli fontosságát tárgyalja, bár ők a biogáz felhasználásra koncentrálnak (Magnolo et al., 2024).

A hazai és a nemzetközi szakirodalom egyaránt alaposan tárgyalja a szabályozástechnika azon ágazatát, amely a megújuló energiák, különösen a napenergiás rendszerek optimális kihasználására összpontosít.

Napjainkban ez egy rendkívül időszerű és fejlődő kutatási ágazat. Kevésbé kutatott terület mindazonáltal a napenergia termikus hasznosítása olyan hőmérsékletingadozás érzékeny területeken, mint a sertéstartás, ahol Johnson és társai megállapításai szerint a malacok komfortérzete az elsődleges szempont a stressz elkerülése céljából (Johnson et al., 2018), mely hátrányos hatással van az állat fejlődésére.

Tapasztalataim szerint a termikus napenergiát hasznosító padlófűtési rendszerek, melyeket malacnevelőkben alkalmaznak sokszor nem képesek tartani az elvárt hőmérsékleteket, mivel nagy időállandójú (Kull et al., 2019) sok paraméterrel rendelkező (Lu et al., 2020) rendszerről van szó. Éppen ezért jellemző, hogy a gazdák a drágábban üzemeltethető villamos padlófűtést választják a nap energiáját közvetlenül hasznosító rendszerek helyett.

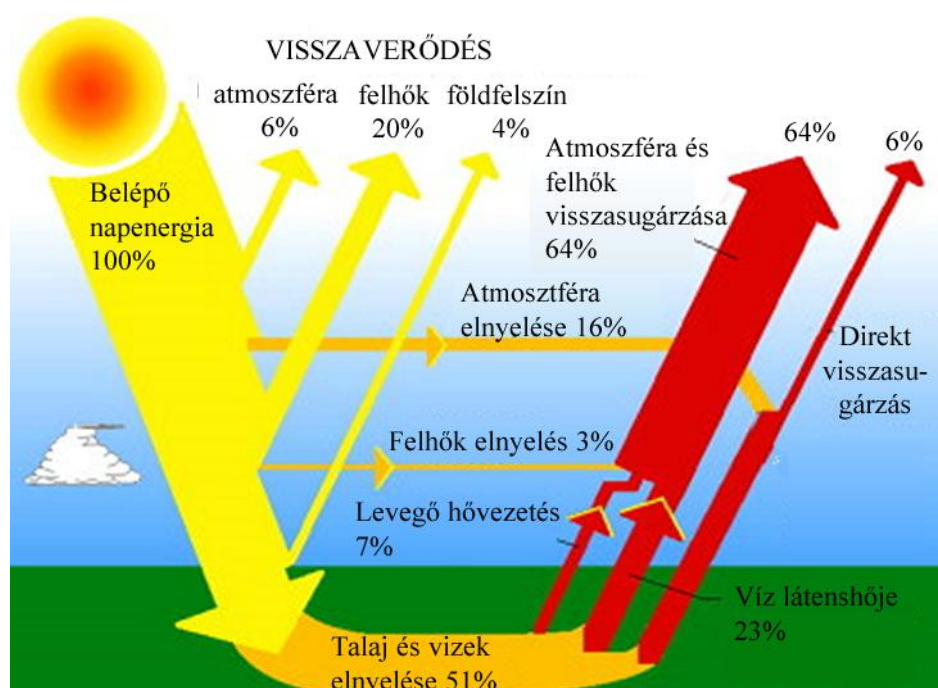
2.2. Napenergia

Naprendszerünk központi csillaga egy, a Föld átmérőjének 109 szeresével és tömegének 33000 szorosával rendelkező égitest, mely plazmaóriás a naprendszer tömegének mintegy 99,86%-át teszi ki (Woolfson, 2000).

Ez az égitest szolgáltatja a földre érkező energia túlnyomó többségét, mely fény és hő formájában érkezik a föld felső légkörébe. Itt egy négyzetméterre átlagosan 1361 W merőlegesen beeső teljesítményt mérhetünk, mely mennyiséget napállandónak nevezünk (Kopp, Lean, 2011).

Ezen mennyiség csak egy része – időjárási viszonyoktól függően, átlagosan 41%-a – éri el a földfelszínt, a veszteségeket a 2.1. ábra szemlélteti. A különböző időjárási körülmények különböző felhősödéssel járnak, s így a felszínre érkező napsugárzásintenzitás mértékét is jelentősen módosítják (Horánszky, 2005):

- erősen felhős időben: 250-300 W/m²,
- gyengén felhős, átlagos időben: 500-600 W/m²,
- derült, nyári idő esetén: 900-1000 W/m².



2.1. ábra A földre érkező napsugárzás megoszlása (Tian, Zhao, 2013)

A napenergia hasznosításának két fő csoportja létezik:

- közvetlen,
- közvetett.

A közvetett módon történő fölhasználás további négy főcsoportra bontható:

- szél,
- víz,
- biomassza,
- talajhő.

A közvetlen felhasználás a dolgozatomban szempontjából fontosabb, így ezt a felhasználási módot részletesebben mutatom be:

- passzív,
 - o építészet,

- aktív,
 - o fotovillamos,
 - o fototermikus.

A közvetlen hasznosítás alkalmával a hőenergiát melegítésre, vagy abszorpciós hűtők esetén áttételesen hűtésre alkalmazzuk, a megtermelt villamos energiát mechanikai energiává alakítva rendkívül sokrétű módon használhatjuk fel (Pribelszky, 2012). Napenergiával megtermelt villamos energia termikus hasznosítása nem bevett szokás a többszöri energiaátalakítás hatásfokrontó hatása miatt.

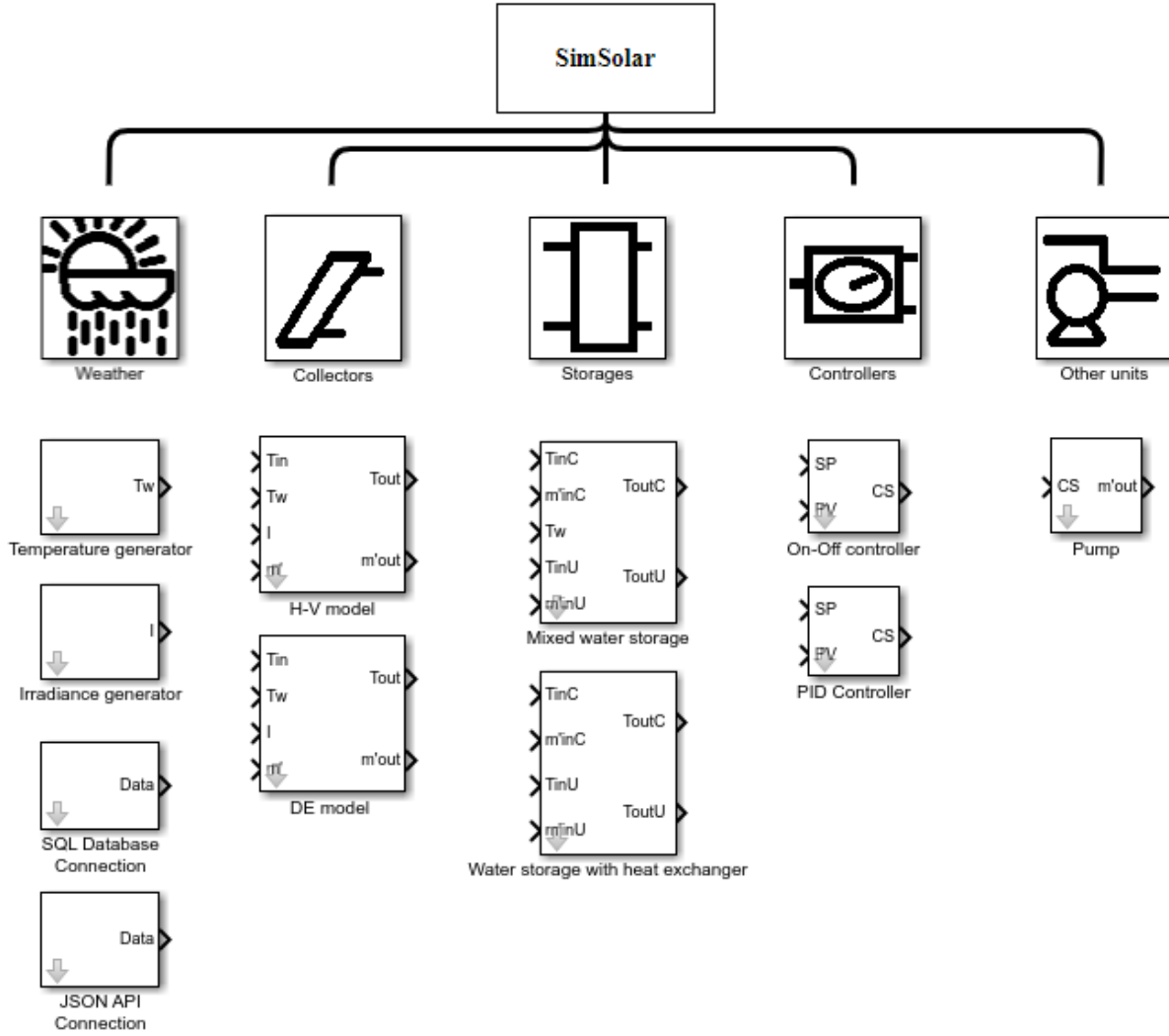
A közvetlen felhasználás tehát lehet aktív vagy passzív felhasználás, ahol a passzív felhasználás esetében a beérkező energiát külön kiegészítő berendezések nélkül hasznosítjuk (Farkas, 2003), míg az aktív felhasználás esetében az energiát külön e célra gyártott berendezésekkel hasznosítjuk, melyek az alábbi két csoportra bonthatók:

- fotovillamos hasznosítás esetén félvezető anyagokat alkalmazunk, melyekben napsugárzás hatására töltésszétválasztás történik. A kimeneti energia egyenáram formájában keletkezik (Fahrenbruch, Bube, 1983),
- fototermikus hasznosítás esetén a napsugárzás energiáját elnyelés útján hővé alakítják az úgynevezett napkollektorban. Az így keletkezett hőenergia használati melegvíz előállítására, fűtésre, illetve egyéb energiaforrású fűtés kiegészítésére használható (Kalogirou, 2004).

Mivel dolgozatomban a fűtési rendszer energiahatékonyságának javítása érdekében kiegészítő termikus napenergia-hasznosítórendszert kívánok alkalmazni, így a napkollektorokat részletesebben mutatom be.

2.3. SimSolar szimulációs keretrendszer

Tóth J. (2021) munkájának célja egy olyan szimulációs keretrendszer létrehozása volt, mely kifejezetten a termikus napenergiahasznosító rendszerek egyszerű blokkorientált modellezését hivatott megkönnyíteni. A 2.2. ábra a SimSolar szimulációs keretrendszer felépítését szemlélteti. Ez a keretrendszer magában foglal különféle szimulációs blokkokat, úgy, mint az Időjárás, Napkollektorok, Tárolók, Szabályozók és az Egyéb egységek.



2.2. ábra A SimSolar szimulációs keretrendszer (Tóth, 2021)

Ez a keretrendszer jó alapot nyújt az én munkámhoz, mely többek közt ennek a keretrendszernek a bővítését, illetve, ahol szükséges, pontosítását célozza.

2.4. Környezeti átlaghőmérséklet és napsugárzás közelítő függvények

Mivel a kutató munkám elsődleges célja olyan szabályozási algoritmus és stratégia meghatározása, mely energiahatékony módon képes biztosítani az állatjóléti irányelvek alapján elvárható magas minőségű hőmérsékletszabályozást kontakt fűtőlapok esetén, így a környezeti jellemzők, mint például az időjárás nem hanyagolhatóak el. Annál is fontosabb az időjárás megfelelő modellezése, mivel az elképzelésem szerint az energiahatékonyság egyik legkézenfekvőbb megvalósítási módja a napenergia felhasználása.

Ebben a fejezetben tehát a meteorológiai adatokat szolgáltató blokkok működését mutatom be.

A SimSolar keretrendszerben használt hőmérséklet-szolgáltató blokk egy validált matematikai modell (Farkas, 1999) alapján generálja egy adott nap környezeti hőmérséklet-eloszlását. A modell leíró egyenlete a következőképpen alakul:

$$T_w(\tau) = T_a \cos\left(\left(\frac{\pi}{12}\right)(\tau - \tau_\omega)\right) + T_m. \quad (2.1)$$

Az egész évre vonatkozó modell paraméterei további függvényekkel közelíthetők (Farkas, 1999), így a modell képes megfelelően közelíteni az éves hőmérséklet-eloszlást. A paraméterek éves változásának leírására alkalmazott függvények a következők:

$$\hat{T}_a(N_{Day}) = a_1 N_{Day}^2 + a_2 N_{Day} + a_3, \quad (2.2a)$$

$$\hat{T}_m(N_{Day}) = (a_4 N_{Day}^2 + a_5 N_{Day} + a_6) e^{-\left(\frac{N_{Day}-a_7}{182,5}\right)^2}, \quad (2.2b)$$

$$\hat{\tau}_\omega = a_8, \quad (2.2c)$$

ahol az a paraméterek értékei derült napokra a következők:

$$\begin{aligned} a_1 &= -0,0001298, & a_2 &= 0,04555, & a_3 &= 2,689, & a_4 &= -0,001107, \\ a_5 &= 0,4396, & a_6 &= -19,86, & a_7 &= 195,0, & a_8 &= 14,0. \end{aligned}$$

A Hőmérséklet generátor blokkban csak a kezdeti napot kell beállítani, a szimulációs idő felhasználásával az adatok automatikusan generálódnak.

A környezeti hőmérséklet generáló blokk egyetlen bemeneti paraméterét, a kezdeti napot, amittől a generálás indul, a Simulink környezetben egy maszk segítségével adhatjuk meg.

Szintén a SimSolar keretrendszerben található a napsugárzásintenzitás generátor, mely szintén egy validált modellen (Farkas, 1999) alapuló blokk. A vízszintes síkra jutó napi napsugárzás intenzitás becslését leíró összefüggés a következő:

$$I(\tau) = \begin{cases} I_a \cos\left(\left(\frac{\pi}{2\tau_h}\right)(\tau - \tau_\omega)\right) e^{-\left(\frac{\tau - \tau_\omega}{\tau_h}\right)^2}, & |\tau - \tau_\omega| \leq \tau_h, \\ 0, & |\tau - \tau_\omega| > \tau_h. \end{cases} \quad (2.3)$$

A modell paramétereinek éves változása közelíthető további függvények segítségével (Farkas, 1999), amelyek lehetővé teszik az egész éves napsugárzás-eloszlás modelljének létrehozását. Az egyes paraméterek leírására használt függvények a következők:

$$\hat{I}_a(N_{Day}) = (c_1 N_{Day}^2 + c_2 N_{Day} + c_3) e^{-\left(\frac{N_{Day}-c_4}{182,5}\right)^2}, \quad (2.4a)$$

$$\hat{\tau}_h(N_{Day}) = c_5 N_{Day}^2 + c_6 N_{Day} + c_7, \quad (2.4b)$$

$$\hat{\tau}_\omega = c_8, \quad (2.4c)$$

ahol a c paraméterek értékei derült napokra:

$$\begin{aligned} c_1 &= -0,007084 & c_2 &= 3,7375 & c_3 &= 216,8 & c_4 &= 134,0 \\ c_5 &= -0,0001319 & c_6 &= 0,04587 & c_7 &= 3,657 & c_8 &= 11,50 \end{aligned}$$

A blokkban csak a kezdeti napot kell beállítani, a szimulációs idő felhasználásával az adatok automatikusan generálódnak. A blokk hasonlóan a hőmérséklet generátorhoz egy bemeneti paramétert, az év kezdőnapját kapja bemenetként.

Ezt a két blokkot módosítás nélkül fogom alkalmazni.

Tóth János munkájában továbbá kitért az online adatbázisok által szolgáltatott adatok elérhetőségére (Tóth, Farkas, 2021), de munkámban ezeket a megoldásokat nem veszem igénybe.

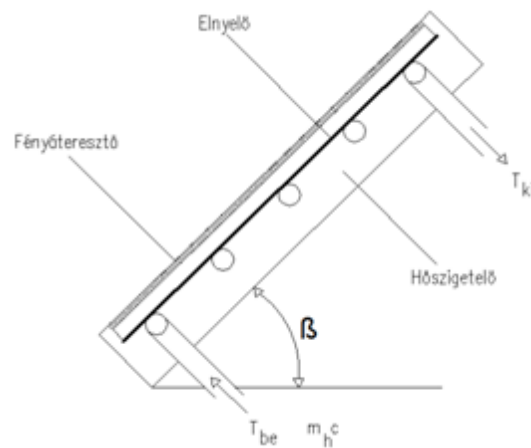
2.5. Napkollektor

Azokat a mesterséges eszközöket, melyek a nap hőenergiáját gyűjtik, napkollektornak nevezzük (Véghely, 2012).

A napenergia melegvíz-termelésre történő első használata az 1900-as évek elejére tehető, amikor a mai változatokhoz hasonlító őskollektorok Angliában és Amerikában megjelentek. Elterjedésüket különösen az 1973-as olajválság gyorsította fel. Napjaink legnagyobb napkollektor felhasználói között találjuk Kínát az első, Európát pedig a második helyen (Varga, 2017).

Vahidhosseini és társai hőtárolós napenergiás rendszereket mutat be, többféle kollektortípust is összehasonlítanak. Az összehasonlítás alapján megállapítom, hogy az állattartásban fontos szempontok, így az alacsonyabb bekerülési és fenntartási költségeket figyelembe véve a síkkollektort érdemes a továbbiakban vizsgálnom (Vahidhosseini et al., 2024).

Egy napkollektor általános felépítését a 2.3. ábra mutatja be.

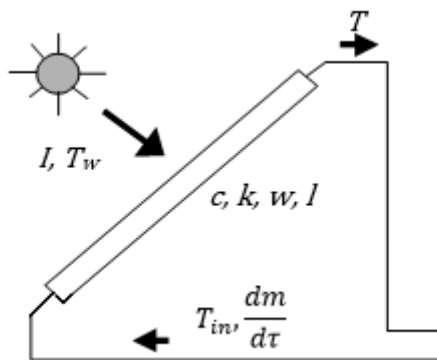


2.3. ábra Napkollektor általános felépítése (Horváth, 2011)

Az abszorber, vagy elnyelő réteg feladata a napsugárzás lehető legszélesebb spektrumon történő elnyelése, hővé alakítása. A fényáteresztő fedés feladata kettős, mechanikus védelmet és termikus szigetelést biztosít a lehető legalacsonyabb napsugárzáselnyelés mellett. A napkollektor hátoldalán a hőszigetelés csökkenti a hátoldalon leadott hőmennyiséget. Az abszorber által előállított hőenergiát a hőhordozó közeg szállítja a felhasználás helyszínére. A közeg lehet folyadék, de gáz is. Mivel a gázoknak alacsony a sűrűségük és jellemzően alacsony a hőátadási tényezőjük, fűtési rendszereknél inkább a folyadékmunkaközegű megoldást alkalmazzuk (Horváth, 2011).

A SimSolar keretrendszer két napkollektor modellt is tartalmaz, ezek a Hottel-Whillier (Rátkai et al. 2024), illetve a differenciálegyenlet modell (Tóth, 2021). A munkámban a Hottel-Whillier féle modellt fogom alkalmazni, mivel Tóth J. szerint ez a modell, habár kissé pontatlanabb ($R_{H-W}^2 = 0,97$), mint a differenciálegyenlet modell ($R_{DE}^2 = 0,978$), viszont a számítási kapacitási igénye kisebb.

A Hottel-Whillier modellt a 2.4. ábrán látható kollektorra értelmeztem.



2.4. ábra Kollektor sematikus vázlata

A modellt leíró egyenlet a következő:

$$T_{co}(\tau) = T_w(\tau) + \frac{I(\tau)}{\kappa_{aw}} + \left(T_{ci}(\tau) - T_w(\tau) - \frac{I(\tau)}{\kappa_{aw}} \right) e^{-\frac{\kappa_{mw} w_c l_c}{c m}}. \quad (2.5)$$

A modellben szereplő paraméterek nagy része mérhető vagy katalógusadatokból rendelkezésre áll, azonban a κ_{aw} és κ_{mw} hőátadási tényezők közvetlen mérése problémás lehet, és ezért általában ezeket az adatokat az adott kollektorra mérési adatok alapján identifkálni kell.

Mivel valós napkollektoron nem volt lehetőségem méréseket végezni, így dolgozatomban szakirodalomból vett, folyadék munkaközegű napkollektoron identifikált modell, következőkben megadott paramétereit használtam (Farkas, 1999): $\kappa_{aw} = 20,576 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $\kappa_{mw} = 66,205 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $l_c = 1,91 \text{ m}$ és $w_c = 0,95 \text{ m}$.

2.6. Hőtároló

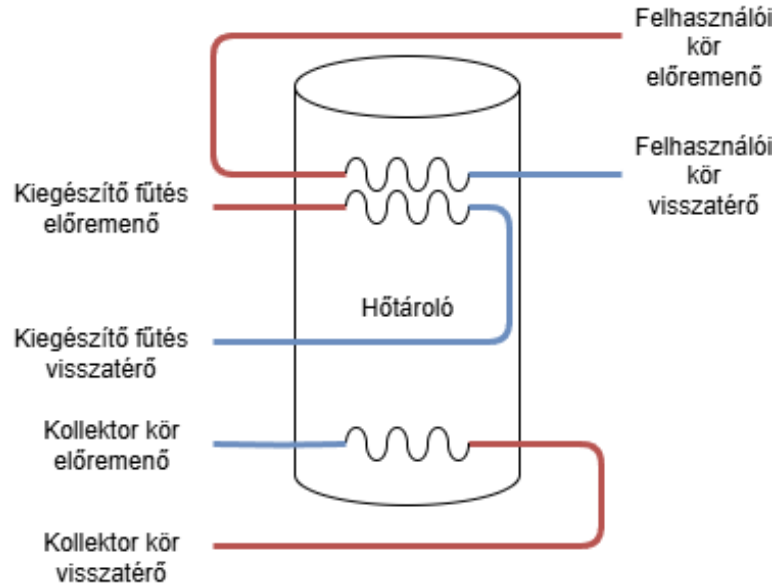
Vahidhosseini és társai, valamint Wang és társai is foglalkoznak termikus napenergiahasznosításban alkalmazott hőtárolókkal és tárgyalják a fázisváltó anyagok használatának lehetőségét. Wangék megállapítják, hogy ez egyelőre nem kiforrott technológia és habár perspektív, én mégis a gyakorlatban alkalmazott vizes hőtárolók vizsgálata mellett döntök (Vahidhosseini et al., 2024), (Wang et al., 2022).

A napenergiát (is) hasznosító rendszerek kiemelten fontos eleme a hőtároló tartály, hiszen a begyűjtött hőenergiát raktározni szükséges a napsugárzás bizonytalan jellegéből, valamint a napsütéses órák számának korlátozott számából kifolyólag. Jellemző az is, hogy a pillanatnyi hőenergiaigénye a rendszernek meghaladja a pillanatnyilag elérhető napsugárzásintenzitásból adódó energiabemenetet. A dolgozatban a sertéstartásban jellemzően alkalmazott megoldásokra való tekintettel a rövid idejű (24 óráig hatásos) hőtárolókkal foglalkozom.

Ezen hőtárolók térfogata a napkollektoros rendszer összfelületével arányosan változik. A hőtároló térfogata tipikusan négyzetméterenként 50-100 liter között van (Rodríguez-Hidalgo et al., 2012) a hőtároló közeg pedig a bekerülési költségre való tekintettel jellemzően víz, mely magas fajhője és egyszerű kezelhetősége miatt, valamint a felhasználás jellemző módjára való tekintettel (folyadék munkaközegű fűtési hőleadó felületek esetén) kiválóan alkalmazható e célra (Fath, 1998).

Munkám során több hőtároló modelljével is foglalkoznom kell, hiszen a kísérleti rendszerben alkalmazott hőtároló edény egy atmoszférikus nyomású, víz tárolóközegű, két hőcserélővel ellátott típus, lásd 2.5. ábra. Ennél a típusnál a kollektor körben keringő jellemzően fagyálló folyadék egy hőcserélőn keresztül adja le a hőt a tárolóközegnek. Ezt a megoldást jellemzően

szivattyús keringtető rendszerek esetében alkalmazzák, hőcserélőként pedig csőkígyót alkalmaznak a tartály alsó negyedébe építve (Horánszky, 2005). Ezen hőtárolótípusokban is megfigyelhető a hőtárolóközegben nyugalmi állapotban fellépő hőmérsékleti rétegződés (Bouhal et al., 2017), melyet azonban, mivel nem nyugalmi állapotban vizsgálom a rendszert, elhanyagoltam.



2.5. ábra Az alkalmazott hőtároló felépítése

Buzás és társai 1998-ban publikáltak egy hőtárolómodellt csőkígyóval, melyet részleteiben fogok alkalmazni a saját céljaim elérésére (Buzás et al. 1998). A hőtároló tartályt leíró egyenletek a következők:

A hőcserélő csőkígyóból kilépő fluidum hőmérséklete:

$$T_{Stor2Pad} = (T_{Pad2Stor} - T_{Stor}) e^{\left(-\kappa_{ex} \frac{A_{Stor2Padex}}{Q_{Pad} \rho c_v}\right)} + T_{Stor}, \quad (2.6)$$

míg a tartályban uralkodó hőmérsékletváltozást leíró egyenlet a következő:

$$\frac{dT_{Stor}}{dt} = \left(\frac{Q_{Coll} (T_{Coll2Stor} - T_{Stor2Coll})}{V_{Stor}} \right) - \left(\frac{Q_{Pad} (T_{Stor2Pad} - T_{Pad2Stor})}{V_{Stor}} \right). \quad (2.7)$$

A SimSolar keretrendszer ugyan tartalmaz hőtároló modellt, de ez számomra sem célravezető, hisz a modellkísérletek során egy két, illetve három hőcserélőt alkalmazó hőtárolótartályt fogok alkalmazni (tisztán kollektoros rendszer, kiegészítő fűtést tartalmazó rendszer), mely nem része a szimulációs keretrendszernek, így ez a modell a keretrendszer kiegészítéseként fog szolgálni.

2.7. Keringtető szivattyú

A fototermikus rendszerek jellemzően két keringtetési körből állnak, ezek:

- kollektor oldali,
- felhasználó oldali.

Az alkalmazott szivattyúknak különleges elvárásoknak kell megfelelniük, lévén a hőtermelés szabályozatlan, így az üresjáratú magas hőmérsékletet, illetve a fagyálló folyadék viszkozitásváltozását, valamint a rendszer nyomás alatt történő üzemelését is számításba kell venni (Horánszky, 2005).

A SimSolar keretrendszer ugyan tartalmaz egy szivattyú modellt, de ennek funkcionalitása nem teljes, valamint térfogat kiszorítás elvén működő szivattyút modellez. Az alkalmazott szivattyú típus viszont leggyakrabban centrifugál szivattyú (Mammoli et al., 2010). Ennek modellezésére egy új szivattyúmodellt hozok létre a meglévő keretrendszer bővítésére. A centrifugál szivattyú fizikai alapú modellezése nehézkes (Lin et al. 2021), így az iparban is elfogadott módon, a szivattyúmodellem mérési eredmények alapján (Mathworks, 2024a), úgynevezett lookup table segítségével valósul meg.

2.8. Tágulási tartály

Mivel mind a kollektor kör, mind a felhasználói kör zárt rendszer, fontos foglalkozni a működés során fellépő hőmérsékletváltozással együtt járó hőtágulási közeg térfogatváltozással is. Ennek megoldására ezen rendszerekben tágulási tartály(oka)t helyeznek el, melyek lehetővé teszik, hogy a rendszer hőmérsékletváltozásával a táguló folyadék ne okozhasson katasztrofális tönkremenetelt (Sommer et al., 2019). A tágulási tartály méretezésekor figyelembe kell venni a rendszer össztérfogatát, mivel a folyadék 100 °C hőmérséklet emelkedés mellett körülbelül 5%-os térfogatonövekedést, míg 150 °C hőmérsékletemelkedés mellett már 9%-os tágulást mutat (Horánszky, 2005).

A modellkísérleteimben a tágulási tartályt elhanyagolom, mivel méréseim szerint a rendszer nyomása nincs a vizsgált hőmérséklettartományon szignifikáns hatással a hőmérsékletek alakulására, csak a rendszernyomásra, ami viszont nem befolyásolja az áramlási tényezőket oly mértékben, hogy a szimulációs kísérletekben figyelembe kelljen venni.

2.9. Csővezeték rendszer

Mivel a kollektorkörben a működési hőmérséklet 120-180 °C között változhat (Raul et al., 2018) illetve a maximális működési nyomás 6 bar, így jellemzően vörösréz csöveket használnak ebben a körben. A felhasználói kör csővezetékeinek kialakításakor az alacsonyabb hőmérséklet és nyomás miatt nem csak az említett vörösréz vezetékeket, hanem az alacsonyabb bekerülési költségű ötrétegű alumínium csöveket is alkalmazzák. Mindkét esetben fontos a csővezetékek adekvát hőszigetelése is (Keçebaş et al., 2011). A kollektorkör szignifikánsan magasabb hőmérséklete miatt ezen körben a közet- vagy üveggyapot alapú fóliával burkolt csőháj, vagy egyéb szintetikus gumi csőhajak használatosak (Horánszky, 2005), míg a felhasználói oldal csővezetékeit jellemzően könnyebben kezelhető, olcsóbb habosított műanyag csőhajakkal fedik be. A csővezetékek modellezése esetemben csak a hőveszteségre fog korlátozódni.

2.10. Felhasználói oldal elemei

A következőkben a felhasználó oldal elemeit mutatom be.

2.10.1. Főjtőszelep

A többkörös rendszerek esetében a fűtés szabályozása legegyszerűbben egyszerű elzárószelepekkel valósítható meg, amelyek közül a golyóscsap egy robusztus, jól bevált eszköz. Ezzel az eszközzel kétállású szabályozást lehet a legkönnyebben megvalósítani, azonban a szabályozó beállításától függően (jellemzően a hiszterézis mértékétől) nagy eltérések tapasztalhatók a szabályozott jellemzőben, így az állatok komfortérzete nem biztosított. A másik hagyományos algoritmust, az arányos integráló differenciáló (PID) jelkompenzálást

egyszerűsége és elfogadható teljesítménye miatt szintén széles körben használják fűtési alkalmazásokban.

A korszerűbb folyamatos beavatkozást megvalósító szabályozási algoritmusok bevezetése azonban folytonosan működtethető, tehát nem elzárószelep jellegű működtető elemek (végrehajtó és beavatkozó szerv) meglétét feltételezi, ezért egy régi rendszer utólagos felújításakor elengedhetetlen, hogy a korábban ki-be kapcsoló szelepként használt szelepek köztes állapotokban, kvázi fojtószelepként is használhatók legyenek.

A gömbcsapok folytonos szabályozásra való alkalmazását többen is kutatják, de jellemzően a gömbcsap átfolyási karakterisztikájának linearizálása útján, tehát a gömbcsap elzáróelemének kialakításának megváltoztatása útján. Chen és társai, valamint Zhao és társai is ebben az irányban végeztek kiterjedt vizsgálatokat, CFD szimulációkat, valamint működőképes modelleket hoztak létre, melyeket átfolyási vizsgálatoknak vetettek alá. A két kutatócsoport munkája eredményes, de az új gömbcsaptípus gyártástechnológiája bonyolult, illetve tömítettségi gondok nehezítették a tesztelést (Chen et al., 2021), (Zhao et al., 2024). Ezek alapján a költséghatékony, a jelenlegi rendszerek részét már képező konvencionális gömbcsapok vizsgálata mellett döntöttem.

A MATLAB/Simulink Simscape eszköztára tartalmaz egy golyóscsap modellt, amely fojtószelepként használható.

A modell két fő részre osztható: az egyszerűsített geometrián alapuló áramlási keresztmetszetet meghatározó egyenletre és a tömegáramot az előbbieken alapján kiszámító modellre.

Az áramlási keresztmetszet meghatározása

A Simscape *Ball Valve (IL)* izotermikus folyadék hálózatokban alkalmazható golyóscsap blokkja paraméterezhető analitikusan vagy táblázatos adatok használatával. Ha a blokkban a *nyitási karakterisztika az átfedő körök területe* opcióra van beállítva, akkor a blokk a golyóscsap golyófészkek csatlakozónyílás és a golyófurat közötti átfedés területét tekinti nyitás területnek. A modell a nyílás alakját a két kör közötti átfedés területével a forgásszög függvényében közelíti, bár a valóságban a golyó furatának átáramlás irányára merőlegessíkra vetített képe az elfordulással ellipszissé torzul. Azt is fontos megjegyezni, hogy a tényleges gömbcszelep teljes záródásához nem szükséges a záróelemet 90 fokkal elforgatni; a geometriától függően a teljes záródás korábban is bekövetkezhet.

A Simscape *Ball Valve (IL)* blokkja a MATLAB R2025a verzió dokumentációja szerint a következő beépített egyenleteket használja az áramlási keresztmetszet leírására (Mathworks, 2025a):

$$A_{Open} = \sin(\varphi') R_{Bore}^2 \left(\cos^{-1}(\lambda_{Bore}) - \lambda_{Bore} \sqrt{1 - \lambda_{Bore}^2} \right) + R_{Port}^2 \left(\cos^{-1}(\lambda_{Port}) - \lambda_{Port} \sqrt{1 - \lambda_{Port}^2} \right), \quad (2.8a)$$

$$\lambda_{Bore} = \frac{R_{Bore}^2 - R_{Port}^2 + l^2}{2 R_{Bore} l}, \quad (2.8b)$$

$$\lambda_{Port} = \frac{R_{Port}^2 - R_{Bore}^2 + l^2}{2 R_{Port} l}. \quad (2.8c)$$

A 2.8-as összefüggések két kör metszetével közelíti, ami azt jelenti, hogy a gömbcsap a modell szerint csak 90 °-os elzáróelem elfordítás esetén zár el teljesen. Ez geometriától függően jelentős eltérés a valóságos viselkedéstől, ezért egy geometriailag helyes átfolyási keresztmetszet meghatározását lehetővé tevő modell felépítését tartom célszerűnek.

A tömegáram meghatározása

A tömeg- vagy térfogatáram meghatározása a modell egyik fő célja. A tömegáramot a Simscape a korábban ismertetett áramlási terület paraméter alapján határozza meg, az alábbi egyenletek (Mathworks, 2025a) szerint:

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\bar{\rho}} \frac{\Delta p}{(\Delta p^2 + \Delta p_{crit}^2)^{\frac{1}{4}}}, \quad (2.9a)$$

$$A = A_{open} + A_{Leak}, \quad (2.9b)$$

$$\Delta p_{crit} = \frac{\pi \bar{\rho}}{8A} \left(\frac{vRe_{crit}}{C_d} \right)^2, \quad (2.9c)$$

$$C_d = \frac{K_v}{A} \sqrt{\frac{\rho_{Water,15^\circ C}}{2\Delta p_{K_v}}}. \quad (2.9d)$$

A (2.9d) egyenletben a K_v a teljesen nyitott szelepen 15 °C-nál, 1 bar nyomásesés mellett átfolyó víz áramlási mennyisége m³/h-ban, a $\rho_{Water,15^\circ C}$ a víz sűrűsége 15 °C hőmérsékleten, a Δp_{K_v} pedig 1 bar.

Az áramlási sebesség kiszámításához használt egyenlet a Hagen-Poiseuille-törvényen alapul. Ezt a jól ismert törvényt folyadékáramlás, különösen lamináris áramlás jellemzésére használják (Poiseuille, 1840). Ez az összefüggés nagyon alapvető és jól dokumentált a folyadékmechanika területén, és számos alkalmazása van a folyadékáramlás tervezése és elemzése során.

Fontos megjegyezni, hogy az összefüggés alkalmazása vagy adaptálása különböző környezetekben és alkalmazásokban eltérő lehet, és különböző forrásokban más formában is megjelenhet (Réger et al., 2024), és módosított Torricelli-törvényként is ismert (Bärnkopf et al., 1984). A (2.9a) egyenletben bemutatott képlet a Hagen-Poiseuille-törvény egyszerűsített formája, amely jól alkalmazható egyszerűbb folyadékáramlási problémákra, de természetesen kiegészíthető további paraméterekkel vagy módosítható egyedi alkalmazásokhoz.

2.10.2. Fűtőlap

A dolgozatomban felhasznált fűtőlapmodell alapja megegyezik az egy hőcserélőt alkalmazó hőtároló modellel. A különbség az, hogy ez esetben csak a környezet felé leadott hővel számolok, valamint térfogattal, a csőkégyő hosszával és hőátadási tényezőkkel.

2.11. Dinamikus rendszerek modellezése, numerikus módszerek

A modellezés segítségével valós rendszereket képezhetünk le jellemzően egyszerűsítésekkel. A módszer előnye, hogy olyan rendszerek vizsgálata is lehetővé válik ezúton, melyek közvetlen vizsgálata túlzottan költséges, időigényes, bonyolult, vagy éppen lehetetlen. Az alábbi három módszer használatos (Huba et al., 2014):

- Fizikai modellezés, melynél a vizsgált jelenség alapján kicsinyített valós modelleket alkalmaznak. Ezek alkalmasak a valós rendszer modellezésére, így a költséges valós

rendszerek nélkül is képesek vagyunk a matematikai modelljeink felállítására, azok paraméteridentifikációjára, valamint a kismintán történő validálására.

- Analóg modell készítése, melyet más néven funkcionális modellnek is nevezünk. Jellemzője, hogy a valós jelenség vizsgálatára a valós rendszer működésétől eltérő, ám működésében, törvényszerűségeiben hasonló, jellemzően villamos modellt készítünk.
- Matematikai modell felállítása, mely a vizsgált jelenséget leíró matematikai egyenleteket, egyenletrendszereket, differenciálegyenleteket és -rendszereket, valamint a kezdeti- és peremfeltételeket, illetve azok megoldását tartalmazzák. A módszer előnye, hogy költség- és időhatékony megoldás, hiszen a modern számítástechnika segítségével egy, akár több hónapos vagy éves lefutású folyamat szimulációja gyakran akár percekben belül is lefuttatható.

A napenergiával támogatott termikus rendszerek ilyen területre történő alkalmazását nagyban segíti az, hogy ha lemodellezzük a rendszereket, és azok működtetésében optimumokat keresünk.

Ennek egyik legegyszerűbb módja az, hogy validált modelleken modellkísérleteket végezzünk szimulációs környezetben az optimális rendszerparaméterek és szabályozási stratégiák azonosítása érdekében. Az ipar által leggyakrabban használt szoftveres megoldások egyike a MATLAB® és annak különböző csomagjai, amelyek nagymértékben felgyorsítják az új módszerek tesztelését és bevezetését (Okereke és Keates, 2018), (Paluszek és Thomas, 2021), (Hossain, 2022), (Xue, 2022), (Kalechman, 2018), (Tóth, Farkas, 2018).

A differenciálegyenlet módszerek, melyek a folytonos idejű dinamikus rendszerek matematikai leírására különösen alkalmasak (Nagle et al., 2012), időtartományban használandók. Szintén alkalmasak az átviteli függvények (Paraskevopoulos, 2002), melyek operátor tartományban adnak megoldást és az állapotter modellek (Shumway és Stoffer, 2011). E három leíró módszer mindegyike alkalmas blokkorientált modellezési módszer esetén.

Mivel munkám során jellemzően elsőrendű közönséges differenciálegyenleteket használok a vizsgált jelenségek leírására, bemutatom ezek megoldhatóságának lehetséges módjait. A következő módszerek elsőrendű közönséges differenciálegyenletek megoldására alkalmasak (Ordinary Differential Equation, röviden ODE), a magasabb rendű egyenletek megoldása csak az egyenletek előzetes elsőrendű differenciálrendszerre való átírása után lehetséges.

A numerikus megoldók természetüknél fogva hibával dolgoznak, hiszen a függvényt valamilyen módon közelítik, nem analitikus megoldásról van tehát szó. Az analitikus és a numerikus megoldás különbsége a globális hiba (Cormen et al., 2001) (Lakoba, 2012). A hibát „O”-val jelölöm:

$$O(h) = h \frac{M(x_i - x_0)}{2}, \quad (2.10)$$

ahol:

$$|y''(x_i)| \leq M \leq \infty, \quad (2.11)$$

vagyis a globális hiba $O(h)$ -val jellemezhető (Lakoba, 2012). A globális hibából látható, hogy a h érték csökkentésével a hiba is csökken, Explicit Euler módszer (ODE1) esetén lineárisan.

A globális hiba h kitevője alapján szokás besorolni a megoldási módszert, tehát Az explicit Euler módszernek egy, az explicit középponti módszernek, ahol a lépésközon belül kétszer kerül kiértékelésre a függvény, kettő (Süli et al., 2003). A modern szoftverek ugyan lehetőséget

biztosítanak az alacsonyabb, (ODE1-3) rendű megoldófüggvények alkalmazására, s ezek matematikai leírása még egyszerűbb, a gyakorlatban jellemzően a változó lépésközű ODE45 megoldót alkalmazzuk. Amennyiben valamilyen szempontból fontos a fix lépésköz, az ODE 4 (Runge-Kutta) megoldófüggvény alkalmazható (Lofroth, 2024).

A közönséges differenciálegyenlet egyértelmű megoldásához használt kezdeti érték probléma (KÉP) közelítő megoldása:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \quad y(x_0) = u_0 \quad (2.12)$$

Egy tetszőlegesen rögzített pozitív, valós, kicsiny h lépésköz esetén az i -edik lépésben a KÉP megoldásának:

$$y(x_i) \approx y_i, \quad (2.13)$$

közelítését adja a:

$$x_i = x_0 + i \cdot h, \quad (2.14)$$

helyen, ahol a közelítés hibája a lépésköz kitevőjével azonos rendű.

A fent említett Runge–Kutta-módszercsalád általánosítása az explicit Runge–Kutta-módszer, amit a következő összefüggéssel írhatunk le:

$$y_{i+1} = y_i + h \sum_{n=1}^s b_n k_n, \quad (2.15)$$

ahol:

$$k_1 = f(t_n, y_n), \quad (2.16a)$$

$$k_2 = f(x_i + c_2 h, y_i + a_{21} h k_1), \quad (2.16b)$$

$$k_s = f(t_i + c_s h, y_i + a_{s1} h k_1 + a_{s2} h k_2 + \dots + a_{s,s-1} h k_{s-1}). \quad (2.16c)$$

Ahhoz, hogy meghatározzunk egy bizonyos módszert, kell a szakaszok számát meghatározó s változó (egész szám), illetve az a_{nj} ($1 \leq j < n \leq s$), b_n ($n = 1, 2, \dots, s$) és a c_n ($n = 2, 3, \dots, s$) együtthatók. Ezeket az adatokat tartalmazza a Butcher tábla:

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & & & & & & \\ c_2 & a_{21} & & & & & \\ c_3 & a_{31} & a_{32} & & & & \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & & \\ c_s & a_{s1} & a_{s2} & \dots & a_{s,s-1} & & \\ & b_1 & b_2 & \dots & b_{s-1} & b_s & \end{array}$$

A magasabb rendű megoldóalgoritmusok leírása zárt alakban matematikai módon nehézkes, ezért a megoldókban használandó együtthatók leírását szolgáló Butcher-táblázatokat jelenítem csak meg (Dormand et al., 1980).

Az általam vizsgát megoldási módszerek a következők:

1. Runge-Kutta (ODE4)

A Runge-Kutta módszer lényege, hogy egy lépésen belül a függvény négyszer kerül kiértékelésre, vagyis a hibája $O(h^4)$ azaz a rendje négy (Mathews és Fink, 2004). A módszer a mai napig használatos. A lépésköz, melyet 4 részre oszt fix, azt a felhasználó állítja be.

A 2.1. táblázat a klasszikus Runge-Kutta módszer Butcher-táblázatát mutatja be (Butcher, 2008):

2.1. táblázat A klasszikus Runge-Kutta módszer Butcher-táblázata

0				
1/2	1/2			
1/2	0	1/2		
1	0	0	1	
	1/6	1/3	1/3	1/6

Mivel ez a módszer objektívebb összehasonlíthatóságot tesz lehetővé a fix lépésköz alkalmazása miatt, ezt fogom használni.

2. Dormand-Prince (ODE45)

Ahogy láttuk, a numerikus megoldási módszerek hibája a h lépésköz függvénye, mely az ODE1-4 metódusok esetén előre beállított, fix érték. A problémára a Dormand-Prince módszer nyújt megoldást (Dormand, Prince, 1980), ahol a Dormand féle Butcher-táblázat utolsó előtti sor adja meg a negyedrendű megoldás súlyait, míg az utolsó az ötödrendűjét (Dormand, 1996).

A 2.2. táblázat mutatja be a Dormand-Prince módszer Butcher-táblázatát (Butcher, 2008):

2.2. táblázat A Dormand-Prince módszer Butcher-táblázata (Dormand, 1996)

0							
1/5	1/5						
3/10	3/40	9/40					
4/5	44/45	-56/15	32/9				
8/9	19327/6561	-25360/2187	64448/6561	-212/729			
1	9017/3168	-355/33	46732/5247	49/176	-5103/18656		
1	35/384	0	500/1113	125/192	-2187/6784	11/84	
	35/384	0	500/1113	125/192	-2187/6784	11/84	0
	5179/57600	0	7571/16695	393/640	-92097/339200	187/2100	1/40

A módszer eredmények összehasonlítása révén határozza meg a lépésközt. Az eljárás globális hibája $O(h^5)$ vagyis a rendje öt (Olemskoi, 2005), (Toshinori, 2009).

Blokkorientált modellezés

A blokkorientált modellezés a számítástechnika fejlődésével jött létre, a számítási kapacitás és a szimulációs szoftverek fejlődése hatására vált alkalmassá szimulációs feladatok kellő

pontosságú megoldására, technológiai folyamatok leírására, így például az általam vizsgált napenergiát is hasznosító rendszerek modellezéséhez (Farkas, 2017).

A blokkorientált modellezési technika esetén a teljes modell modulokra, úgynevezett blokkokra van bontva. Ezek a blokkok valójában mind ki és bemenetekkel rendelkező függvények, melyeket összekapcsolva alakul ki a végleges modell a blokkok egymásra hatásának eredményeként. A módszer nagy előnye a modularitásban, illetve a vizualizációban rejlik.

Kereskedelmi forgalomban több, a célnak megfelelő szoftver elérhető. Ezek a teljesség igénye nélkül a LabVIEW (Asmundis, 2011), TRNSYS (Kyn, Urban, 2013), a Polysun (Lacoste et al., 2010), illetve a MATLAB + Simulink (Keviczky et al., 2019).

2.12. Identifikáció és validáció

A modellezés során használt matematikai modellek paramétereit identifikálni szükséges annak érdekében, hogy a modell felhasználható legyen szimulációs kísérletek elvégzésére még akkor is, ha fizikai modellről van szó. Vannak ugyanis olyan paraméterek, melyeket közvetlenül mérni nem, vagy csak nagyon körülményes módon lehet mérni, de a rendszer viselkedése alapján ezek a tényezők meghatározhatóak indirekt módon is (Hamel, 1979), (Farkas, 1999). A munkám során felhasznált eljárást ebben a pontban mutatom be.

A cél az identifikáció során, hogy az ismeretlen paraméterek számszerű értékét úgy határozzuk meg, hogy az eredményül kapott modell viselkedése egy valós modellen történő mérési eredményeket minél jobban közelítse (Sontag, 2013), (Procházka et al., 1998). Az első feladatom tehát a modell és valós rendszer közti eltérés meghatározása, melyet hasonlóan a szabályozók optimalizálásánál alkalmazott célértékkereséshez a paraméteridentifikáció során minimalizálni kell a vizsgált $[\tau_0; \tau_1]$ intervallumon. A 2.17 egyenlet egy idővel súlyozott négyzetes integrálkritériumfüggvényt mutat be (Integral of Time-weighted Squared Error, röviden ITSE):

$$J(p_1, p_2, \dots, p_j) = \int_{\tau_0}^{\tau_1} (\check{y}(t) - \hat{y}(\tau, p_1, p_2, \dots, p_j))^2 dt. \quad (2.17)$$

Mivel a modellek megoldásához numerikus módszert alkalmazok, illetve a valós rendszer mérése diszkrét időpillanatokban történik, így a célfüggvény diszkrét alakja a következőképp írható fel n mérési pont esetén:

$$J(p_1, p_2, \dots, p_j) = \sum_{k=1}^n (\check{y}(k) - \hat{y}(k, p_1, p_2, \dots, p_j))^2. \quad (2.18)$$

A feladat tehát úgy megválasztani a $p_1, p_2, \dots, p_j$ paramétereket, hogy azok használata mellett a J függvény értéke minimális legyen (Lagarias et al. 1998):

$$\min_{p_1, p_2, \dots, p_j} J(p_1, p_2, \dots, p_j) \rightarrow p_1, p_2, \dots, p_j. \quad (2.19)$$

Az identifikálás megfelelőségét mérő minőségi jellemzőt hasonlóan a szabályozás minőségi jellemzőinek számításához többféleképp lehet meghatározni.

Emellett meghatároztam determinációs együtthatót, korrelációs együttható négyzetét, ami a mért és a szimulált eredmények illeszkedésének jósága így esetemben az identifikáció jóságának mérőszáma. Ehhez, a legkisebb négyzetek módszere alapján, először meg kellett határoznom az adott mérési pont és a mérések átlagának különbségéből alkotott négyzetek összegét (Mardia et al., 1979):

$$TSS = \sum_{i=1}^n (\check{y}_i - \bar{y})^2, \quad (2.20)$$

A mért és számított értékek különbségéből képzett eltérés négyzetösszegét:

$$RSS = \sum_{i=1}^n (\check{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (2.21)$$

amiből a determinációs együttható:

$$R_D^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}. \quad (2.22)$$

Az identifikált modelleket más mérési beállításokkal végzett mérési adatokkal összevetve lehetőség nyílik a modell validálására. (Douglas, 2019) Amennyiben az iparban elfogadott 5% eltérésen belül viselkedik a rendszer, tehát a determinációs együtthatója 0,95 felett van, a modellt használhatónak és modellkísérletek elvégzésére alkalmasnak tekintem.

2.13. Irányítástechnika

Az irányítás olyan művelet, mely valamilyen rendszer működésébe oly módon avatkozik be, hogy a folyamatban a kellő irányba térítse az irányított jellemzők alakulását (Konecsny, 2011).

Az irányításnak két változata van, a vezérlés és szabályozás (Paraskevopoulos, 2002), (Petz, 1996), (Mayr, 1970).

A fűtési rendszerek, különösen a malacnevelőkben alkalmazott kontaktfűtőlapok irányítástechnikája megköveteli a visszacsatolás meglétét, azaz a szabályozást, hiszen a rendszer optimális működése a cél.

2.14. Mintavételezés

A visszacsatolt, vagy más néven zárt hurkú irányítási megoldások, a szabályozások eredendő módon tartalmazzák a mérést. A megfelelő mérési elveket Shannon és társai fektették le még 1949-ben, mely felismerésüket Luke is igazolja. A gyakorlatban ezt az elvet gyakran, mint Shannon törvényét említik. Az elmélet azon alapszik, hogy Fourier transzformáció segítségével bármilyen sávhatárolt jel leírható szinuszos felharmonikusok összegével. Az elmélet alapján a mintavételezni kívánt jel legmagasabb, információt hordozó komponensének frekvenciájának kétszeresét szükséges alkalmazni mintavételi frekvenciaként (Luke, 1999), (Shannon, 1949).

A sávkorlátozáshoz elengedhetetlen szűrési módszereket Schaumann és társai is bemutatják és jelzik, a gyakorlatban megvalósítható aluláteresztő szűrők karakterisztikája miatt szükséges a sávkorlátozott jel mintavételezésénél magasabb mintavételi frekvenciát alkalmazni, mint azt Shannon és társai meghatározták (Schaumann et al., 2009).

2.15. Gyakorlatban alkalmazott szabályozóalgoritmusok

A fűtési rendszerek szabályozására a gyakorlatban alkalmazott irányítási algoritmusok bemutatását végzem ebben az alfejezetben.

2.15.1. Konvencionális szabályozóalgoritmusok

Jiang és társai, Liu és társai, valamint Guney és Cakir munkái megegyeznek abban, hogy fűtés szabályozási célra elterjedten a kétállású szabályozót hiszterézissel, a P, a PI és PID szabályozókat használják széles körben (Jiang et al., 2021), (Liu et al., 2024), (Guney és Cakir, 2025).

Jiangék munkája alapján kijelenthető, hogy a kétállású szabályozó ugyan elterjedt megoldás padlófűtési rendszerek szabályozására lakóépületek esetén, a padló hőmérsékletfluktuációja jelentős, mely, ha nem kontaktfűtésnek tekintünk rá, nem okoz problémát (Jiang et al., 2021).

Liu és társai a lengések csökkentése érdekében az kétállású szivattyúvezérlés mellett kiegészítő munkafolyadék hőmérséklet szabályozást javasol, de a méréseik alapján a rendszer holtideje, így a célérték változására adott válasza is jelentősen késik (Liu et al., 2024).

Guney és társai a kétállású szabályozó mellett proporcionális (P), proporcionális integráló (PI) és proporcionális integráló deriváló szabályozókat (PID) hasonlít össze, igaz kemence hőmérséklet szabályozására. A véleményük szerint a PID, valamint a PI szabályozók teljesítenek legjobban ($0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) maximális hiba alatt (Guney és Cakir, 2025).

A klasszikus szabályozók esetében sem Jiang sem Liu sem Guney nem foglalkozik változó munkapontú esetekkel, mint amilyen a sertéstartásban alkalmazott kontaktfűtőlápok viselkedése.

A PID szabályozó munkapontfüggősége miatt Abbas és Mustafa adaptív hangolási algoritmus használatának lehetőségét veti fel, de nem alkalmazza (Abbas és Mustafa, 2024).

2.15.2. Nagy időállandójú rendszerek szabályozása

A nagy időállandójú fűtési rendszerek szabályozásával több forrásmű is foglalkozik, így például Chen, Duddeti és Naskar, Farkas és Vajk, Tóth, Beizer, Thounthong, valamint Yu és társai is (Chen, 2002), (Duddeti és Naskar, 2024), (Yu et al., 2024), (Farkas és Vajk, 2005), (Beizer, 1995), (Thounthong, 2011), (Tóth, 2020).

Chen munkájában összehasonlítja a kétállású szabályozót a PI szabályozót, valamint a modell alapú szabályozót lakossági padlófűtési rendszerek esetében. Megállapítása szerint a modellalapú szabályozók használata célszerű ilyen típusú rendszerek esetén, de számítási kapacitásigénye miatt a gyakorlatban nehezen alkalmazhatónak nevezi a megoldást, valamint nehézségként említi a paraméteridentifikációt, valamint a megváltozott paraméterek szabályozásra gyakorolt hátrányos hatását (Chen, 2002).

Farkas és Vajk megfogalmazása szerint a modell alapú szabályozás nem csupán egy egyszerű szabályozó algoritmus, hanem egy komplex rendszerszemléletet képvisel. Ebben a megközelítésben nemcsak a fizikai folyamatot figyeljük, hanem folyamatosan monitorozzuk és frissítjük annak matematikai modelljét is. Az aktuális adatok és a modell összekapcsolásával prediktív elemzéseket végezhetünk a jövőbeli viselkedésre vonatkozóan (Farkas és Vajk, 2005). Ennek köszönhetően azonnal észlelhetjük a rendszerhibákat, mivel a modelltől való jelentős eltérések figyelmeztető jelek.

Ezt a szabályozási módszert elsősorban nagy, összetett rendszerekben alkalmazzák, mivel a pontos matematikai modell valós idejű futtatása erőforrásigényes feladat. Ez a megközelítés kifejezetten alkalmas nagy válaszidővel rendelkező vagy holtidős rendszerek kezelésére, például a termikus napenergia hasznosító rendszerek területén.

A modell alapú szabályozás során Beizer szerint elengedhetetlen egy validált modell megléte, ami lehet white-box vagy black-box típusú. Itt nem a jelenség mélyebb megértése a lényeg, hanem az, hogy a számított eredmények megbízhatóak legyenek (Beizer, 1995).

Thounthong szerint a módszert nagy méretű, nagy időállandójú rendszerek szabályozására gyakran, főleg a prediktív képessége miatt alkalmazzák (Thounthong, 2011).

Tóth szerint a szabályozásnak három fő beállítási lehetősége van, amelyek jelentős hatással vannak a működésére:

- A predikciós határ: Ez meghatározza a szabályozó által megoldandó jövőbeli irányítási időtartamok összegét az optimalizálás során.
- Az irányítási határ: Ez az irányítási időtartam alatt optimalizált lépések számát határozza meg.
- A kimeneti jel korlátjai: Ezek a minimális és maximális értékek, amelyek között a kimeneti jel változhat.

Ezen értékek helytelen beállítása könnyen pontatlanságot vagy lassúságot eredményezhet a szabályozásban (Tóth, 2020).

Duddeti és Naskar a modell alapú szabályozók alkalmasságáról ír, de Chenhez hasonlóan ők is a nagy számítási kapacitásigényt említi és a modellek egyszerűsítésének lehetőségét tárgyalják (Duddeti és Naskar, 2024). Az előbb említett forráshoz hasonlóan itt sem jelenik meg a változó paraméterek melletti teljesítőképessége a modellalapú szabályozóknak.

Yu és társai már adaptív modellalapú szabályozást vizsgál, számítási kapacitásról nem tesz említést, de a vizsgálataik alapján kijelentik, hogy változó körülmények között működő fűtésszabályozójuk, konkrétan téli és nyári hónapokra nem alkalmas az adekvát hőmérséklet szabályozásra.

Az előzőkből látható módon a modellalapú szabályozók alkalmasak ugyan nagy tehetetlenségű rendszerek szabályozására, de változó munkapont, illetve megváltozott üzemeltetési paraméterek esetében viselkedésük nem kellőképpen robusztus.

2.15.3. Robusztus szabályozók

Korondi és Gyevikí szerint robusztus szabályozók alapját a csúszófelületek elmélete adja (Korondi és Gyevikí, 2006). Így tehát megvizsgáltam a csúszómód-szabályozók alkalmazhatóságát változó munkapontú rendszerek esetére. A csúszómód-szabályozók lényege, hogy a hiba-hiba derivált síkon egy adott trajektórián igyekezzen tartani a rendszer viselkedését, miközben diszkrét beavatkozószerkeket alkalmaz. A téma jelenkori felhasználásával többek közt Li és társai, Ahmed és társai, Aliká és társai, Zheng és társai, valamint Zhang és társai is foglalkoznak.

Li és társai a klasszikus csúszómód-szabályozó optimalizálási lehetőségeit vizsgálta villamos hálózatok frekvencia és feszültség szabályozására (Li et al., 2024).

A klasszikus lineáris csúszófelülettől (Korondi és Gyevikí, 2006) eltérő módon Ahmed és társai módosított csúszófelületű szabályozót terveztek, melynél a csúszófelületet egy exponenciális függvény adja, a szabályozó alul és túllendülési hajlamának csökkentése érdekében, szintén villamos hálózatok frekvenciaszabályozására (Ahmed et al., 2024).

Aliká és társai fuzzy szabályozóval módosított csúszómód-szabályozót alkotott autonóm járművek irányításában (Aliká et al., 2024).

Zheng és társai szintén egy fuzzy logikával kiegészített csúszómód-szabályozót vizsgáltak autonóm differenciál hajtású robot trajektóriájának irányításához.

Zhang és társai pedig permanens mágneses szinkron motorok csattogásmentes teljesítményszabályozása használt exponenciális csúszófelülettel rendelkező szabályozót.

A szakirodalomban végzett kutatás alapján megállapítottam, hogy a robusztus viselkedésű csúszómód-szabályozót jellemzően olyan alkalmazásoknál találjuk meg, ahol lehetőség van a kétoldali beavatkozásra. Hőmérsékletszabályozásra még autoklávok esetében sem találtam utalást, habár sok esetben ezek hűtő és fűtő körrel egyaránt fel vannak szerelve. Az egyoldali beavatkozási lehetőség, valamint a gyakorlatban limitált kapcsolási frekvencia megnehezítheti a szabályozás implementálását. Ennek ellenére mivel látható módon a csúszómód-szabályozók robusztus viselkedésük miatt alkalmasak lehetnek változó munkapontú rendszerek szabályozására, ezen szabályozótípust is vizsgálni fogom.

2.16. Mesterséges Intelligencia (MI) alapú szabályozók

A következőkben ismertetem a mesterséges intelligencia alapú szabályozók alkalmazhatóságát fűtési rendszerek esetén.

A Mesterséges Intelligencia (MI) alkalmazását szabályozásra Ahan és társai, Yu és társai, valamint Silvestri és társai is vizsgálták (Ahsan et al., 2024), (Yu et al., 2025), (Silvestri et al., 2024).

Ashan és társai irodaépületek hőmérsékletszabályozására vizsgálta az MI alkalmazhatóságát. Azt találták, hogy a szabályozó feltanításához szükséges kellő adatmennyiség egyelőre nem áll rendelkezésre, kiforratlan megoldásnak ítélték, nagy számítási kapacitásigénye miatt bírálták. Előrejelzésük szerint a későbbiekben vélhetőleg a megoldás alkalmas lesz épületek komfortérzetének javítására, különös tekintettel az emberek ruházatából eredő szubjektív hőérzetek kompenzálására (Ahsan et al., 2024).

Silvestri és társai lakóépület hőmérsékletszabályozására vizsgált megerősítéssel gépi tanulási módszert. Azt találták, hogy a szabályozás minőségi jellemzőiben nem tapasztalható szignifikáns eltérés a modell alapú szabályozókhöz képest, ellenben az energiafelhasználása 29%-al magasabb az előbb említetténél (Silvestri et al., 2024). A szabályozóalgorithmus számítási kapacitás igényét nem tárgyalták.

Yu és társai mezőgazdasági vonatkozásban, üvegházak belső hőmérsékletszabályozása esetében vizsgálta meg az MI alkalmazhatóságának lehetőségeit. Több MI modell típust vizsgáltak, de azok csak 0,96 és 0,99% közt voltak képesek teljesíteni. További problémaként vetik fel a robusztusság hiányát, valamint a megoldás számítási kapacitás igényét (Yu et al., 2025).

Az előbbiekből megállapítom, hogy a mesterséges intelligencia algoritmusok alkalmazása egyelőre nem célravezető becslő és nem determinisztikus természetű, valamint nagy számítási kapacitásuk miatt.

2.17. Kaszkád szabályozó

Mizsey szerint, ha két szabályozót oly módon kötünk össze, hogy az egyik szabályozó előállítja a másik szabályozó célértékét, kaszkád szabályozóról beszélünk.

A kaszkádszabályozás főként akkor alkalmazható, ha a szabályozott változó mellett létezik egy másik mérhető paraméter is, amelyen a módosított változóban bekövetkező zavarás hatása gyorsabban észlelhető, mint a szabályozott változón. Ezt a paramétert a szekunder kör visszacsatolt változója képezi, így a szekunder kör szűri az esetleges zavarásokat a módosított változóban. Elvárás a szekunder körrel szemben, hogy ezt lényegesen gyorsabban tegye, mint

ahogy a primer kör működik, ezért a szekunder kör gyakran egy egyszerű P szabályozást tartalmaz (Mizsey, 2011).

A kaszkád szabályozás gyakorlatilag bármelyik bemutatott szabályozóval, vagy ezek tetszőleges kombinációjával megvalósítható.

2.18. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A kutatási témát megalapozó forrásfeldolgozás során áttekintettem az állattartás területén hatályos állatjóléti direktívát, a mezőgazdaságban jelenleg alkalmazott energiahatékonysági törekvéseket leíró cikkeket, a termikus napenergiahasznosítást célzó berendezések felépítését. Áttekintettem továbbá munkám során vizsgálni kívánt szabályozási algoritmusokat, valamint az alkalmazandó blokkorientált modellezési, illetve szimulációs megoldások irodalmi hátterét.

A szakirodalom alapján megállapítható, hogy a nap energiájának termikus felhasználása az ősidőkig nyúlik vissza, aktív felhasználása az 1900-as évek elejére tehető. A modern rendszerekben a fototermikus energiát napkollektorokkal állítjuk elő, melyet jellemzően valamilyen fluidum segítségével tárolunk be szoláris hőtárolókba. A rendszerben keringő fluidum jellemzően keringtetőszivattyúk segítségével áramlik a csővezetéseken mind a kollektor, mind a felhasználói körben.

A termikus napenergiahasznosítás rendkívül kutatott terület, mind a kollektorok, valamint a hőtárolók tekintetében, de a felhasználói kör, különösen állattartás tekintetében kevésbé vizsgált. Számomra felhasználói körben elhelyezett fűtőlapok felületi hőmérsékletének szabályozása bír különös jelentőséggel, mivel szükséges azt a lehető legpontosabban szabályozni az állatok hőstresszének elkerülése érdekében, mely hátrányosan hat az állat fejlődésére.

A termikus napenergiahasznosítással kiegészített fűtési rendszerekről elmondható, hogy nagy időállandójú, változó munkapontú dinamikus rendszerek, melyek megfelelő szabályozás nélkül alkalmatlanok a szigorú követelmények betartására. Emiatt tapasztalható, hogy a sertéstartásban kedvezőbb megoldás a közvetlen villamos fűtésű, egyedileg szabályozott kontaktfűtőlapok alkalmazása, amely megoldás energiahatékonyságban alulmarad a fototermikus megoldással kiegészített fűtési rendszerekkel szemben.

A fentiek alapján olyan szabályozási módszereket, illetve ezen szabályozók hangolási metódusait tekintettem át, melyek alkalmasak lehetnek nagy időállandójú rendszerek kellő pontosságú szabályozására. Az irodalom szerint ilyen rendszerek irányítására a modell alapú szabályozók a legalkalmasabbak, viszont azok paraméterérzékenysége és nagy számítási kapacitás igénye nem teszi alkalmassá ezeket a vizsgált fűtőlapok szabályozására.

Az optimalizálási eljárások gyorsítására a szakirodalomban modellkísérleteket javasolnak, így áttekintettem a blokkorientált modellezési eljárásokat, valamint az iparban gyakran alkalmazott szoftverek által biztosított előre elkészített modelleket, melyeket alapos vizsgálatnak vetettem alá.

Mivel a modellezéshez, illetve a modellek kellően pontos használatához elengedhetetlen egy valós fizikai rendszeren történő mérési sorozat, áttekintettem a mérések megfelelő kivitelezését taglaló irodalmakat, különös tekintettel a jelkondicionálás és szűrés témakörökre.

A szakirodalmi elemzés alapján megállapítható, hogy a fűtési rendszerek energiahatékonyságára és minőségi jellemzőire is figyelmet fordító célértékfüggvények nem, vagy csak nem dokumentált módon léteznek.

Megállapítható továbbá, hogy nagy időállandójú, változó munkapontú folyadék munkaközegű rendszerek szabályozására a mai napig az kétállású szabályozó a legelterjedtebb megoldás, valamint, hogy az iparban használt blokkorientált, Simscape rendszer bizonyos modelljei nem kellő pontosságúak, lásd 2.11.1 fejezet és hogy a már létező hasonló indíttatásból fejlesztett SimSolar keretrendszerből hiányoznak a felhasználói oldal elemei.

Összefoglalva a termikus napenergiahasznosítás, a hőenergia tárolása rendkívül kutatott terület. Épületenergetikai szempontból termikus napenergiafelhasználással támogatott fűtési rendszerek használatával szintén foglalkoznak források. Habár több cikk is felveti az állattartásban megtakarítható energiafelhasználást megújuló energiák alkalmazásával, a sertéstartásban alkalmazott kontaktfűtőlapok munkapontfüggetlen, energiahatékony szabályozásával nem foglalkoznak kellő mélységben.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben bemutatom a kutatási céljaim megvalósításához használt kísérleti módszereket és eszközöket, amelyek a vizsgálataimhoz használt programok, illetve a kísérletekhez létrehozott kisminta rendszer és a rendszert felépítő elemek.

3.1. Blokkorientált modellezés

A munkám során az állattartásban használható termikus rendszerek matematikai modellezésével és szimulációjával foglalkozom, amihez elengedhetetlen egy szimulációs programcsomag. Mivel a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem rendelkezik MATLAB+Simulink Campus-Wide licenccel, így ezt a megoldást választottam (Tóth J., 2021).

A MATLAB egy programozási nyelv, illetve ezt a nyelvet támogató fejlesztői keretrendszer. Főként tudományos és műszaki számítások elvégzésére és az adatok vizuális megjelenítésére lett kifejlesztve.

Elterjedt eszköze a numerikus számítások elvégzésének (Ashino et al., 2000), valamint lineáris algebrai feladatok megoldásának (Stoyan, 2008). Támogatja továbbá a folyamatirányításban használt átviteli függvényeket és állapot-tér modelleket is (Simulink User's Guide, 2023).

A MATLAB programcsomaghoz rendelkezésre állnak úgynevezett Toolboxok, melyek tulajdonképpen egy-egy speciális feladat megoldásához tartozó függvénykönyvtárak, ilyen feladatok például az optimalizálási, a statisztikai és a görbeillesztési könyvtárak. A Simulink is egy ilyen Toolbox, mely támogatja a blokkorientált modellezést, így a bonyolult dinamikus rendszerek modellezését.

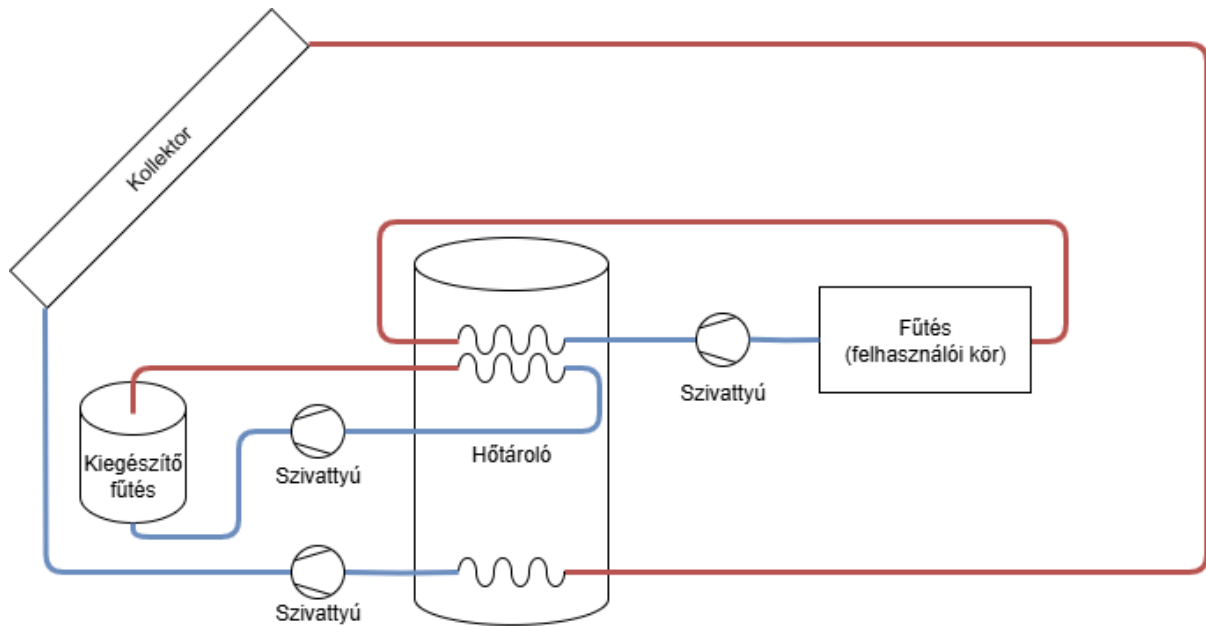
A MATLAB további Toolboxa a Simscape programcsomag, mely számomra a fluidtechnikai szimulációs lehetőségei miatt érdekes, viszont az irodalomkutatás során felfedeztem, hogy az általam használni kívánt fojtószelep típus modellje nem kellően pontos, így ennek alkalmazását elvettem lásd 2.11.1 fejezet.

A Simulink rendszer tartalmazza a közönséges differenciálegyenletek numerikus megoldásához leggyakrabban alkalmazott algoritmusokat, például a Runge–Kutta vagy a Dormand–Prince (Ashino et al., 2000), így megfelelő választás a kitűzött célok elérése érdekében.

A dolgozatban a termikus rendszerek vizsgálatához használt szimulációk a Simulink környezet 9.2 verziójával készültek.

3.2. Termikus napenergiahasznosító rendszer felépítése

A termikus napenergiahasznosító rendszerek általános felépítését a 3.1. ábra mutatja be.



3.1. ábra A termikus napenergiahasznosító rendszerek egyszerűsített felépítése

A rendszer tartalmaz egy napkollektort, ami a napenergiát hasznosítja hő előállítására. A kollektorból érkező hő egy hőtárolóba kerül, amely egy szigetelt tartály hőcserélő csőkégyőkkel.

A hőtárolóban három különálló hőcserélő található. Az alsó hőcserélőn keresztül a kollektorból érkező felmelegedett közeg áramlik, átadva a hőt a tároló vizének. Ezt a kört egy szivattyú keringteti.

A hőtárolóból a felmelegített víz átadja energiája egy részét a felső hőcserélőn keresztül a fűtési körnek, melyben a fluidum egy másik szivattyú segítségével jut el a fűtéshez, esetemben a kontaktfűtőlapokhoz. A lehűlt víz visszatér a hőtárolóban elhelyezett csőkégyőhöz, hogy újra felmelegedjen.

A rendszer tartalmaz egy kiegészítő fűtést is, ami egy különálló hőforrás lehet (például gázkazán vagy elektromos fűtés). Ez a hőforrás a hőtárolóba épített felső hőcserélőjén keresztül tudja felmelegíteni a vizet, amelyet szintén egy szivattyú keringtet. A kiegészítő fűtés csak akkor lép működésbe, ha a napkollektor nem képes elegendő hőt biztosítani a fűtéshez.

3.3. Kísérleti rendszer

A kísérleti rendszer egy Hardware-in-the-Loop (HIL) szimulációra is alkalmas kétkörös termikus napenergia-hasznosító rendszermodell, amely a matematikai modellek validálásának és az alkalmazott szabályozók vizsgálatának céljából készült.

A napkollektort egy villamos fűtőegység használatával modelleztem annak érdekében, hogy precízen szabályozzuk a napkollektor által bevitt hőenergiát. A modellt oly módon alakítottam ki, hogy lehetőséget biztosítson további fejlesztéseknek.

A kísérleti rendszer egy hajdú 80 l bojler alkalmaz hőforrásként, a csővezetés szigetelt 20 mm átmérőjű ötrétegű alumínium csőből készült, a hőcserélők KUZ KZ 110 inox típusú bordáscsőből készültek, a keringtetőszivattyúk pedig IBO OHI 25-60/180 típusú melegvíz keringtetőszivattyúk.

A hőtároló edény egy szigetelt 40 literes polipropilén tartály. A hőtároló, valamint hőszállító közegek anyaga víz.

A fűtőlap szerepét egy hőcserélővel ellátott 30 l térfogatú, szigetetlen, de a padozattól szigeteléssel elválasztott polipropilén tartály töltötte be. A hőtároló, illetve hőközlő közeg víz. A tartály befoglaló méretei: 750 x 380 x 150 mm. A megoldás hasonlít a sertéstartásban alkalmazottra, méretei viszont eltérnek azoktól. A jellemző megoldás 2000 x 500 x 75 mm, illetve természetesen az állattartó telepi megoldásoknak lépésálló a teteje. A kismintában ettől függetlenül jól alkalmazható megoldásról van szó, hiszen jellegét tekintve (folyadékkal töltött műanyag tartály hőcserélővel) azonos megoldás.

A szabályozószelepként használt golyóscsap típusa: ARCO ½" KB.

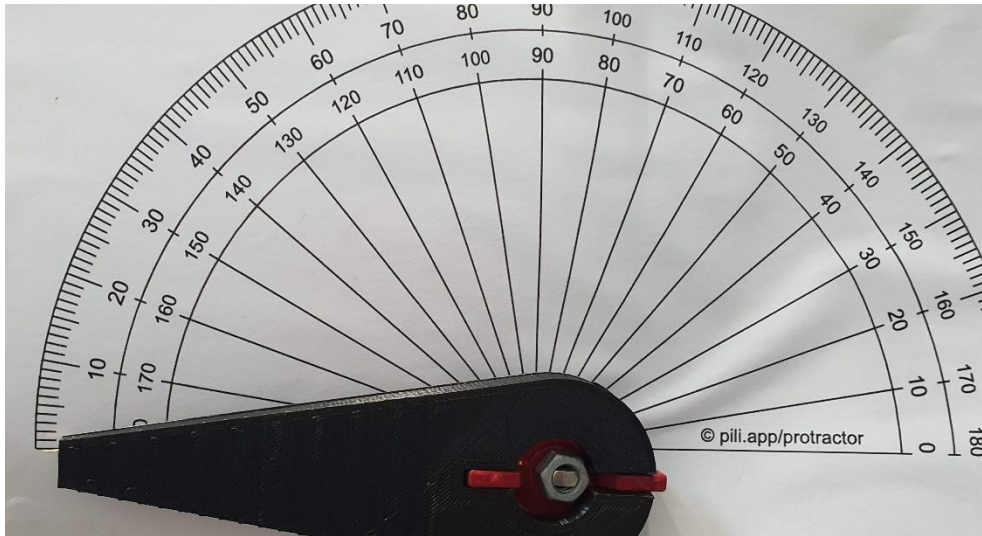
A nyomásviszonyok vizsgálatához használt nyomásmérőket a körfolyamatba épített fojtószelep bemeneti és kimeneti oldalán helyeztem el. A kísérletekben használt nyomásérzékelők USP-G41-0,5 típusúak, 0-5 bar mérési tartományúak és 0,5-4,5 V kimeneti feszültségűek (3.1. táblázat).

A nyomásérzékelő kimenetének kalibrálását 1 m-es vízoszlop segítségével, a hitelesítést pedig kalibrált Bourdon-csőves manométerrel végeztem. A két módszerre azért volt szükség, mert a vízoszlop magassága megkönnyítette a kis nyomásváltozásokra adott válasz mérését, míg nagyobb nyomás esetén praktikus volt a kisebb felbontású, de nagyobb tartományt megjelenítő analóg nyomásmérő használata. Az érzékelők által szolgáltatott jeleket egy passzív aluláteresztő RC-szűrőn keresztül, körülbelül 1 Hz-es határfrekvenciával egy 16 bites ADS1115 típusú, I2C kimenettel rendelkező analóg-digitális átalakító bemenetére vezetem.

Ezzel a beállítással elméletileg körülbelül 10 Pa felbontású nyomásmérés érhető el, de az elektromágneses interferencia és az érzékelők hőmérsékletfüggése miatt a rögzített adatokat kPa felbontásra kerekítettem, és utószűrést is alkalmaztam.

A vízkörökben a térfogatáram mérésére egy kalibrált SHXZ-YF-B1 típusú, impulzus kimenettel rendelkező axiális turbina típusú térfogatárammérő készüléket használtam (3.1. táblázat).

A szabályozószelepként alkalmazott golyóscsapok pontos szögre történő forgatását egy nyomtatott szögmérő tette lehetővé (3.2. ábra).



3.2. ábra A fojtószelep pontos állíthatóságát biztosító megoldás

A nyomáskülönbség és a térfogatáram rögzítése során egydimenziós Kálmán-szűrőt használtam.

A nyomásérzékelők analóg kimenettel rendelkeznek, amelyet 16 bites ADC-en keresztül mértem. Megfelelő szűrés alkalmazása szükséges volt az ADC viszonylag nagy felbontása miatt a zajszinthez képest. Ez a magas zajszint a szivattyú elektromos meghajtásának elektromágneses zajából adódott.

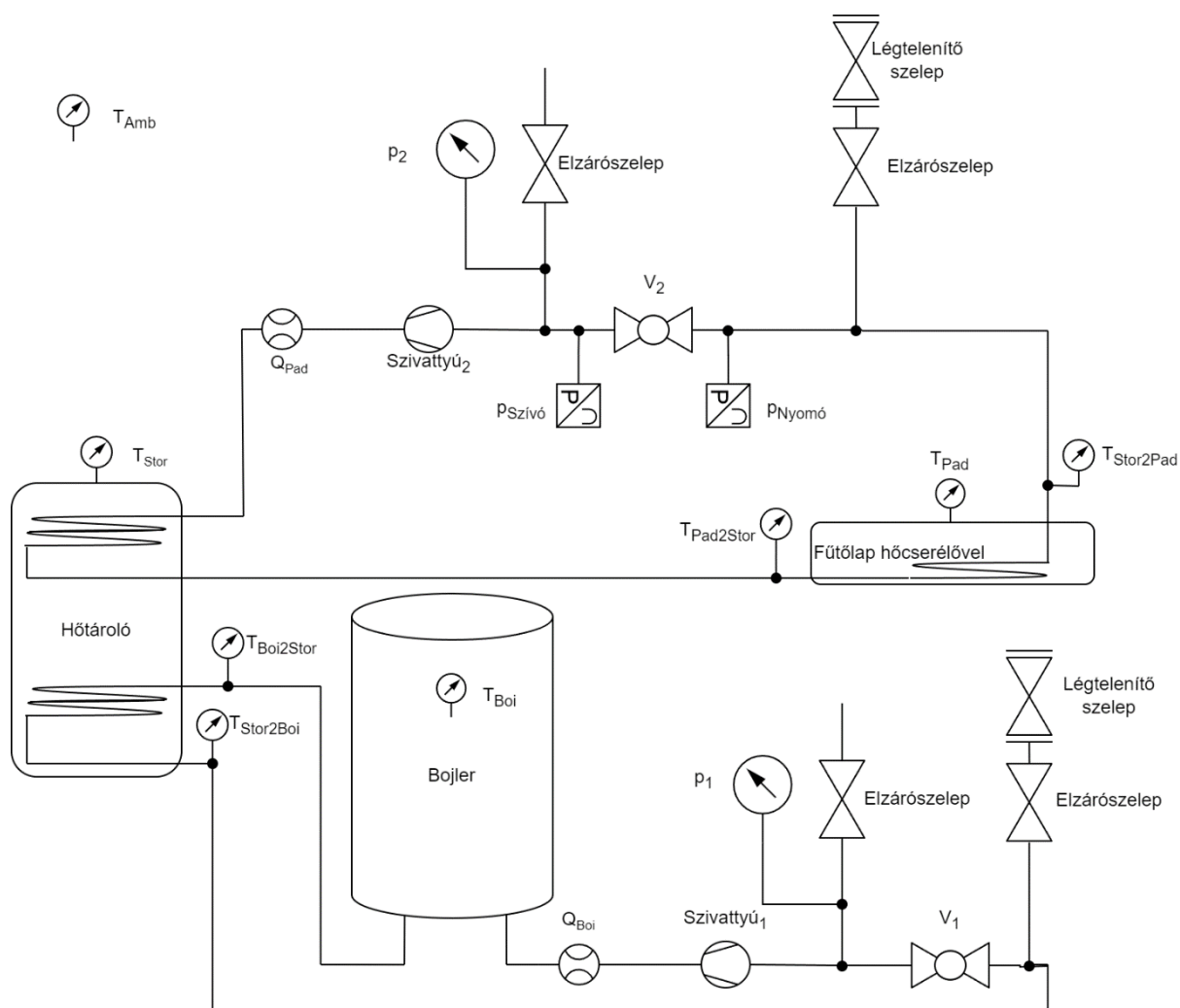
A körökben kialakuló térfogatáram mérésére SHXZ-YF-B1 típusú, axiálturbinás, hall-effektus elvén működő térfogatárammérőket alkalmaztam, melyeket mérések segítségével kalibráltam.

Az áramlásmérő impulzus kimenete digitálisan kerül mérésre egy adott időablakban. Jellegéből adódóan az adat másodpercenként egy egész szám, így pontatlan méréshez vezet, ha a mért frekvencia a mérési ablakban változik, ezért itt is szükség van szűrési módszerre.

A felvett villamos teljesítenyeket EMOS-P5821 típusú fogyasztásmérővel mértem.

A hőmérsékletet több ponton elhelyezett gyári kalibrálású DS18B20 hőmérőszensorokkal mértem, melyek felbontása $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$, pontossága $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3.1. táblázat).

A 3.3. ábra a kísérleti berendezés sematikus vázlatát, míg a tényleges rendszert a 3.4. ábra mutatja. A 3.1. táblázat mutatja be a felhasznált elemeket.



3.3. ábra A kismintamodell blokkvázlata

3.1. táblázat A kismintamodell főbb komponenseinek listája

#	ID	Leírás	Pontosság
1	V ₁ , V ₂	ARCO ½" KB (gömbcsap)	N/A
2	Légtelenítő	Flamco Flexvent légtelenítő szelep 1/2"	N/A
3	p ₁ , p ₂	MPS-63-0/6B (manométer)	±1.6%
4	p _{Szívó} , p _{Nyomó}	USP-G41-0.5 (nyomástávadó)	±1.5%
5	Szivattyú ₁ , Szivattyú ₂	IBO OHI 25-60/180 (melegvizes keringtető)	N/A
6	Q ₁ , Q ₂	SHXZ-YF-B1 (térfogatáramtávadó)	±3%
7	T _x	DS18B20 (hőmérőszenzor)	±0,5 °C



3.4. ábra A kísérleti berendezés

3.4. A beágyazott mérőrendszer

A kísérleti rendszer egy beágyazott mérőrendszert használ az adatok gyűjtésére.

A beágyazott rendszer alapja egy Arduino UNO fejlesztőkártya, mely egy ATmega328PB típusú mikrokontrollert alkalmaz. A fejlesztőkártya ki- és bemenetei lehetőségekkel (portokkal, csatornákkal) rendelkezik, hogy az alkalmazott érzékelők jeleit soros kommunikáció segítségével egy számítógép felé továbbítsam, ahol azokat egy Python kód segítségével monitoroztam és mentettem.

Hőmérsékletmérésre nyolc darab DS18B20 digitális hőmérséklet-érzékelőt használtam. A mért hőmérsékleti pontok a következők:

1. Hőtárolóba „kollektorból” belépő víz hőmérséklet ($T_{Boi2Store}$)
2. Hőtárolóból „kollektorba” visszatérő víz hőmérséklet ($T_{Store2Boi}$)
3. A „kollektor” (Bojler) hőmérséklete (T_{Boi})
4. Hőtárolóban lévő vízhőmérséklet (T_{Store})
5. Fűtőlapba hőtárolóból belépő víz hőmérséklet ($T_{Store2Pad}$)
6. Fűtőlaphoz hőtárolóba visszatérő vízhőmérséklet ($T_{Pad2Store}$)
7. Fűtőlap hőmérséklet (T_{Pad})
8. Környezeti hőmérséklet (T_{Amb})

3.5. SimSolar szimulációs keretrendszer

A továbbfejlesztett SimSolar szimulációs keretrendszer kollégám, Dr. Tóth János munkájára építve készült el (Tóth J., 2021).

Az eredeti keretrendszer egy Simulink alapú szimulációs keretrendszer, amely napenergia hasznosító rendszerek modellezésére szolgál. A rendszer magában foglalja a matematikai modelleket, amelyek a napenergia rendszerek részegységeit írják le. A blokkorientált felépítés rugalmas szimulációkat tesz lehetővé, valamint bővíthető. A rendszer alkalmazható a napenergia rendszerek szimulációjára, szabályozási stratégiák értékelésére és a szabályozás

HIL alapú tesztelésére. A rendszerben külön alcsoportokban találhatók az egységek, mint az Időjárás, Napkollektorok, Tárolók, Szabályozók és Egyéb egységek.

A keretrendszer felhasználói oldala azonban kiegészítésre szorult, mivel az a kollektor és energiatárolás oldalára, valamint annak szabályozási lehetőségeire koncentrált.

Az általam felállított modellek a következők:

- Pontosított szivattyú modell.
- Szabályozó szelepkén alkalmazott gömbcsap modell (fojtómodell).
- Fűtőlap modell.
- Csőhővesztesség modell.
- Kiegészítő fűtőegységgel ellátott tároló modell (Napenergia hiány pótlására).
- Új szabályozó algoritmusok és stratégiák modelljei.

A modellek részletes leírása a 4. fejezetben olvasható.

3.6. Szabályozó algoritmusok

A következőkben a vizsgált szabályozási algoritmusokat mutatom be.

3.6.1. Kétállású szabályozó

Az kétállású szabályozó a gyakorlatban legkönnyebben kivitelezhető szabályozási algoritmus (Roots, Woods, 1969). Az angol „on-off” elnevezés szemléletesen leírja a szabályozó működését. Tulajdonképp csak két állapot lehetséges, a szabályozás nem folytonos. A szabályozó egyenlete a következő:

$$u(\tau) = \begin{cases} 1, & \varepsilon(\tau) > 0 \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (3.1)$$

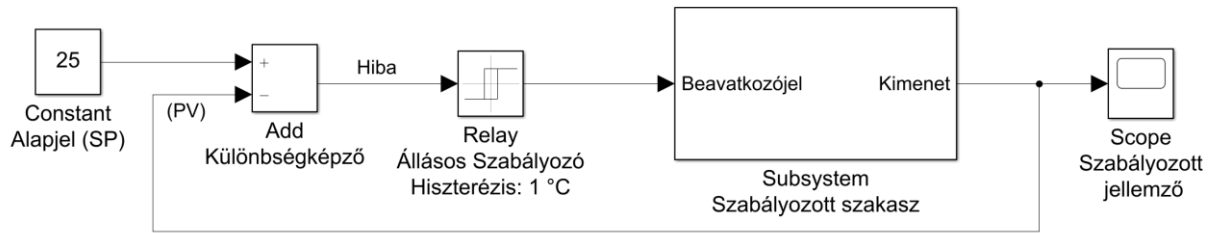
Mivel ez a szabályozó az érzéketlenségi sáv nagyságától függően hajlamos a lebegésre, azaz az alapjel környezetében a szabályozó ki-be kapcsol, így a gyakorlatban az kétállású szabályozót rendszerint hiszterézissel látják el.

A hiszterézissel ellátott kétállású szabályozó működését leíró egyenletek a következők:

$$u(\tau) = \begin{cases} 1, & S = 1 \\ 0, & S = 0 \end{cases} \quad (3.2a)$$

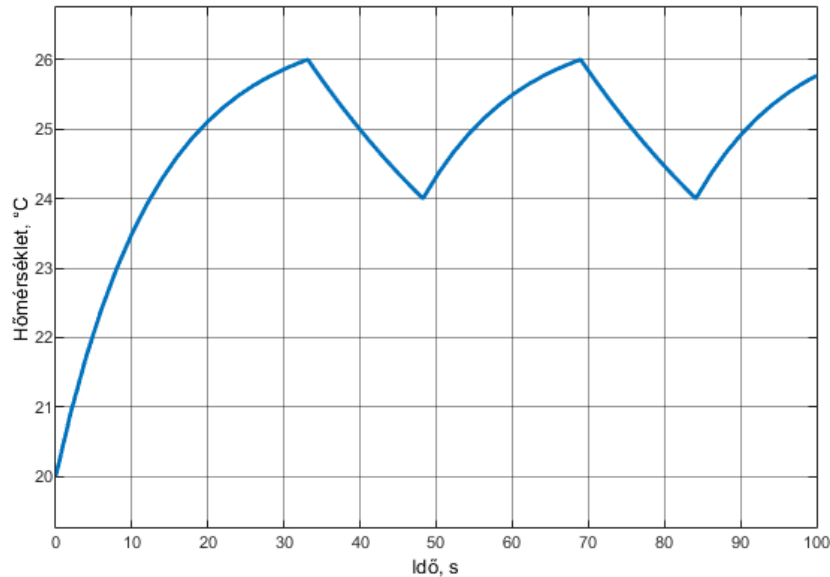
$$S = \begin{cases} 1, & S = 0 & \varepsilon(\tau) < -\frac{H}{2} \\ 0, & S = 1 & \varepsilon(\tau) > \frac{H}{2} \\ S, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (3.2b)$$

A kétállású hiszterézises relével kialakított kétállású szabályozási kör felépítését a 3.5. ábra szemlélteti. A példán egy egyszerű hőtárolós modell látható, melyet a szabályozó fűteni képes az energiaelvétel pedig egyszerű hőátadás útján történik.



3.5. ábra Histerézissel ellátott kétállású szabályozó Simulink környezetben

A 3.6. ábra egy, kétállású szabályozott jellemző alakulását szemlélteti az idő függvényében.



3.6. ábra Kétállású szabályozóval szabályozott jellemző alakulása időben

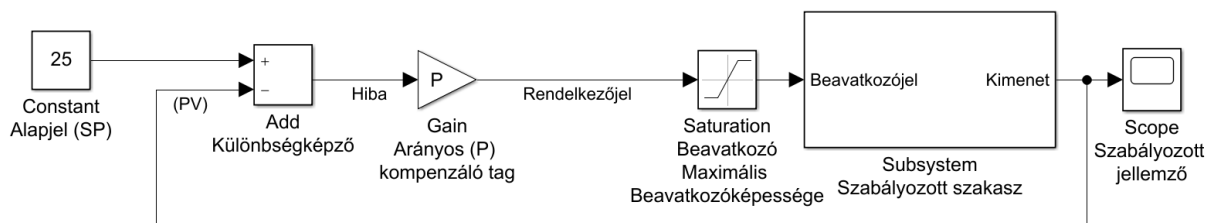
3.6.2. Arányos szabályozó

Az arányos szabályozóra jellemző, hogy a hibajellel arányosan (K_p), egy erősítési tényezővel azt megszorozva avatkozik be a rendszer működésébe. Ez a módszer már folyamatos szabályozási algoritmus, így a szabályozó kimenetén megjelenő jelet leíró egyenlet a következőképp alakul:

$$u(\tau) = K_p \varepsilon(\tau) \quad (3.3)$$

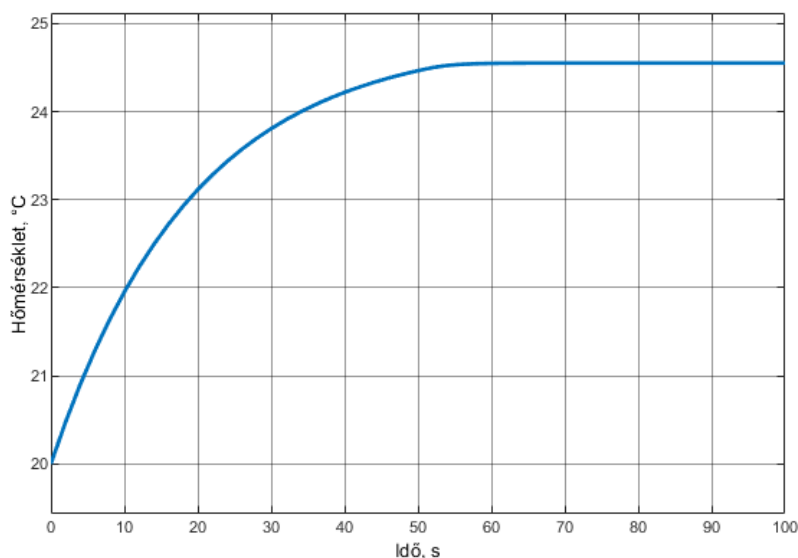
Nagy előnye az egyszerű megvalósíthatósága és folytonos mivolta. Az arányos tag átviteli tényező értékének megválasztásával befolyásolható a szabályozás minősége. Kis átviteli tényező értéknél lassú lesz a szabályozás és állandósult állapotban nagy lesz a statikus hiba. Az arányos tag átviteli tényező értékének növelésével gyorsítható a szabályozás és csökkenthető az állandósult állapotbeli hiba, de az átvitelitényező értéke, ezzel együtt a hurokerősítés nem növelhető minden határon túl, mert az a szabályozás stabil működését veszélyezteti.

A 3.7. ábra egy arányos szabályozási kör felépítését mutatja be Simulink környezetben.



3.7. ábra Arányos szabályozási kör felépítése Simulink környezetben

A 3.8. ábra egy arányos szabályozóval szabályozott jellemző alakulását szemlélteti az idő függvényében.



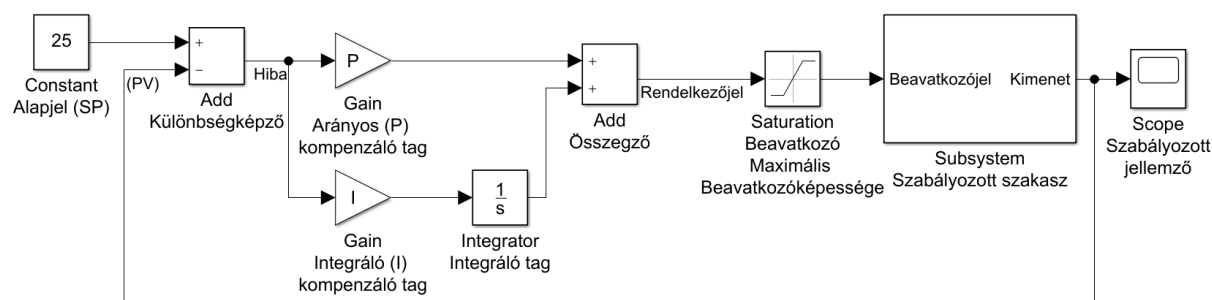
3.8. ábra Arányos szabályozóval szabályozott jellemző alakulása időben, alapjel 25 °C

3.6.3. Arányos integráló szabályozó

Az arányos integráló (PI) szabályozó az előbb említett statikus hiba kialakulását igyekszik kiküszöbölni (Åström, Hägglund, 2001). A szabályozó hatásmechanizmusát leíró egyenlet a következő:

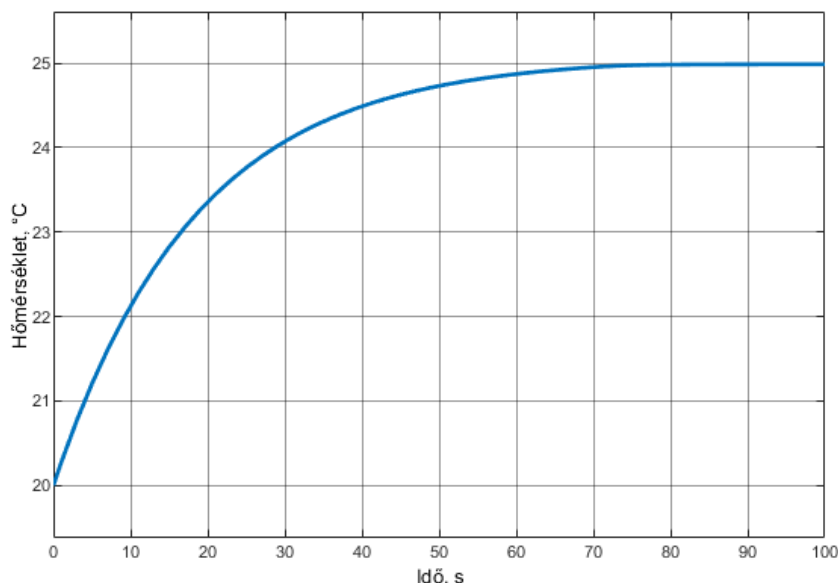
$$u(\tau) = K_P \varepsilon(\tau) + K_I \int_0^\tau \varepsilon(t) dt. \quad (3.4)$$

A 3.9. ábra egy arányos integráló szabályozási kör felépítését szemlélteti Simulink környezetben.



3.9. ábra A PI szabályozási kör felépítése MATLAB-Simulink környezetben

Mivel az integráló tag a statikus hibát kompenzálja, az idő előrehaladtával az alább látható módon a statikus hiba megszüntethető (3.10. ábra).



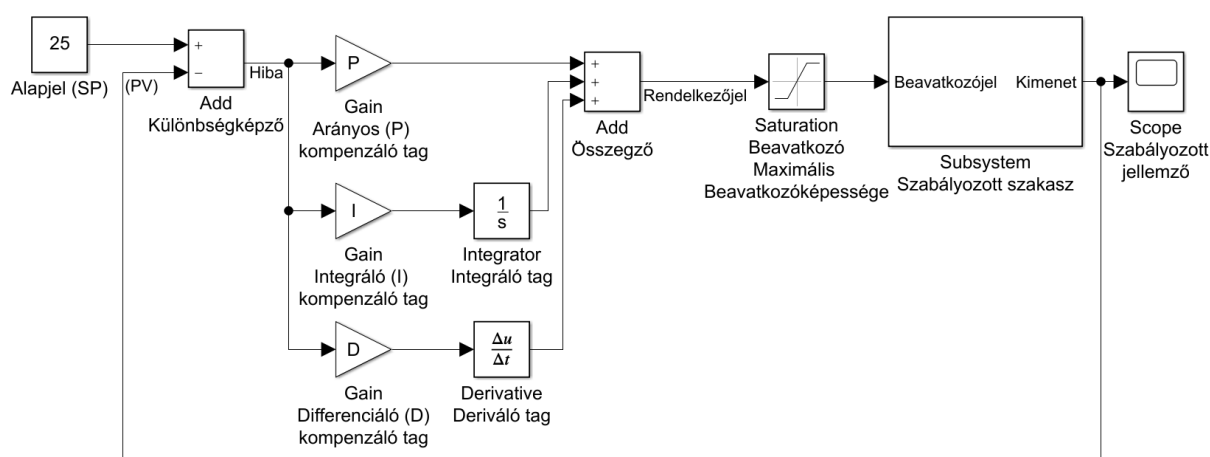
3.10. ábra A PI szabályozó működése, alapjel 25 °C

3.6.4. Arányos integráló, deriváló szabályozó

Az arányos integráló differenciáló szabályozó (PID) a legelterjedtebb szabályozási algoritmus (Biró, Farkas, 1997). A szabályozó kimenetén a rendelkezőjel a következő összefüggéssel írható le:

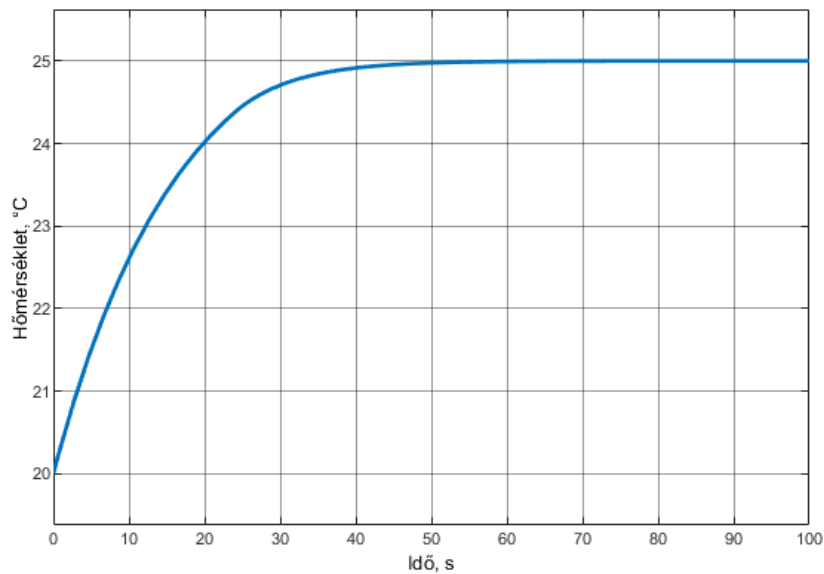
$$u(\tau) = K_p \varepsilon(\tau) + K_I \int_0^\tau \varepsilon(t) dt + K_D \frac{d\varepsilon}{d\tau}. \quad (3.5)$$

A differenciáló tag a hibajel megváltozásának sebességével arányosan avatkozik be, így a szabályozás sebességét növeli. A 3.11. ábra a szabályozási kör Simulink környezetben kialakított felépítését mutatja.



3.11. ábra A PID szabályozóval kialakított szabályozási kör felépítése MATLAB-Simulink környezetben

A 3.12. ábra mutatja be a vizsgált jellemző alakulását idő függvényében.



3.12. ábra A PID szabályozó működése, alapjel 25 °C

Ez a szabályozó rendkívül elterjedt, mivel egyszerű felépítésű és a régóta fennálló használat miatt nagy gyakorlati tapasztalat áll a háttérben. Ezzel együtt hátránya, hogy munkapontfüggő és mivel lineáris, nem illik tökéletesen nem lineáris rendszerek szabályozásához. Mivel azonban ismert és gyakorta alkalmazott megoldás, sok esetben alkalmazzák összetett szabályozók egy elemeként, emellett gyakran választják referenciaként egyéb szabályozási algoritmusok vagy újítások értékelésénél (Ahn, Ahn, 2009), (Dequan et al. 2012), (Najjari et al., 2014), (Saleem et al., 2015), (Ulpiani, et al., 2016), (Majdoul et al. 2022).

3.6.5. Csúszómód-szabályozó

A robusztus szabályozás elmélete azoknál a rendszereknél használatos, melyekben a bizonytalanságok kezelése kritikus, és a pontos matematikai modellezés nem lehetséges. Ez különösen alkalmas módszer olyan helyzetekben, ahol a rendszer bonyolultsága vagy a körülmények változékonysága miatt nehéz pontos modelleket készíteni.

A robusztus szabályozás két fő ágra osztható: a lineáris és a nemlineáris szabályozásra. A nemlineáris szabályozás egyik fontos eleme a csúszómód szabályozás, ami csak bizonyos feltételek mellett alkalmazható változó struktúrájú rendszerekben. Ezen rendszereknél előfordulhat, hogy a rendszer akkor is aszimptotikusan stabilis, ha a rendszert alkotó struktúrák önmagukban labilisak.

Egy másik fontos jellemző, hogy a megfelelő szabályozás segítségével a változó struktúrájú rendszer olyan állapotba kerülhet, ahol a rendszer dinamikája az eredetihez képest csökkentett szabadságfokú differenciálegyenletekkel írható le. Ebben az állapotban a rendszer viselkedése független lehet bizonyos paraméterek változásától, valamint külső zavaró tényezőktől. Ezt az állapotot nevezzük csúszómódnak (Gyeviki, 2007). Ennek nagy előnye, hogy robusztusságot biztosít a rendszer nemlinearitásával, a paraméterműködésével és a külső zavarokkal szemben (Korondi, 2017).

A csúszómód-szabályozót leíró összefüggések a következők:

$$u(\tau) = \text{sign}(s(\tau)), \quad (3.6a)$$

$$s(\tau) = \varepsilon(\tau) + \lambda \frac{d\varepsilon}{d\tau}. \quad (3.6b)$$

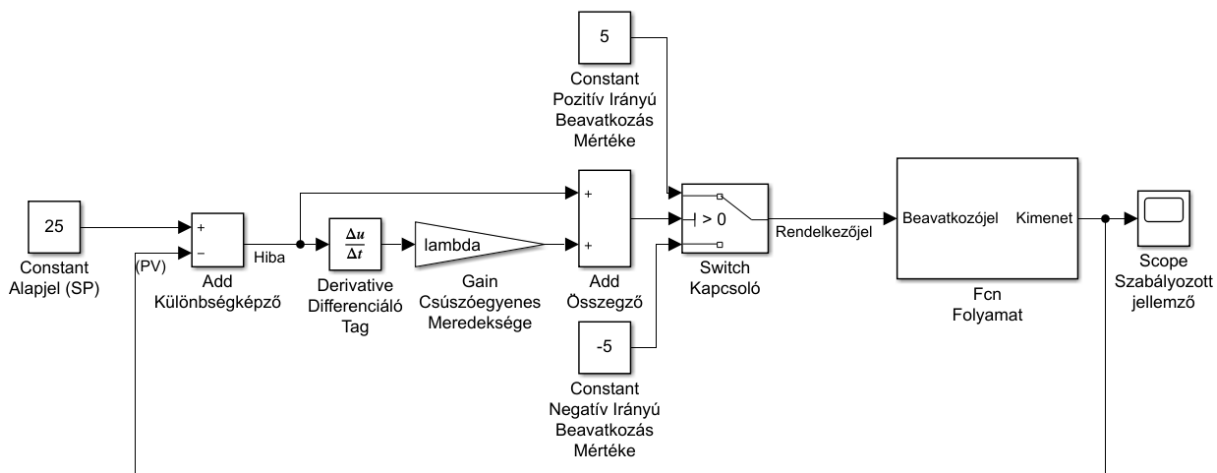
Az egyik legfontosabb előnye ennek a szabályozásnak, hogy nem igényli a rendszer pontos modelljének ismeretét. Egy egyszerűsített modell alapján ismerve mind a zavarok, mind a rendszer-paraméterek változásának korlátait, hatékonyan alkalmazható. Annak ellenére, hogy az ideális csúszómód szabályozás nem valósítható meg tökéletesen a valóságban, gyakorlati szempontból megközelíthető.

A csúszómód-szabályozó tervezése három fő lépésből áll. Az első lépés a csúszófelület meghatározása, a második lépés egy olyan szabályozási törvény kiválasztása, amely az állapotváltozók trajektóriáját a csúszófelületre kényszeríti és ott tartja, míg a harmadik lépés a csattogásmentes működés megvalósítása.

A változó struktúrájú szabályzó tervezésének első, a csúszófelület megtervezési fázisa kritikus fontosságú. A kapcsoló felület megfelelő meghatározása elengedhetetlen, mivel a szabályozott szakasz ezen a felületen halad végig.

A második fázisban a kapcsoló szabályozást tervezzük meg, amely a szabályozott szakaszt a csúszófelületre vezeti, majd ott tartja, ha a szabályozott szakasz trajektóriája a felületet átmetszi. A legegyszerűbb szabályozó elem, amely a csúszómódot megvalósíthatja, a relé.

A csúszómód-szabályozó robusztusságát a nagy (ideális esetben végtelen) körerősítésnek köszönheti, amit a relé biztosít. Az ideális csúszómód szabályozási kör hatásvázlata a 3.13. ábra segítségével kerül bemutatásra, a threshold értéke 0.



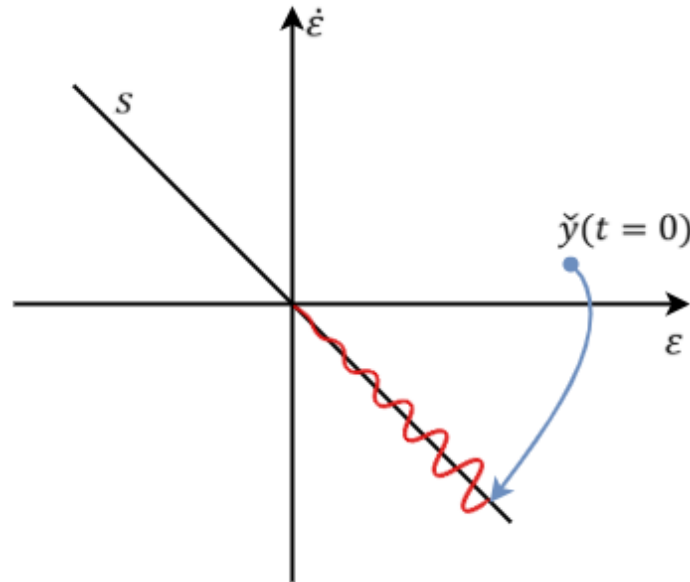
3.13. ábra Klasszikus csúszómód szabályozási kör, egyirányú beavatkozásra korlátozva

Fontos megjegyezni, hogy a valóságban csak véges kapcsolási frekvenciát tudunk megvalósítani, ami a csattogás jelenségét (chattering) okozza. Ez azt jelenti, hogy a szabályozott szakasz állapot trajektóriája a csúszófelület egy kicsiny környezetében perturbálódik. A megközelítés fázisában a rendszer érzékeny a paraméterváltozásokra és a külső zavarásokra.

Amikor a rendszer csúszómódba kerül, dinamikáját a csúszófelület határozza meg, és ekkor érzéketlenné válik a paraméterváltozásokkal és a külső zavarásokkal szemben. Tervezéskor két,

ellentétes szempontot kell szem előtt tartani: a rendszer trajektóriája minél rövidebb idő alatt érje el a csúszóegyenest, és a csattogást minél inkább elimináljuk.

A hiba-hiba derivált trajektóriáját egy elméleti rendszeren, de a valóságnak megfelelően limitált beavatkozási frekvenciával a 3.14. ábra mutatja.



3.14. ábra Klasszikus csúszómód, limitált kapcsolási frekvenciával

A 3.5, 3.7, 3.11 és 3.13 ábrákon a funkcióblokkok eredeti, Simulink megnevezése is olvasható, ezt a későbbiekben az olvashatóság javítása érdekében elhanyagolom.

3.6.6. Szabályozás minőségi jellemzői

A szabályozók minőségét a stabilitás, illetve kritériumok is befolyásolják, amelyek az állandósult és dinamikus viselkedést határozzák meg. Az állandósult állapotbeli statikus pontosságot a szabályozás típusszámának és a hurokerősítés növelésével javíthatjuk, azonban a hurokerősítés nem növelhető minden határon túl, mert azzal romlik a stabilitás. A gyakorlatban megvalósított szabályozásnak meg kell felelnie az átmeneti (dinamikus) viselkedéssel kapcsolatos előírásoknak is, amelyek minőségi jellemzőkkel vannak meghatározva. Minden szabályozással szemben három alapvető követelményt támasztunk (Tóth, 2013):

- Stabílan működjön, lehetőleg stabilitási tartalékkal rendelkezzen.
- Az állandósult állapotban a szabályozási eltérés (statikus hiba) a követelményekben megadottnál kisebb legyen.
- Az átmeneti állapotban, a dinamikus szakaszban pedig a minőségi jellemzők (pl. dinamikus hiba, szabályozási vagy beállási idő, maximális eltérés, vagy maximális túllendülés, szabályozási idő alatti lengések száma) feleljenek meg a követelményeknek.

A három követelménynek egyidejűleg kell teljesülnie a megfelelő működés érdekében.

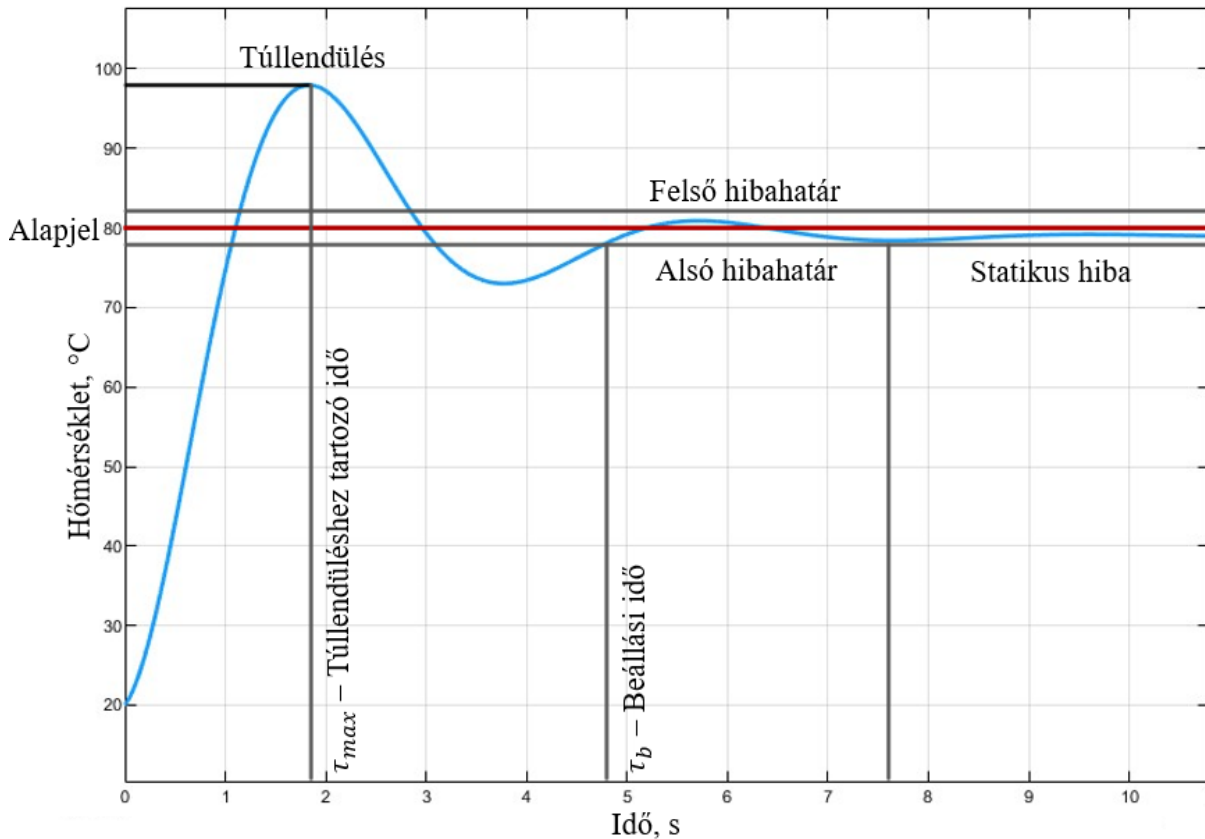
A szabályozás minőségét legalább három jellemzővel írjuk le (Farkas, 2011):

Túllendülés: Ez az érték azt mutatja, hogy a szabályozott jellemző a dinamikus szakaszon túllépi-e a későbbi állandósult értékét. A túllendülés értéke technológiától függően általában nem haladhatja meg a 15-30%-ot.

Szabályozási idő: Ez az időtartam határozza meg, amíg a szabályozott jellemző a későbbi állandósult értékét valamely előírt dinamikus pontossággal, általában $\pm 5\%$ eltéréssel megközelíti.

Lengések száma: Ez a szám a csillapodó lengések félperiódusainak számát mutatja a szabályozási idő alatt.

A szabályozás minősége akkor a legjobb, ha minimális vagy elhanyagolható a túllendülés, rövid a szabályozási idő, és a lengések száma csekély, valamint időben állandó alapjelre végzett értéktartó szabályozás esetén állandósult állapotban a statikus hiba 0. A minőségi jellemzőket a 3.15. ábra mutatja be.



3.15. ábra Szabályozás minőségi jellemzői

A szabályozás minőségének jellemzésére integrálkritériumok is alkalmazhatók, amelyek az egész tranziens folyamatot jellemzik, és egyszerűbben kifejezik a rendszerparaméterekkel való kapcsolatot. Ezek az integrálkritériumok lehetnek lineáris, abszolút vagy négyzetes formában megadott kifejezések, amelyek az állandósult és pillanatnyi értékek közötti különbséget veszik figyelembe (Szabó, 1994). Az integrálkritériumok segítségével értékeljük a szabályozás pontosságát, és a cél általában az, hogy ezek az értékek minél kisebbek legyenek.

A gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott integrálkritériumok a következők:

Lineáris

$$J_l = \int_0^{\tau_1} SP - PV(\tau) d\tau \quad (3.7)$$

A lineáris integrálkritérium csak aperiodikus tranziens jelenségek esetén alkalmazható, mivel lengő rendszer esetén a pozitív és negatív túllendülések kioltathatják egymást, így hibás eredményre vezet.

Abszolút

$$J_a = \int_0^{\tau_1} |SP - PV(\tau)| d\tau \quad (3.8)$$

Az abszolút integrálkritérium alkalmazható lengő rendszerek esetén is, hiszen a hiba érték abszolútértékével számol. Analitikus megoldása korlátozott, hiszen a függvény nem folytonos, számítógépes alkalmazása során azonban ez a probléma nem jelentkezik.

Négyzetes

$$J_s = \int_0^{\tau_1} (SP - PV(\tau))^2 d\tau \quad (3.9)$$

A négyzetes integrálkritérium minden eltérést négyzetesen, így pozitív előjellel vesz figyelembe. Előnye, hogy analitikus megoldásra is alkalmazható, illetve a folyamat elején, a dinamikus szakaszon tapasztalható nagyobb túllendüléseket négyzetes mivolta miatt nagyobb súllyal veszi figyelembe. A folyamat elejének további fokozása a kitevő növelésével valósítható meg, bár megjegyzendő, hogy csak pozitív páros számú kitevővel alkalmazható.

Idővel súlyozott integrálkritériumok

A következő, idővel súlyozott integrálkritériumok esetében az j kitevő nullánál nagyobb szám kell legyen $j > 0$. Az idővel való súlyozásnak a rendszer csillapodási tulajdonságainak megítélésakor van jelentősége, hiszen az idő előrehaladtával egyre nagyobb mértékben veszi figyelembe az eltéréseket.

Lineáris, idővel súlyozott

$$J_{lt} = \int_0^{\tau_1} (SP - PV(\tau)) \tau^j d\tau \quad (3.10)$$

Abszolút, idővel súlyozott

$$J_{at} = \int_0^{\tau_1} |SP - PV(\tau)| \tau^j d\tau \quad (3.11)$$

Hatványos, idővel súlyozott

$$J_{et} = \int_0^{\tau_1} (SP - PV(\tau))^n \tau^j d\tau \quad (3.12)$$

A hatványos, idővel súlyozott integrálkritérium esetében az n pozitív páros szám (négyzetes esetén 2).

Analitikusan csak a négyzetes integrálkritériumot lehet egyszerűen számítani, azonban numerikus módszerrel, számítógéppel bármelyik könnyűszerrel kiértékelhető.

3.6.7. Nagyidőállandójú rendszerek szabályozása

Nagyidőállandójú rendszerekről beszélhetünk, ha a rendszerben lévő (energia) tárolók méretei nagyságrendi különbséget mutatnak. Ilyenkor nem elhanyagolható a tárolós tagokra jellemző időkésettetés. Különösen igaz ez, ha a rendszer holtidős tagot tartalmaz.

A holtidős tag, vagy másnéven késleltetett tag, olyan jellemző, ami gyakran megjelenik a gyakorlati rendszerekben, és időbeli eltolódást okoz a bemeneti hatás és a kimenet között. Például szállítószalagok, vízvezetékek, vagy lakóházak fűtési rendszerei esetén gyakran tapasztalható a szállítási holtidő (Páger et al., 2023). Ennek eredményeként a kimenet csak

késleltetve reagál a bemenetre. Az ideális holtidős tag közelíthető elegendően nagy számú ($n \rightarrow \infty$), egytárolós arányos tag szorzatával (sorba kapcsolásával), feltéve, hogy a karakterisztikus egyenlet gyökei valósak. A késleltetés mértéke a folyamat helyétől és az érzékelési vagy beavatkozási pont közötti távolságtól függ (Tóth, 2013).

3.6.8. Szabályozó algoritmusok optimalizálása

A vizsgálandó szabályozóalgoritmusok optimális működéséhez elengedhetetlen azok behangolása, vagyis a szabályozási tagok ideális értékeinek megkeresése.

A szabályozók behangolására elterjedt módszer a szabályozó kör átmeneti függvényének felvétele majd a függvény jellege alapján a paraméterek behangolása (Gerhartz, Scholz, 2001).

Sok irodalmi forrásnál nincs megjelölve a választott szabályozási algoritmus optimalizálásának módja, illetve sok esetben kézi hangolással történik a szabályozó optimalizálása, mely véleményem szerint nem adekvát megoldás, amennyiben egységes szempontrendszer szerint kívánunk szabályozóalgoritmusokat összehasonlítani.

Amennyiben egységes szempontrendszer szerint óhajtjuk összehasonlítani a szabályozók viselkedését, lényeges, hogy azok optimalizálása is egységesen történjen, így a P, PI és PID szabályozóknál jól működő és a gyakorlatban széles körben alkalmazott Ziegler-Nichols módszert (Mizsey, 2011), (Muresan, De Keyser, 2022) ezeknél a szabályozóknál is figyelmen kívül hagytam. Figyelembe véve a szabályozott szakasz nemlinearitását és komplex mivoltát, a kimerítő keresésen, illetve a gradiens alapú keresésen alapuló módszereket szintén elvetettem. A véletlen keresésen allapuló módszerek közül a genetikus algoritmusok jöhetnek szóba (Álmos et al., 2002), de ezen algoritmusok jelentős számítási igénye miatt, a paramétertér kifelbontású ábrázolása után a MATLAB lokális minimumot kereső, „fminsearch” algoritmusát választottam, mely a simplex keresési módszert és nem gradiensalapút alkalmazza (Lagarias et al., 1998).

3.7. Adatgyűjtés, jelkondicionálás

Annak érdekében, hogy a dolgozatban leírt modellt validálni lehessen, szükséges a megépített kísérleti rendszeren méréseket végezni. Annak érdekében, hogy megfelelő mérési eredményeket tudjunk a modellek paraméteridentifikációjánál, illetve validációnál használni, lényeges a rendszer dinamikájának ismerete. Ennek tudatában képesek leszünk a megfelelő mintavételezési frekvencia megállapítására. A szükséges mintavételi frekvencia megállapítása után lehetséges megtervezni az alkalmazandó aluláteresztő szűrőt, melyet a mintavételezés elé szükséges beépíteni. A mintavételezett jelek bizonytalansága miatt az értékeket szűrni szükséges annak érdekében, hogy a zajos mérési eredmények ne befolyásolják hátrányosan az identifikáció, majd később a validáció folyamatát (Ma'arif et al., 2019).

3.7.1. Shannon-Nyquist mintavételezési elmélet

A mintavételezés mai napig használt elméleti alapjait Shannon, Nyquist, Kottelnikov és Whittaker fektették le. A gyakorlatban gyakran, mint Shannon törvényét említik. Az elmélet azon alapszik, hogy Fourier transzformáció segítségével bármilyen sávhatárolt jel leírható szinuszos felharmonikusok összegével. Az elmélet alapján a mintavételezni kívánt jel legmagasabb, információt hordozó komponensének frekvenciájának kétszeresét szükséges alkalmazni mintavételi frekvenciaként (Luke, 1999), (Shannon, 1949).

3.7.2. Villamos szűrőáramkörök

Annak érdekében, hogy az alkalmazott analóg digitális konverter (ADC) bemenetére csak olyan frekvenciakomponens érkezzon, mely a későbbiekben lehetővé teszi a mért jellemző aliaszok nélküli visszaállítását, szükséges megtervezni a szűrőáramkört is, mely vágási frekvenciája a mérendő jellemző maximális frekvenciájának kétszerese.

A mintavételezési frekvencia alábecsülése vagy nem megfelelő megválasztása torzuláshoz és információvesztéshez vezethet. Ennek oka, hogy a digitális jelképzés során az analóg jelet diszkrét időpillanatokban rögzítjük, és ha a mintavételezési frekvencia nem megfelelő, a jel frekvenciájában lévő információ elveszhet, vagy torzulhat.

Ha a mintavételezési frekvencia csak a jel frekvenciájának kétszerese lenne, vagy még kevesebb, akkor előfordulhat, hogy a rendszer nem tudja megfelelően rekonstruálni a jel frekvenciáját és dinamikáját. Ez torzuláshoz vezet, amelyet az ún. "aliasing" jelenség okoz, amikor a magasabb frekvenciájú jeleket tévesen értelmezi a rendszer (Shannon, 1949).

Mivel a valóságban sávkorlátozásra alkalmazott aluláteresztő szűrők az ideálistól eltérő módon csak csillapítják (Schaumann et al., 2009) a vágási frekvencia felett álló spektrumot, ezért célszerű a mintavételezési frekvenciát több, mint a mintavételezett jel frekvenciájának kétszeresére választani annak érdekében, hogy biztosítsuk a megfelelő rekonstrukciót és minimalizáljuk az információvesztést és a torzulásokat a digitális rendszerekben.

3.7.3. Mintavételezett adatok szűrése

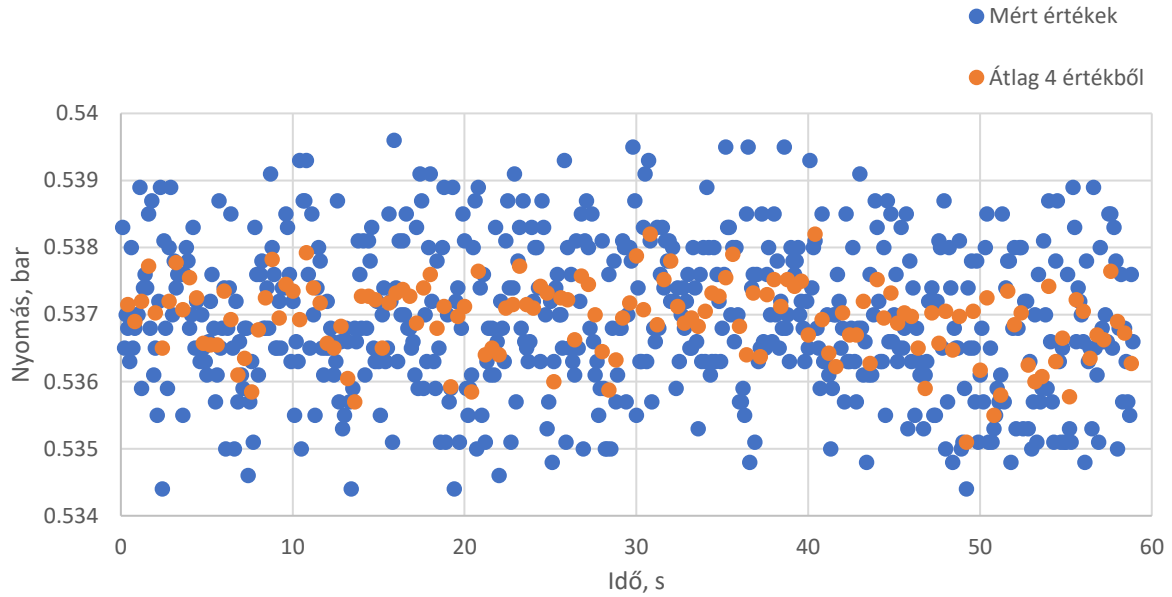
A mintavételezés során keletkezett adatpontok bizonytalanságát csökkentendő érdemes az adathalmazon utólagos szűrést elvégezni, főleg abban az esetben, ha a mérést külső jellemzők, pl. elektromágneses zavar befolyásolhatják. Mivel az alkalmazott ADC-k érzékenysége, illetve a bemeneti impedanciájuk igen magas, így a jelvezetéken érkező bármilyen elektromágneses indukcióból eredő zavar a mért jellemző nagyságrendjébe eső hibát eredményezhet.

Átlag

Az átlagolás a lehető legegyszerűbb szoftveres szűrési eljárás. Legnagyobb előnye az egyszerűsége és alacsony számítási kapacitás igénye, mely így rendkívül alkalmassá teszi egyszerű beágyazott rendszereken történő felhasználását. Hátránya viszont, hogy a mérést jelentősen lassítja, attól függően, hány mintából képzünk átlagot, hiszen, ha n darabú elemből képzünk átlagot, csak minden n -edik mérés után lesz egy adatpontunk. Ez, főleg zajos jelek esetében nem megengedhető, hiszen tapasztalataim szerint bizonyos esetekben szükséges több száz érték átlagát képezni, hogy a mért adatpontok ne befolyásolják jelentősen a szabályozóalgoritmust. Különösen igaz ez, ha a szabályozóalgoritmus differenciáló tagot is tartalmaz. A 3.16. ábra jó példa egy zajos mérés átlaggal történő kiértékelésére.

Az átlagolás egyenlete a következő:

$$\bar{y}(\check{y}_1; \dots; \check{y}_n) = \frac{\sum_{i=1}^n \check{y}_i}{n}. \quad (3.13)$$



3.16. ábra: Nyomásmérés négy mért értékből képzett átlaggal

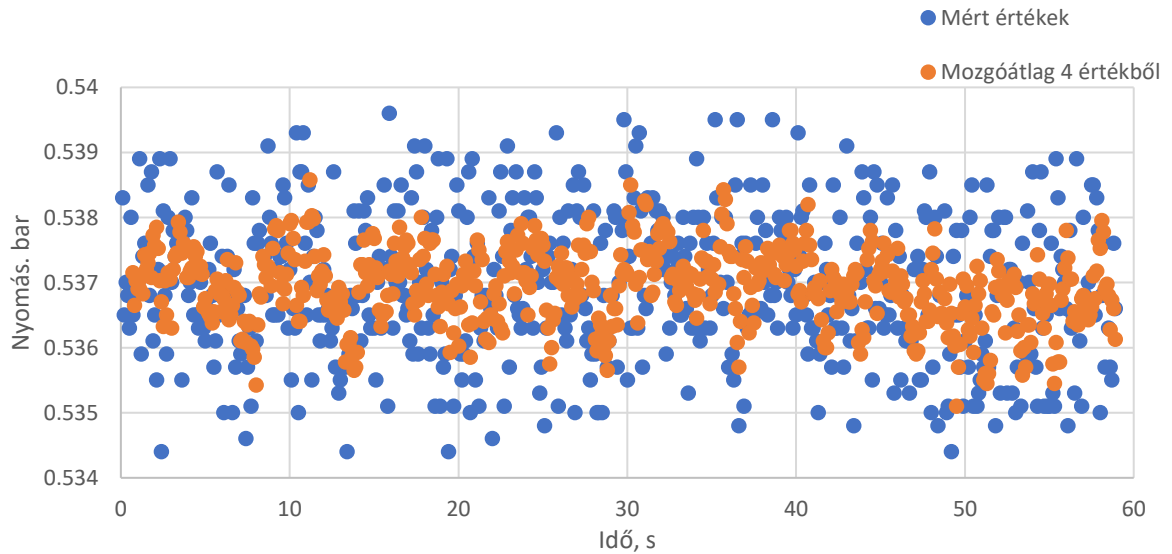
Mozgóátlag

A mozgóátlag legegyszerűbb formája a mért értékek utolsó n darabjának átlagolására korlátozódik. A módszer alkalmazható beágyazott rendszerek esetében is, bár számítási kapacitásigénye magasabb az átlagolásénál. Előnye, hogy az első n darab mérés után minden mérési adathoz fog tartozni egy szűrt adatpont, így csak a mérés elején hiányzik a kimenet. A 3.17. ábra ugyanazt a nyomásmérési feladatot mutatja be mozgóátlaggal szűrve.

$$\bar{x}_r(0) = 0, \quad (3.14a)$$

$$\bar{x}_r(k) = \bar{x}_r(k-1) + \frac{1}{k}(\check{y}_k - \bar{x}_r(k-1)) = \frac{k-1}{k}\bar{x}_r(k-1) + \frac{1}{k}\check{y}_k, \quad (3.14b)$$

ahol $\bar{x}_r(k)$ a k számú adat alapján számított futó átlag, és $\check{y}_k$ a k -adik mérési adat.



3.17. ábra Nyomásmérés négy mért értékből képzett mozgóátlaggal

Kálmán-szűrő

A Kálmán-szűrő egy hatékony és gyakran használt matematikai eljárás a becsült állapot visszacsatolására rendszerekben. A szűrőt általában olyan rendszerekben alkalmazzák, ahol zaj jelenik meg a mérésekben vagy a rendszermodellben (Becker, 2023).

Az egydimenziós Kálmán-szűrő esetében az állapot egy dimenziós, vagyis csak egy változót tartalmaz, amit meg kell becsülni. Az eljárás lényege, hogy egy megbízható becslést adjon az állapotról még zajos mérések esetén is (Grewal, Andrews, 2014).

Az alapötlet az, hogy a szűrő két fő komponensből áll: előrejelzésből és frissítésből. Az előrejelzés lényegében a rendszer jövőbeli állapotának becslése a korábbi állapot és a rendszermodell alapján, míg a frissítés a mérések alapján pontosítja ezt a becslést (Kalman, 1960).

Az egydimenziós Kálmán-szűrő működése a következő lépésekből áll:

Előrejelzés:

Az állapot előrejelzése a rendszermodell alapján.

Az előre jelzett állapot kovariancia mátrixának kiszámítása.

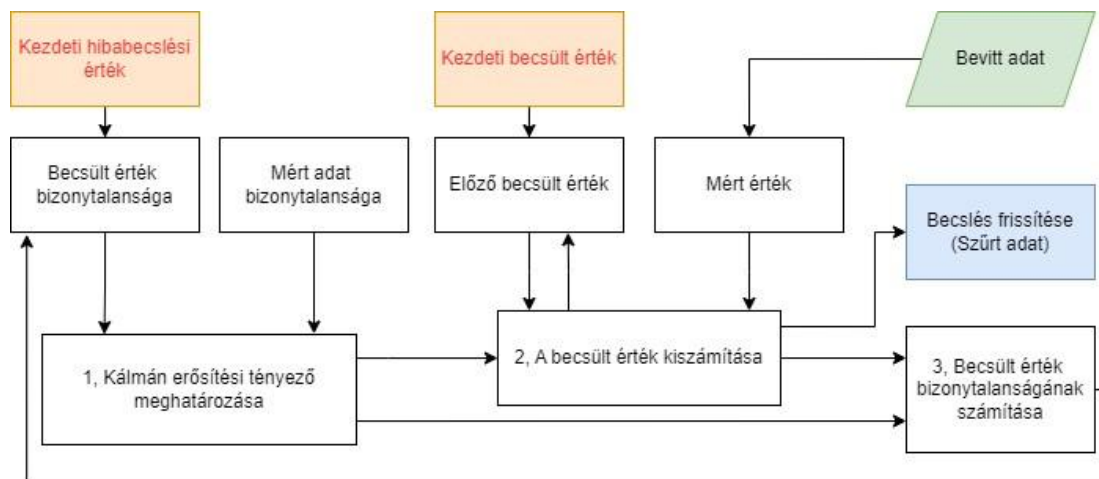
Frissítés:

A valós mérések alapján a becsült állapot és annak bizonytalansága (kovariancia) frissítése.

A Kálmán-szűrő alkalmazása jelentős lehet többek között navigációs rendszerekben, szenzorok adatfeldolgozásában, robotikában és egyéb területeken, ahol fontos az állapotbecslés zajos környezetben is.

Fontos megérteni, hogy bár a Kálmán-szűrő hatékony eszköz a becslésben, a rendszermodellek és a mérések zajai, valamint a kezdeti feltételek pontos ismerete nagyban befolyásolják annak teljesítményét és pontosságát.

Esetemben a nyomás, illetve hőmérsékletmérést befolyásoló elektromágneses zajok jelenléte miatt volt szükséges egy gyors, statisztikai alapon nyugvó szűrő megtervezése, mely a modellek alapjául szolgáló mérések alapján megbízható, gyors becslést képes adni a zajos mért értékek alapján a valós értékekről. Az általam alkalmazott szűrő becslési algoritmusát a 3.18. ábra szemlélteti.



3.18. ábra Az alkalmazott szűrőalgoritmus blokkdiagramja

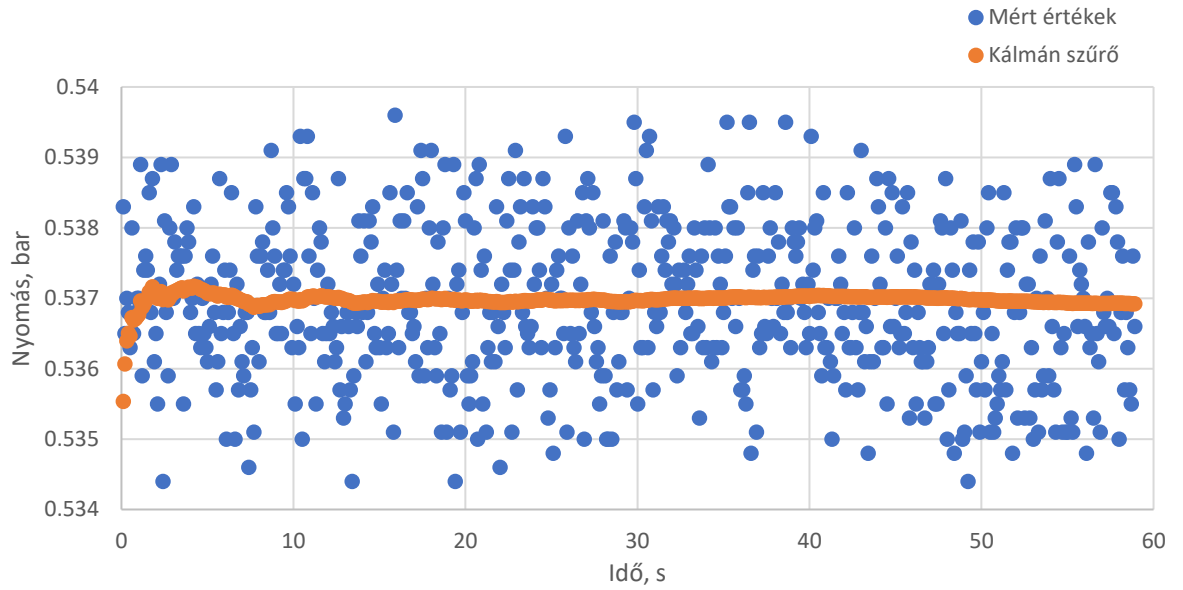
Az alkalmazott szűrési algoritmust leíró összefüggéseket (Grewal és Andrews, 2014) a (3.15) egyenletek szemléltetik.

$$KG = \frac{E_{EST}}{E_{EST} + E_{MEA}} \quad (3.15a)$$

$$EST_t = EST_{t-1} + KG(MEA - EST_{t-1}) \quad (3.15b)$$

$$E_{EST} = \frac{(E_{MEA}) \cdot (E_{EST_{t-1}})}{(E_{MEA}) + (E_{EST_{t-1}})} = (1 - KG)(E_{EST_{t-1}}) \quad (3.15c)$$

A 3.19. ábra egy nyomásmérés zajos jeleinek szűrését mutatja be egy egydimenziós Kálmán-szűrő segítségével.



3.19. ábra Példa zajos nyomásmérés szűrésére Kálmán-szűrő alkalmazásával

4. EREDMÉNYEK

4.1. Szimulációs keretrendszer

A továbbiakban a SimSolar szimulációs keretrendszer kibővítésére alkalmas új modelleket mutatom be. A nemzetközi felhasználhatóságot elősegítve az új, kibővített keretrendszer nyelve angol.

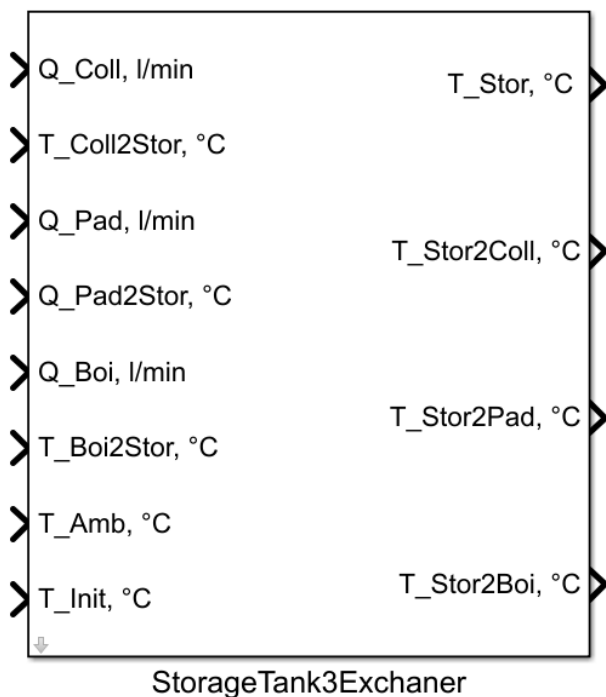
4.1.1. Két hőenergiabemenettel felszerelt hőtároló modell

A modellkísérleteim során egy általam felállított, két hőenergia bemenettel rendelkező hőtároló modellt alkalmaztam, annak érdekében, hogy a fűtési rendszert tisztán villamos, tisztán napenergiás, vagy kombinált rendszert vizsgálhassak. A hőtároló így három hőcserélőt tartalmaz, egyet-egyet a különböző bemenetek számára, valamint egy kimeneti hőcserélőt. - mindhárom hőcserélő egyedileg paramétrezhető.

A modell bemeneti oldalán található a kollektor oldali hőcserélő csőkégyőbe belépő térfogatáram, a kollektorból a hőcserélőbe belépő folyadék hőmérséklete, a fűtőlap oldali hőcserélő csőkégyőbe belépő térfogatáram, a fűtőlaphoz visszatérő folyadék hőmérséklete, a kiegészítő (pl. bojleres) fűtési körhőcserélő csőkégyőjébe belépő térfogatáram, a kiegészítő fűtés oldaláról érkező folyadék hőmérséklete a környezeti hőmérséklet, valamint a hőtárolóban az indulás pillanatában fennálló hőmérséklet.

A modell kimenetei a hőtároló belső hőmérséklete, a hőcserélőből a kollektor irányába visszatérő folyadék hőmérséklete, a fűtőlap felé előremenő fluidum hőmérséklete, valamint a kiegészítő fűtés felé visszatérő munkaközeg hőmérséklete.

A 4.1. ábra szemlélteti az alrendszerbe foglalt modell blokkorientált megjelenését.



4.1. ábra Az alrendszerbe foglalt hőtároló modell MATLAB-Simulink környezetben

Az alrendszer beállítási paraméterei a 4.2. ábra szerint, a közeg sűrűsége, a közeg állandó térfogaton értelmezett fajhője, az összesített hőátadási tényező a környezet irányában, mely identifikálható paraméter, hőtároló tartályának térfogata, a hőtároló felülete, a hőcserélő csőkígyó hőátadási tényezője, mely szintén identifikálható paraméter, illetve a három hőcserélő hasznos felületei.

4.2. ábra A hőtároló modell maszkján beállítható paraméterek

A 4.2. ábra szemlélteti a modell beállítható paramétereit, míg a belső felépítését a 4.3. ábra mutatja. A modell négy részre osztható: A fűtőlapot energiával ellátó hőcserélő kilépő hőmérsékletének kiszámítását végző rész a 2.6 egyenlet szerint számol.

A tartályban uralkodó hőmérséklet meghatározását szolgáló egyenlet a 4.1 szerint a következő:

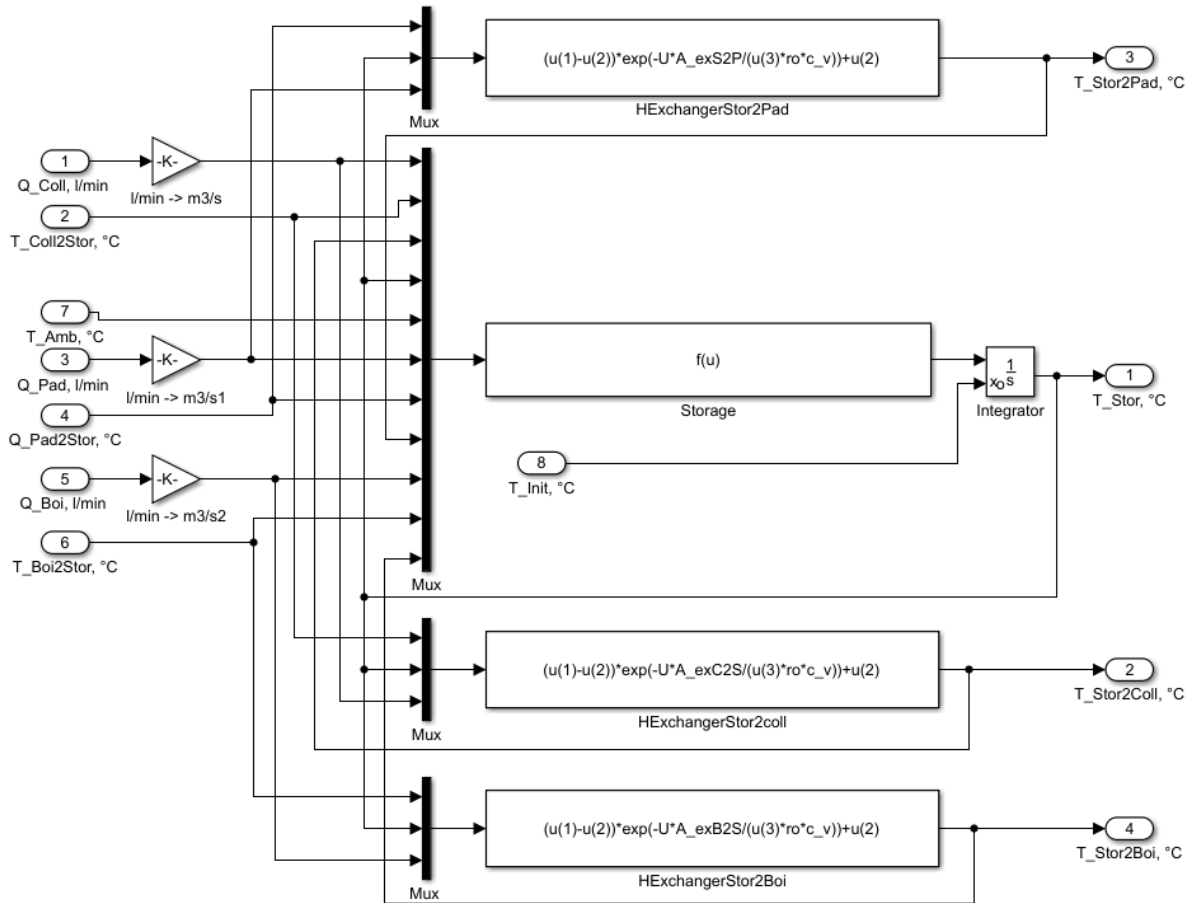
$$\begin{aligned} \frac{dT_{Stor}}{dt} = & \left(\frac{Q_{Coll} (T_{Coll2Stor} - T_{Stor2coll})}{V_{Stor}} \right) + \left(\frac{Q_{Boi} (T_{Boi2Stor} - T_{Stor2Boi})}{V_{Stor}} \right) + \\ & + \left(\frac{Q_{Pad} (T_{Pad2Stor} - T_{Stor2Pad})}{V_{Stor}} \right) - \left(\frac{A_{Stor2Amb} \kappa_{Stor2Amb} (T_{Stor} - T_{Amb})}{\rho c_v V_{Stor}} \right), \end{aligned} \quad (4.1)$$

a kollektorba visszatérő fluidum hőmérsékletét számító rész az 4.2 egyenlet szerint működik:

$$T_{Stor2Coll} = (T_{Coll2Stor} - T_{Stor}) e^{\left(-\kappa_{ex} \frac{A_{Stor2Collex}}{Q_{Coll} \rho c_v} \right)} + T_{Stor}, \quad (4.2)$$

a kiegészítő fűtés irányába visszatérő munkaközeg hőmérsékletét pedig a 4.3 összefüggés írja le:

$$T_{Stor2Boi} = (T_{Boi2Stor} - T_{Stor}) e^{\left(-\kappa_{ex} \frac{A_{Stor2Boiex}}{Q_{Boi} \rho c_v} \right)} + T_{Stor}. \quad (4.3)$$



4.3. ábra A Simulink-ben elkészített hőtároló modell belső felépítése

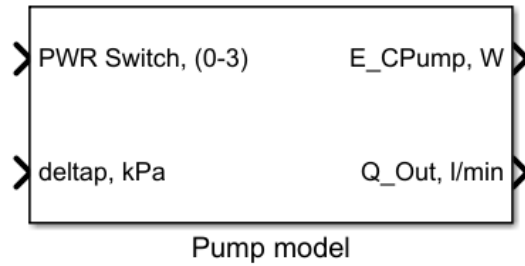
4.1.2. Szivattyúmodell

A fűtési rendszerekben használatos centrifugál szivattyúk matematikai leírása körülményes, így mérések alapján egy úgynevezett „lookup-table” segítségével modelleztem a szivattyú viselkedését különböző nyomásviszonyok esetén. A 4.1. táblázat mutatja a mérési eredményeket, mely alapján a szivattyúmodell meg lett alkotva.

4.1. táblázat: Szivattyú mérési eredményei

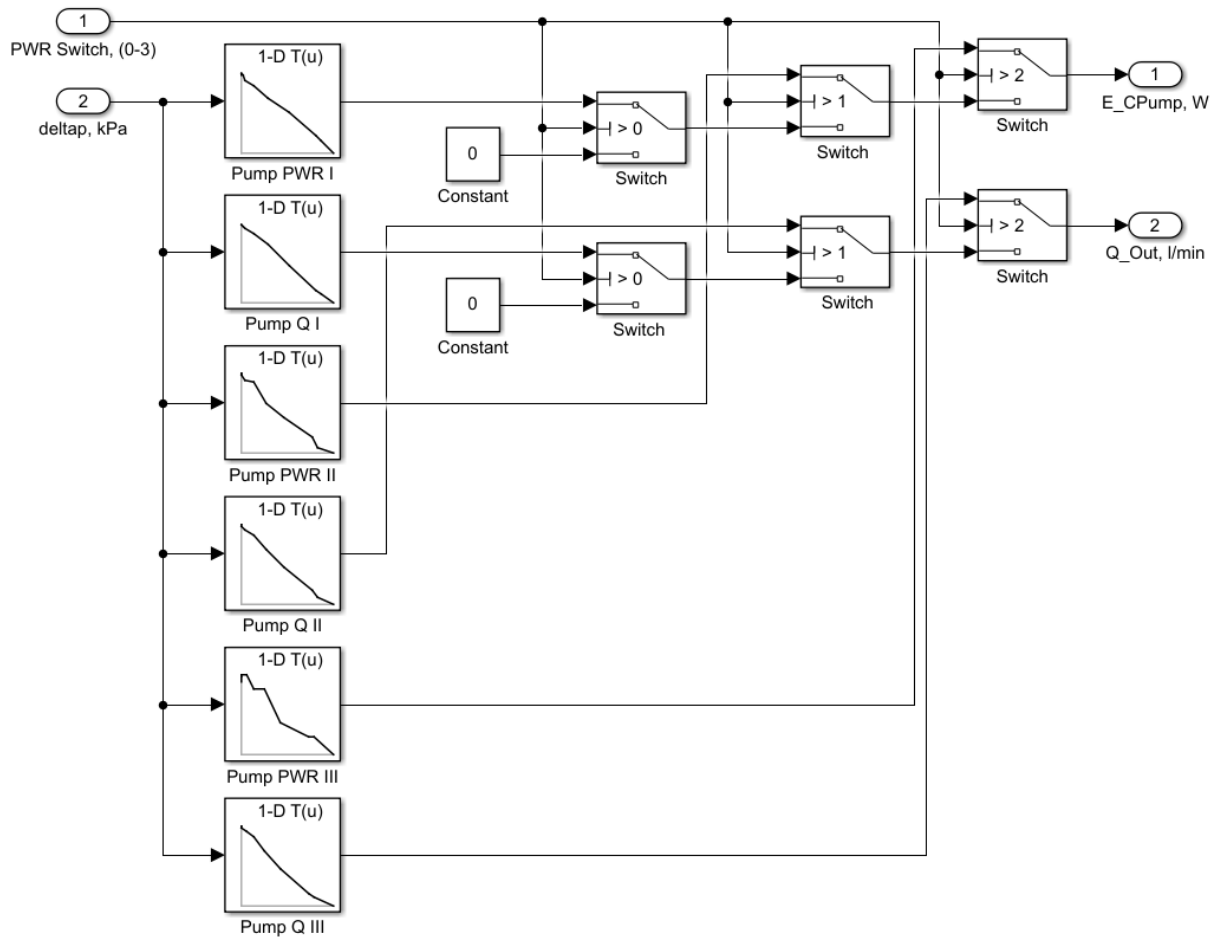
#	Szivattyú fokozat	Felvett villamos teljesítmény P, W	Q, l/min	Δp , kPa
1	I	55,5	8,8	4,112382
2	I	55,6	8,7	4,318775
3	I	55,5	8,6	4,79635
4	I	55,3	8,3	5,436616
5	I	55,1	7,7	8,436879
6	I	54,6	6,4	13,33821
7	I	54,0	4,1	20,9649
8	I	53,1	1,4	30,40949
9	I	52,9	0,9	32,29515
10	I	52,4	0,0	36,73713
1	II	79,5	12,3	5,114674
2	II	79,6	12,1	5,166162
3	II	79,5	11,9	5,560933
4	II	79,2	11,5	7,068212
5	II	79,0	10,5	10,43578
6	II	77,8	8,5	15,51932
7	II	77,0	5,8	23,22051
8	II	75,8	2,2	34,66834
9	II	75,2	1,0	36,97019
10	II	74,9	0,0	43,74605
1	III	110,5	14,5	6,01355
2	III	110,7	14,4	6,116965
3	III	110,8	14,2	6,325515
4	III	110,8	13,6	8,699808
5	III	110,2	12,6	12,43468
6	III	110,2	9,9	17,70044
7	III	108,8	6,7	25,47612
8	III	108,2	2,3	38,92719
9	III	108,2	1,7	41,64523
10	III	107,5	0,0	50,75497

A mért eredmények alapján a szivattyú modell bemenete a teljesítményszint, mely 0-3-ig egész szám lehet, illetve a rendszerben a nyomó és szívóoldal között kialakult nyomáskülönbség, kPa-ban. A modell kimenetei a szivattyú által szállított térfogatáram és a hozzá tartozó villamos teljesítményfelvétel ahogy azt a 4.4. ábra mutatja. Az adatpontok között a modell lineáris interpolációt alkalmaz.



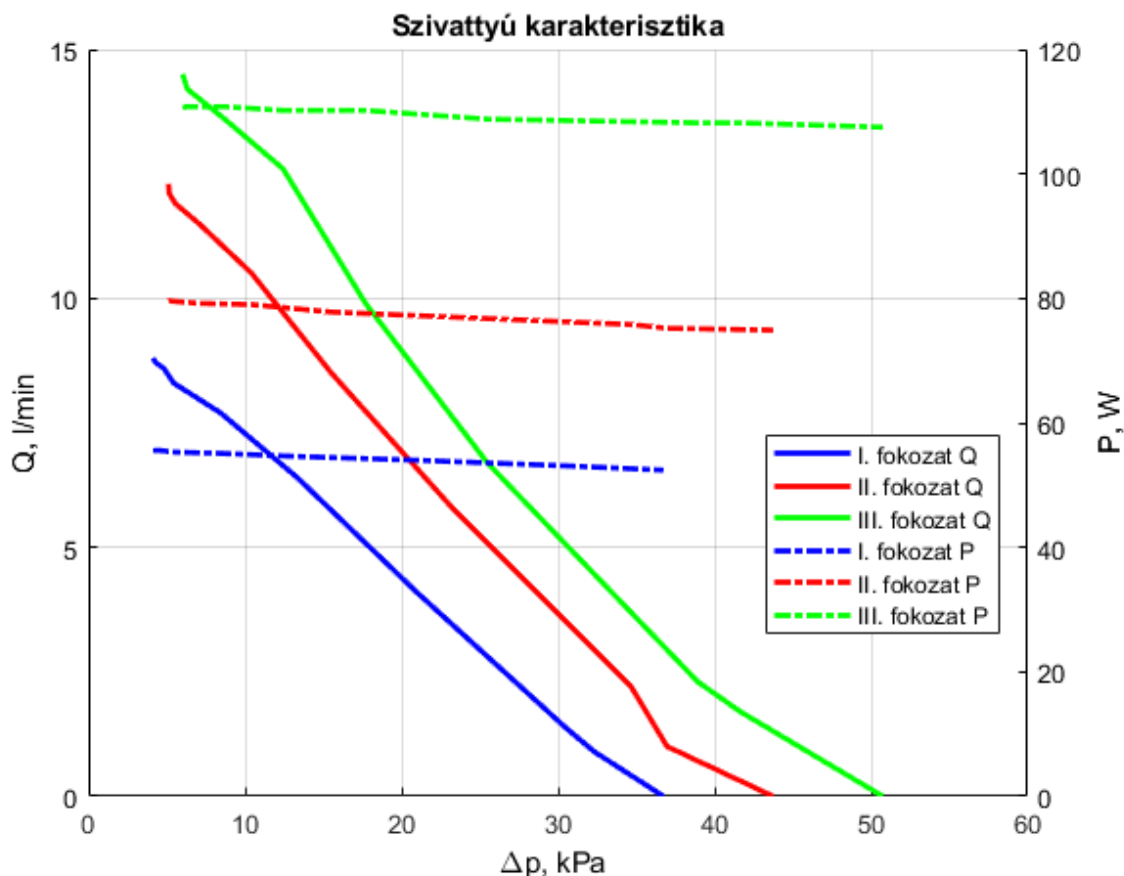
4.4. ábra Az alrendszerbe foglalt szivattyúmodell MATLAB-Simulink környezetben

A szivattyúmodell belső felépítését tekintve összesen hat darab 1 dimenziós lookup-táblázatból és a teljesítményfokozat alapján a kimeneteik közül választó logikából áll, ahogy azt a 4.5. ábra szemlélteti.



4.5. ábra Centrifugál szivattyú lookup-táblázatos modellje Simulink-ben elkészítve

A modell által előállított kimeneti karakterisztikákat a 4.6. ábra szemlélteti.



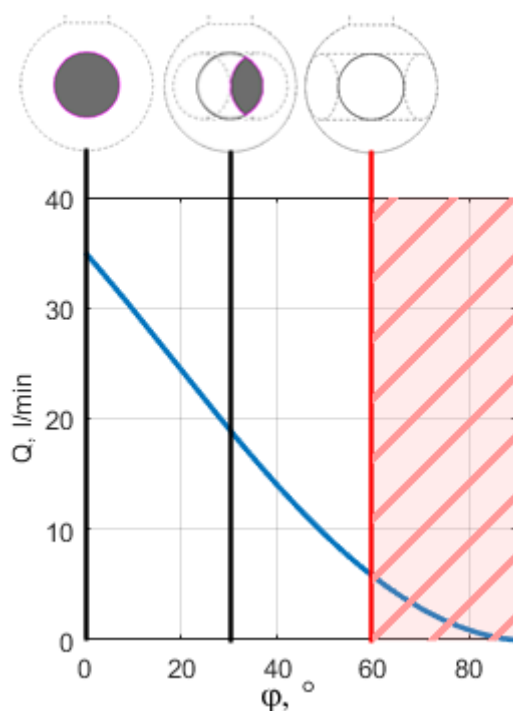
4.6. ábra A szivattyúmodell által előállított karakterisztikák

4.1.3. Fojtómodell

A fojtómodell felállításához először a fojtóként használt gömbcsap záróelemének szögelfordulása és az így kialakuló áramlási keresztmetszet összefüggését kellett meghatározni.

A Simscape *Ball Valve (IL)* izotermikus folyadék hálózatokban alkalmazható golyóscsap blokkja, a *nyitási karakterisztika* (Opening characteristic) *átfedő körök területe* (Area of overlapping circles) beállításánál, az áramlási keresztmetszet meghatározásához használt modell a nyílás alakját a golyófurat és az azt befogadó ház csatlakozó nyílásának, a két kör közötti átfedés területével a forgásszög függvényében közelíti, bár a valóságban a gömb furatának átáramlás irányára merőlegessíkra vetített képe az elfordulással ellipszissé torzul. Azt is fontos megjegyezni, hogy a tényleges gömbcsap teljes záródásához nem szükséges a záróelem 90 fokos elfordulása; a geometriától függően a teljes záródás korábban is bekövetkezhet.

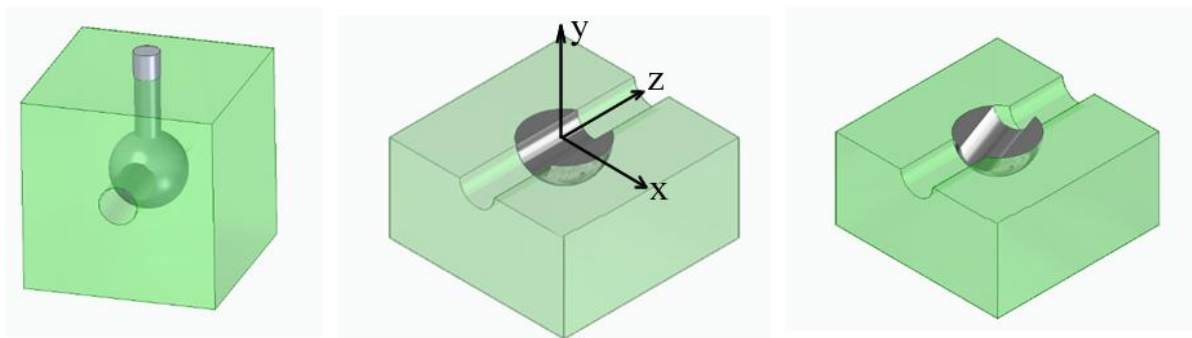
A 4.7. ábra egy golyóscsap példáját mutatja, ahol a golyófurat- és a golyót befogadó ház csatlakozó nyílásának furat sugara 3 mm, a golyó sugara pedig 6 mm a C_d értéke 0,64 a szivárgási keresztmetszet 10^{-10} m^2 értékre, míg a kritikus Reynolds szám 150-re volt beállítva.



4.7. ábra A Simscape modell golyóscsap térfogatáram számítás pontatlansága a záróelem szögelfordulás függvényében

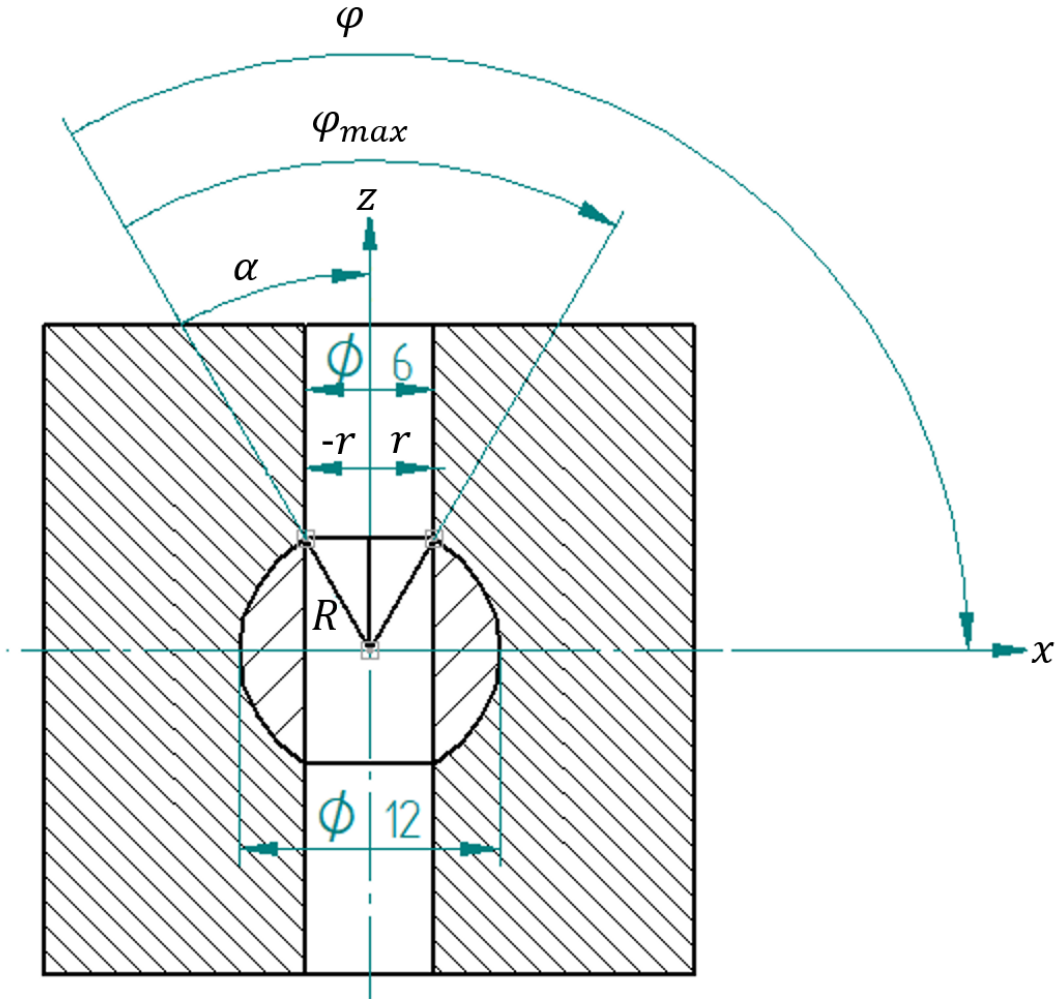
E modell folyamatos beavatkozást végző szabályozási algoritmusokkal együtt történő használata esetén nem várhatóak kellően pontos eredmények. A Simscape modellje a $\varphi = [0^\circ, 90^\circ[$ tartományban nullánál nagyobb áramlási tartományt ad, míg a valóságban egy golyóscsap jóval 90° előtt teljesen bezáródhat. A 4.7. ábra esetében az érvénytelen tartomány 60° felett van, ami egy konkrét 2:1 golyó és furatátmérő arányú csap geometriájának tulajdonsága.

Vizsgálataim azt mutatják, hogy a valóságtól ily mértékben eltérő viselkedést a Simscape *Ball Valve (IL)* blokk, a nyitási karakterisztika átfedő körök területe beállításnál használt áramlási keresztmetszet-számítás pontatlan közelítése okozza. Belátható tehát, hogy egy új, a golyóscsap geometriáján alapuló, a tényleges nyitási keresztmetszetet jobban közelítő számítási módszer kidolgozásával a modell pontosítható. A gömbcsap működését bemutató egyszerűsített modell a 4.8. ábrán látható.



4.8. ábra Fojtószelepként használt gömbcsap egyszerűsített ábrája

Az átfolyási keresztmetszet A_f melyet a golyóscsap záróelem elfordulásának függvényében (φ) kívánok megállapítani. A számításoknál alkalmazott bemeneti adatok vizualizációját a 4.9. ábra szolgálja.



4.9. ábra Fojtószelep felülnézeti metszeti magyarázóábrája

Először meghatároztam a teljes elzáródáshoz szükséges forgási szöget:

$$\varphi_{max} = 2\alpha, \quad (4.4a)$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{r}{R}\right). \quad (4.4b)$$

Ez alapul szolgál az átfolyási keresztmetszet területének leírásához:

$$A_f = A_f(\varphi, r, R). \quad (4.5)$$

A vizsgált tartomány $\varphi \in [0, \varphi_{max}]$, a peremfeltételek $A_f(0) = r^2\pi$ és $A_f(\varphi_{max}) = 0$ a 4.9. ábra alapján.

A 4.7. ábra felső része alapján az áramlási keresztmetszet változását egy rögzített helyzetű kör (SC) és egy mozgó ellipszis (ME) közötti átfedő terület adja. Mivel a kör az ellipszis speciális esete, mindkét alakzat felírható az ellipszis egyenletével:

$$\frac{(x-x_c)^2}{r_x^2} + \frac{(y-y_c)^2}{r_y^2} = 1. \quad (4.6)$$

Ahhoz, hogy ezt az egyenletet olyan formába hozzam, amely további számításokhoz használható, y -t az x függvényeként kellett kifejeznem:

$$y = y_c \pm \sqrt{\frac{r_x^2 r_y^2 - (x - x_c)^2 r_y^2}{r_x^2}}. \quad (4.7)$$

Az egyenletről a következő állítások tehetők:

Mindkét alakzat középpontjának x koordinátája az origóban marad, azaz $x_c = 0$,
az y koordináta az ME esetében megváltozik, amit a következőkben q -val jelöltem,
 r_x az x irányú "sugár", azaz $r_x = r$,
 r_y az y irányú "sugár", SC esetén állandó, $r_y = r$, de ME esetén változik, $r_y = r_e$.

A számításokhoz a koordinátarendszert 90° -kal elforgattam, hogy az alakzatokat leíró függvények érvényesek legyenek, azaz az oldalirányú elmozdulást így nem vessez figyelembe, hanem csak a függőleges elmozdulást. Ez leegyszerűsíti a számításokat, de a φ értelmezése eltér a Simscape modellben használt szögtől, az összefüggés úgy fejezhető ki, hogy $\varphi = 90^\circ - \varphi'$.

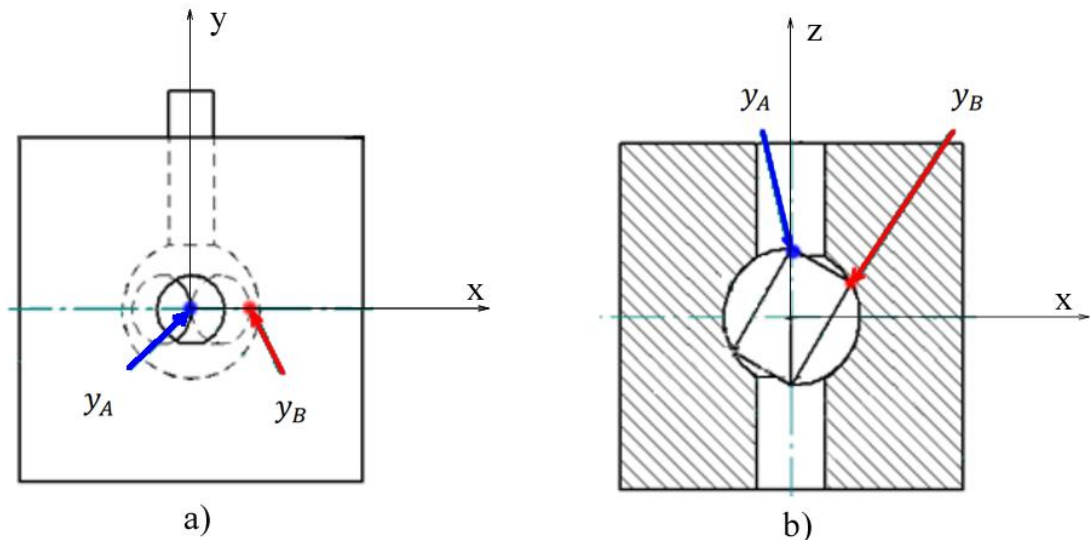
A geometria alapján a következő függvények írják le az áramlási keresztmetszet kontúrgörbéinek alakját:

$$f_{SC}(x) = -\sqrt{r^2 - x^2}, \quad (4.8a)$$

$$f_{ME}(x) = q + \sqrt{\frac{r^2 r_e^2 - x^2 r_e^2}{r^2}}. \quad (4.8b)$$

A 4.10. ábra a további számítások során használt vetületi pontok y_A és y_B magyarázatát mutatja.

A vetületi pontok a golyó középpontján áthaladó, a 4.9. ábrán alkalmazott jelölésnek megfelelő $x - z$ koordináta tengelyekkel párhuzamos sík és a gömbfelületen lévő golyófurat kör metszéspontjai.



4.10. ábra Az y_A és y_B vetületi pontok magyarázata a) előlnézet, b) felülnézet

Meg kellett határoznom az y_A pont helyzetét a φ függvényében, mivel ennek a pontnak az elmozdulása az ME középpontjának ismert mértékű elmozdulását okozza, mivel:

$$q = -y_A - r_e. \quad (4.9)$$

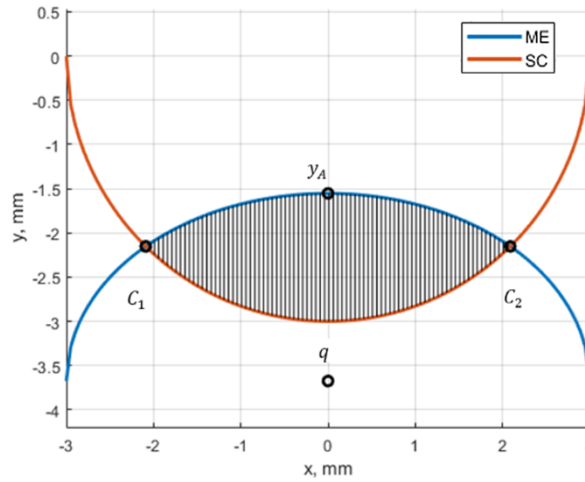
Az y_B pont meghatározása fontos volt az ME változó sugarának meghatározásához. Ismert, hogy $y_A = y_A(\varphi)$, $r_e = r_e(\varphi)$, $y(0) = -r$ és $y(\varphi_{max}) = r$. A geometriából meghatározható, hogy:

$$r_e(\varphi) = \frac{y_B(\varphi) - y_A(\varphi)}{2}, \quad (4.10a)$$

$$y_A(\varphi) = R \cos \left(90^\circ + \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi \right), \quad (4.10b)$$

$$y_B(\varphi) = R \cos \left(90^\circ + \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - (\varphi + \varphi_{max}) \right). \quad (4.10c)$$

A 4.11. ábra egy példát mutat a vizsgált átfolyási keresztmetszet nézeti képére a golyó $\varphi = 45^\circ$ elfordulása esetén. Az ábrán a piros vonal a rögzített helyzetű kör (SC), míg a kék vonal a mozgó ellipszis (ME) ábrázolására szolgál, ahogyan a 4.12-4.16 ábrák esetében is.



4.11. ábra A vizsgált függvények $\varphi = 45^\circ$ esetén

A közbezárt terület kiszámításához meg kell határozni a C_1 és C_2 pontokat. Ismeretes, hogy ezek a pontok léteznek és megfelelnek a következő intervallumban $]0, \varphi_{max}[$:

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{r^2} = \frac{x^2}{r^2} + \frac{(y-q)^2}{r_e^2}, \quad (4.11)$$

melyet a következő alakra rendeztem:

$$y = \frac{q r}{r_e + r}, \quad (4.12a)$$

$$C_{1,2x} = \mp \sqrt{r^2 - y^2}. \quad (4.12b)$$

A C_1 és C_2 pontok meghatározásával a közbenső zárt terület, azaz az áramlási keresztmetszet ábrázolható az elfordulás, a furat sugara és a golyó sugara függvényében:

$$A_f(\varphi, r, R) = \int_{C_{1x}(\varphi, r, R)}^{C_{2x}(\varphi, r, R)} q(\varphi, r, R) + \sqrt{\frac{r^2 r_e(\varphi, r, R)^2 - x^2 r_e(\varphi, r, R)^2}{r^2}} + \sqrt{r^2 - x^2} dx, \quad (4.13a)$$

$$q(\varphi, r, R) = -\sqrt{R^2 - r^2} \sin \varphi, \quad (4.13b)$$

$$r_e(\varphi, r, R) = r \cos \varphi, \quad (4.13c)$$

$$C_{1x}(\varphi, r, R) = -\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (4.13d)$$

$$C_{2x}(\varphi, r, R) = \sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}}. \quad (4.13e)$$

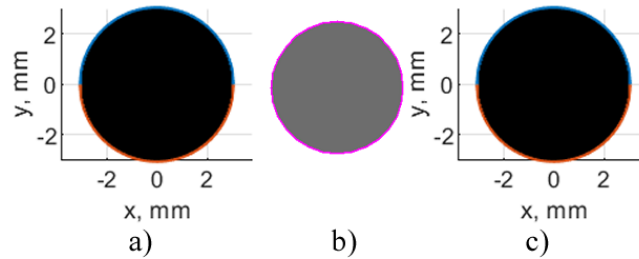
A (4.13b-e) egyenletek egyszerűsített formában szerepelnek, a levezetés az M3 mellékletben látható.

Az új modell figyelembe veszi a geometriát, nevezetesen a golyó és a furat sugarát. A továbbfejlesztett összefüggés geometria alapján pontos áramlási keresztmetszet értéket biztosít a golyóscsap záróelem szögelfordulásának teljes tartományában.

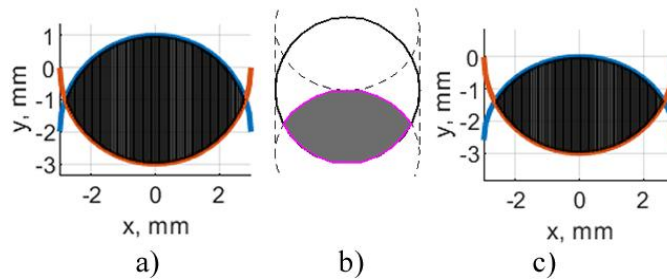
Az összefüggés zárt formája az áramlási keresztmetszet felületét leíró, ettől a ponttól kezdve "ET-modell"-nek nevezett, a függelékben bemutatott levezetés eredménye a következő:

$$A_f(\varphi, r, R) = -\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2})} \sin \varphi + r^2 (\cos \varphi + 1) \sin^{-1} \left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \right). \quad (4.14)$$

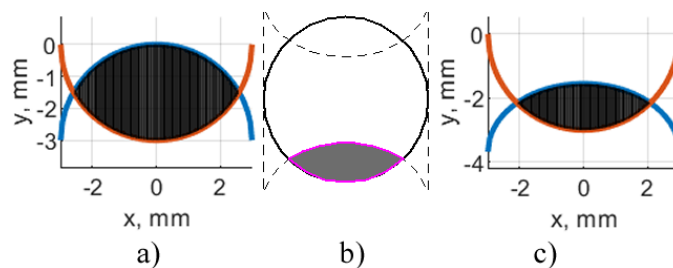
A számítási eredményeket a Siemens SolidEdge CAD szoftver segítségével ellenőriztem különböző fojtószelep záróelem szögállásokban, $\varphi = 0^\circ$ a teljesen nyitott állapot, továbbá a golyófurat- és a golyót befogadó ház csatlakozó nyílásának furat sugara $r = 3$ mm és a golyó sugara pedig $R = 6$ mm, amint az a 4.12-4.16 ábrákon látható. Az ábra címekben a Simscape modell jelölése: SS-modell.



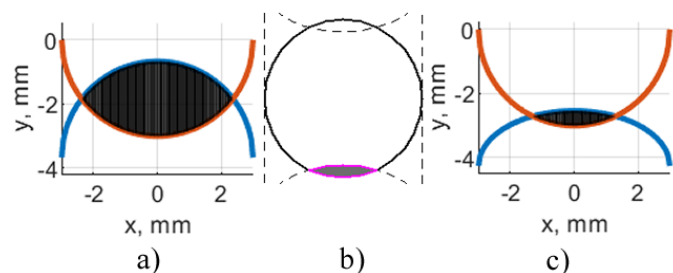
4.12. ábra Áramlási keresztmetszet $\varphi = 0^\circ$ -nál, a) SS-modell: $28,27 \text{ mm}^2$, b) CAD: $28,27 \text{ mm}^2$, c) ET-modell: $28,27 \text{ mm}^2$



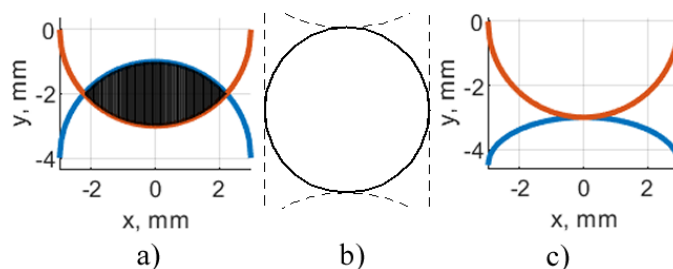
4.13. ábra Áramlási keresztmetszet $\varphi = 30^\circ$ -nál, a) SS-modell: $16,50 \text{ mm}^2$, b) CAD: $11,37 \text{ mm}^2$, c) ET-modell: $11,37 \text{ mm}^2$



4.14. ábra Áramlási keresztmetszet $\varphi = 45^\circ$ -nál, a) SS-modell: $11,05 \text{ mm}^2$,
b) CAD: $4,16 \text{ mm}^2$, c) ET-modell: $4,16 \text{ mm}^2$



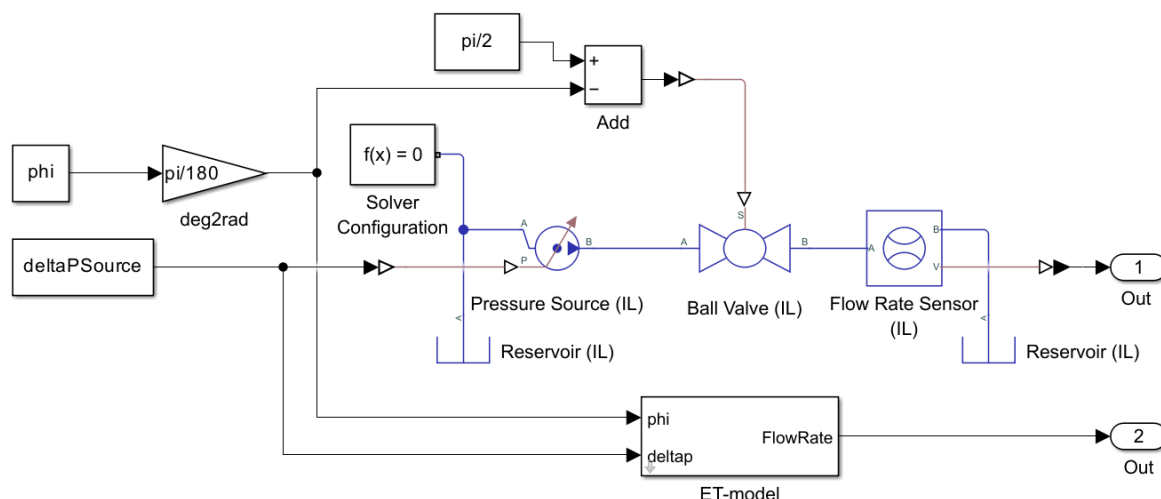
4.15. ábra Áramlási keresztmetszet $\varphi = 55^\circ$ -nál, a) SS-modell: $7,73 \text{ mm}^2$, b) CAD: $0,81 \text{ mm}^2$,
c) ET-modell: $0,81 \text{ mm}^2$



4.16. ábra Áramlási keresztmetszet $\varphi = 60^\circ$ -nál, a) SS-modell: $6,19 \text{ mm}^2$,
b) CAD: 0 mm^2 , c) ET-modell: 0 mm^2

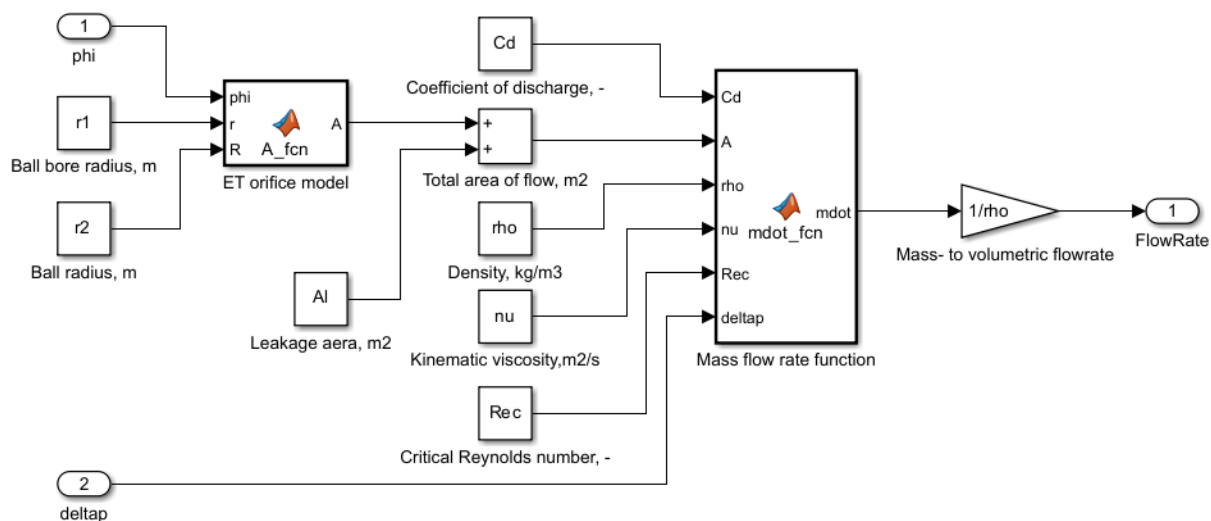
A SolidEdge által végzett numerikus ellenőrzés és a modell white-box jellege alapján megállapítható, hogy a modell a valós jelenséget írja le.

A Simscape és az új modell összehasonlítása a 4.17. ábra alapján történt. A felső modell és annak kimenete a Simscape megoldást, míg az alsó rész a javított megoldást és annak kimenetét mutatja.



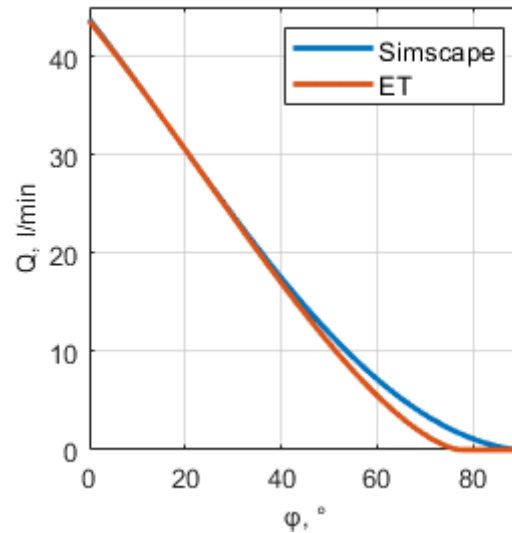
4.17. ábra A Simscape *Ball Valve (IL)* blokk és az újonnan létrehozott ET-modell összehasonlítása

A 4.18. ábra mutatja a 4.17. ábra alsó felén megjelenő ET-modell belső felépítését. A modellben megtalálható az új átfolyási keresztmetszet megadó függvény, valamint a tömegáram kiszámításához használt, a Simscape által is alkalmazott 2.9a és 2.9c egyenletek.



4.18. ábra Az „ET-model” blokk belső felépítése

A 4.19. ábra szemlélteti az összehasonlítás eredményeit, amelyben egy kereskedelmi forgalomban kapható, ½"-os teljes furatú golyóscsap geometriáját használtam. A felhasznált szelep esetében a furat sugara 7,50 mm, a golyó sugara pedig 12 mm. A szimuláció során állandó, 50,755 kPa nyomáskülönbséget használtam. E szelepgeometria esetén a teljesen zárt helyzet 77,36°. A *Ball Valve (IL)* blokkban beállított paraméterek: C_d értéke 0,64 a szivárgási keresztmetszet 10^{-10} m^2 értékre, míg a kritikus Reynolds szám 150-re volt megadva.



4.19. ábra A Simscape *Ball Valve (IL)* blokkal és az újonnan létrehozott ET-modellel számított térfogatáramok összehasonlítása a golyóscsap záróelem szögelfordulás függvényében állandó nyomáskülönbség mellett

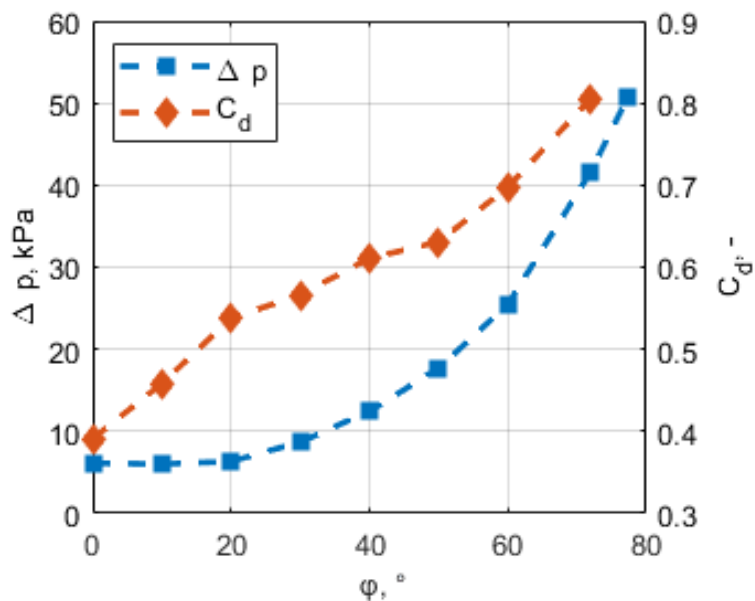
A mérés során a nyomáskülönbséget nem tartottam állandó értéken, így tesztelve a jelenség paraméterfüggetlenségét.

A kísérleti rendszeren végzett mérési eredmények a 4.2. táblázatban láthatók.

4.2. táblázat: Mért és számított adatok

Elfordulás	Mért, szűrt adatok		Számított adatok	
$\varphi, ^\circ$	$Q, \text{l/min}$	$\Delta p, \text{kPa}$	A_f, mm^2	$C_d, -$
0	14,500	6,117	176,715	0,391
10	14,400	6,014	151,021	0,458
20	14,200	6,326	123,719	0,538
30	13,600	8,700	95,955	0,566
40	12,600	12,435	68,939	0,611
50	9,900	17,700	43,954	0,631
60	6,700	25,476	22,426	0,698
72	1,700	41,645	3,854	0,805
77,3644	0,000	50,755	0,000	N/A

Az első sor a teljesen nyitott szelephez tartozó adatokat mutatja, az utolsó sor pedig a teljesen zárt szelep helyzetét. A C_d értéket a Torricelli-törvény segítségével számítottam ki. Az áttekinthetőség érdekében az adatokat az alábbi diagramon szemléltetem (4.20. ábra).



4.20. ábra Nyomáskülönbség és átáramlási tényező a golyóscsap záróelem elfordulási szög függvényében

A 4.3. táblázat öt egymást követő mérési eredményt foglal össze, összehasonlítva a 4.4. táblázatban látható szimulációs adatokkal.

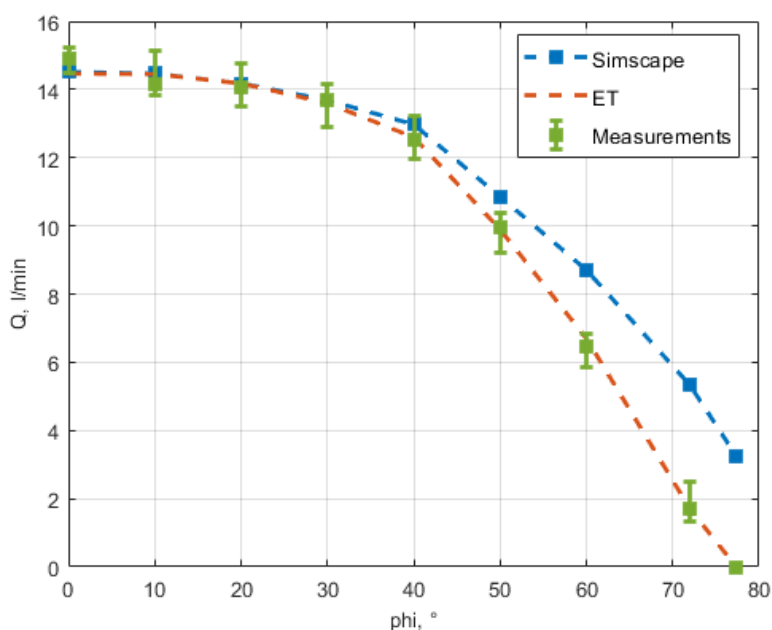
4.3. táblázat: Mért térfogatáram adatok különböző golyóscsap záróelem szögelfordulásoknál

Elfordulás	Mért térfogatáram, szűrt értékek						
$\varphi, ^\circ$	Q1, l/min	Q2, l/min	Q3, l/min	Q4, l/min	Q5, l/min	Átlag, l/min	Szórás, l/min
0	14,879	14,5	15,032	14,894	15,225	14,906	0,266151
10	15,12	14,137	13,824	13,889	13,878	14,17	0,544869
20	14,119	13,49	14,205	14,768	13,708	14,058	0,493598
30	13,943	13,789	13,612	12,92	14,144	13,682	0,468657
40	11,97	12,501	13,23	12,364	12,557	12,524	0,456226
50	10,397	9,205	9,803	9,915	10,378	9,94	0,489977
60	6,693	6,62	6,35	6,833	5,865	6,472	0,38223
72	1,388	1,521	1,315	2,485	1,91	1,724	0,483504
77,36	0	0	0	0	0	0	0

4.4. táblázat: Szimulált térfogatáram adatok különböző golyóscsap záróelem szögelfordulásoknál

Elfordulás	Szimulált térfogatáram, ET-modell	Szimulált térfogatáram, Simscape modell
$\varphi, ^\circ$	QET, l/min	QSS, l/min
0	14,467	14,517
10	14,451	14,462
20	14,178	14,178
30	13,600	13,685
40	12,599	12,974
50	9,900	10,858
60	6,699	8,707
72	1,700	5,330
77,36	0,000	3,253

A könnyebb áttekinthetőség érdekében az adatok összehasonlítását a 4.21. ábra szemlélteti.



4.21. ábra A Simscape modell, a javított modell és a mért térfogatáram adatok összehasonlítása

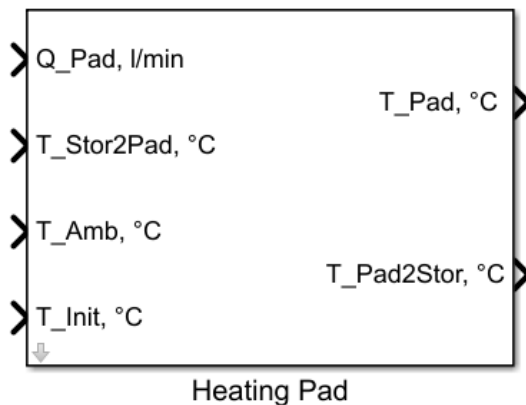
Amint látható, jelentős különbség van a Simscape modell, az új, továbbfejlesztett modell és a mért adatok között, míg a mért adatok és a továbbfejlesztett modell eredményei szoros ($R_{ET}^2 = 0.9986$) korrelációt mutatnak, a Simscape modell esetében ez csak $R_{SS}^2 = 0.8843$.

4.1.4. Fűtőlap modell

A fűtőlapmodell egy vízzel töltött, csőígyó hőcserélőt tartalmazó polimer tartályt ír le, mely egy, a malacnevelőknél alkalmazott gyakori megoldás.

A modell bemeneti oldalán található a hőcserélő csőkígyóba belépő térfogatáram, a belépő folyadék hőmérséklete, a környezeti hőmérséklet, valamint a fűtőlapban az indulás pillanatában fennálló hőmérséklet.

A 4.22. ábra szemlélteti az alrendszerbe foglalt modell blokkorientált megjelenését.



4.22. ábra A fűtőlap modell alrendszer MATLAB-Simulink környezetben

Az alrendszer beállítási paraméterei a 4.23. ábra szerint, a közeg sűrűsége, a közeg állandó térfogaton értelmezett fajhője, az összesített hőátadási tényező a környezet irányában, mely identifikálható paraméter, fűtőlap tárolójának térfogata, a fűtőlap hőátadó felülete, a hőcserélő csőkígyó hőátadási tényezője, mely szintén identifikálható paraméter, illetve a hőcserélő hasznos felülete. A modell kimenetei a fűtőlap hőmérséklete, illetve a fűtőlappól visszatérő folyadék hőmérséklete.

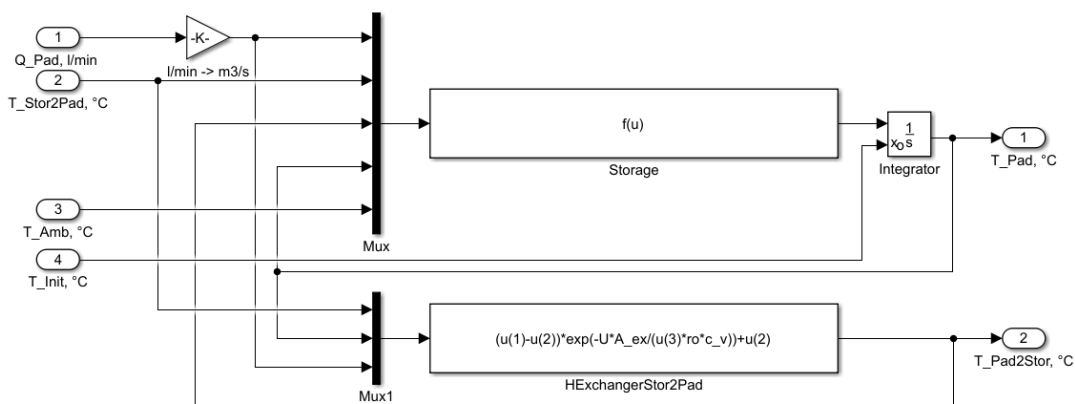
4.23. ábra A fűtőlap modell alrendszer maszkján beállítható paraméterek

A 4.24. ábra szemlélteti a modell belső felépítését. A modell két részre osztható: A fűtőlap hőmérsékletének kiszámítását végző rész a 4.15 egyenlet szerint számol:

$$\frac{dT_{Pad}}{dt} = \left(\frac{Q_{Pad} (T_{Pad2Stor} - T_{Stor2Pad})}{V_{Pad}} \right) - \left(\frac{A_{Pad2Amb} \kappa_{Pad2Amb} (T_{Pad} - T_{Amb})}{\rho c_v V_{Pad}} \right), \quad (4.15)$$

míg a hőcserélőből visszatérő fluidum hőmérsékletét számító rész az 4.16 egyenlet szerint működik:

$$T_{Pad2Stor} = (T_{Stor2Pad} - T_{Pad}) e^{\left(-\kappa_{ex} \frac{A_{Pad2Stor} ex}{Q \rho c_v}\right)} + T_{Pad}. \quad (4.16)$$

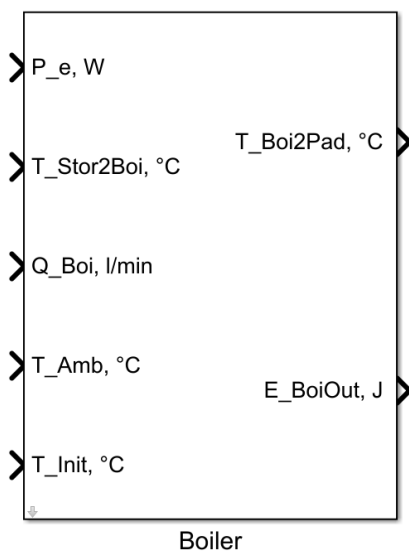


4.24. ábra A fűtőlap modell belső felépítése

4.1.5. Bojlermodell

A bojlermodell egy szabványos, villamos fűtőbetéttel rendelkező kevertvizes hőtárolót modellez, mely alkalmas kiegészítő hőforrásként egy jellemzően napenergiás rendszerre rásegíteni, amennyiben nem áll rendelkezésre elegendő napsugárzás. A modell bemeneti oldalán található a fűtőpatron névleges villamos teljesítménye, a bojlerbe visszatérő folyadék hőmérséklete, a bojleren keresztülhaladó térfogatáram, a környezeti hőmérséklet, valamint a bojlerben az indulás pillanatában fennálló hőmérséklet.

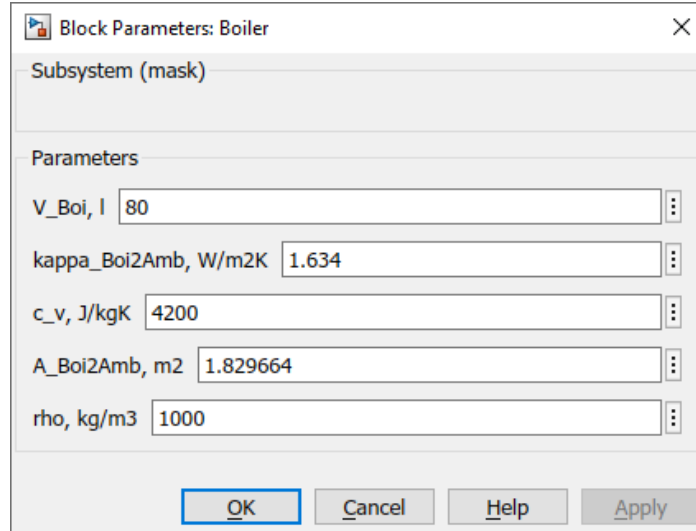
A 4.25. ábra szemlélteti az alrendszerbe foglalt modell blokkorientált megjelenését.



4.25. ábra Az alrendszerbe foglalt bojler modell Simulink környezetben

Az alrendszer beállítási paraméterei a 4.26. ábra szerint, a bojler tárolójának térfogata, az összesített hőátadási tényező a környezet irányában, mely identifikálandó paraméter, a közeg állandó térfogaton értelmezett fejhője, a bojler hőátadó felülete, valamint a közeg sűrűsége. A modell kimenetei a bojlerből kilépő folyadék hőmérséklete, valamint a közeggel a bojlerből

elvont energia. A modellben a tartályban a valóságban tapasztalható hőmérsékleti rétegződés nincs figyelembevéve.



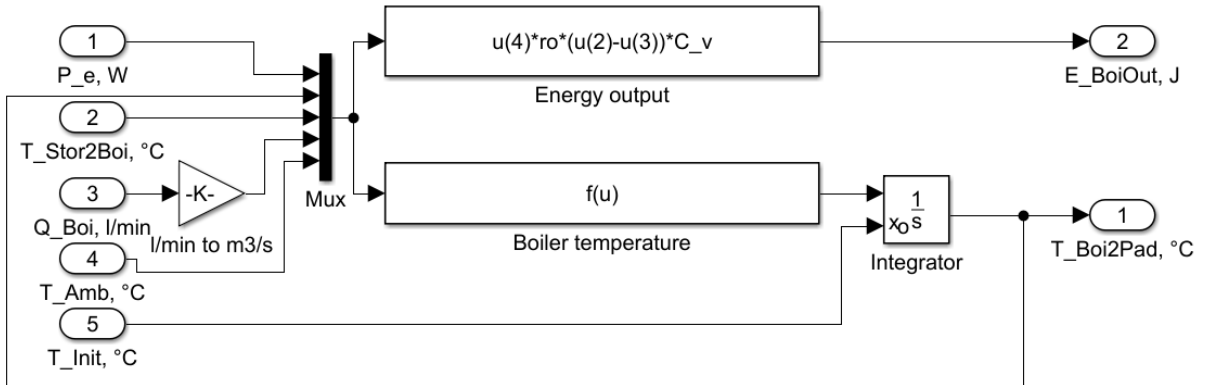
4.26. ábra A bojler modell alrendszer maszkján beállítható paraméterek

A 4.27. ábra szemlélteti a modell belső felépítését. A modell két részre osztható: Az elvont energia számítását végző rész a 4.17 egyenlet szerint számol:

$$\frac{dT_{Boi}}{dt} = \left(\frac{P_e}{\rho c_v V_{Boi}} \right) - \left(\frac{Q_{boi} (T_{Boi2Stor} - T_{Stor2Boi})}{V_{Boi}} \right) - \left(\frac{A_{Boi2Amb} \kappa_{Boi2Amb} (T_{Boi} - T_{Amb})}{\rho c_v V_{Boi}} \right), \quad (4.17)$$

míg a bojler belső hőmérsékletét számító rész az 4.18 egyenlet szerint működik:

$$E_{BoiOut} = Q_{Boi} \rho (T_{Boi2Stor} - T_{Stor2Boi}) c_v. \quad (4.18)$$

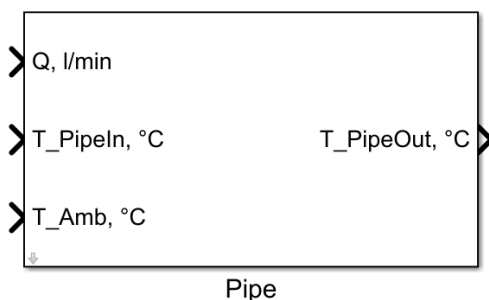


4.27. ábra A bojlermodell belső felépítése

4.1.6. Csőmodell

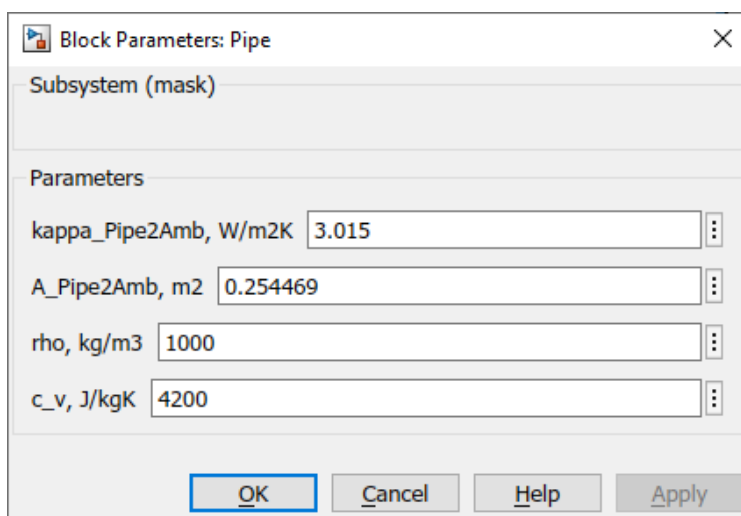
A csőmodell kizárólag a csövön disszipált hőteljesítménnyel számol, így határozza meg az adott térfogatáramon adott hőmérsékleten a csőbe belépő folyadék kilépő hőmérsékletét.

A 4.28. ábra szemlélteti az alrendszerbe foglalt modell blokkorientált megjelenését.



4.28. ábra Csőhővesztéset leíró modell alrendszerbe foglalva Simulink környezetben

A modell maszkján beállítható paraméterek a 4.29. ábra szerint, az összesített hőátadási tényező a környezet irányában, mely identifikálандó paraméter, a cső hőátadó felülete, valamint a közeg sűrűsége, valamint a közeg állandó térfogaton értelmzett fejhője. A modell kimenete a csőből kilépő fluidum hőmérséklete.

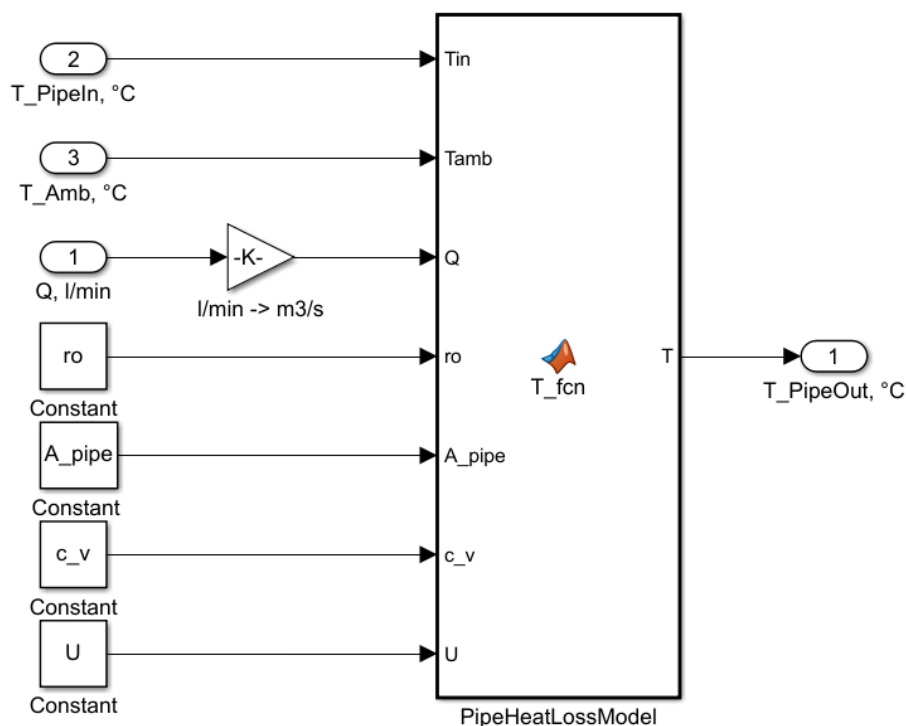


4.29. ábra A csőhővesztés modell alrendszer maszkján beállítható paraméterek

A modell működését leíró összefüggés a következő:

$$T_{PipeOut} = (T_{PipeIn} - T_{Amb}) e^{\left(-\kappa_{Pipe2Amb} \frac{A_{Pipe2Amb} x}{Q \rho c_v}\right)} + T_{Amb}. \quad (4.19)$$

A modell megvalósításához a 4.30. ábra szerint MATLAB funkcióblokkot alkalmaztam az algebrai hurkokkal szembeni ellenállósága miatt.



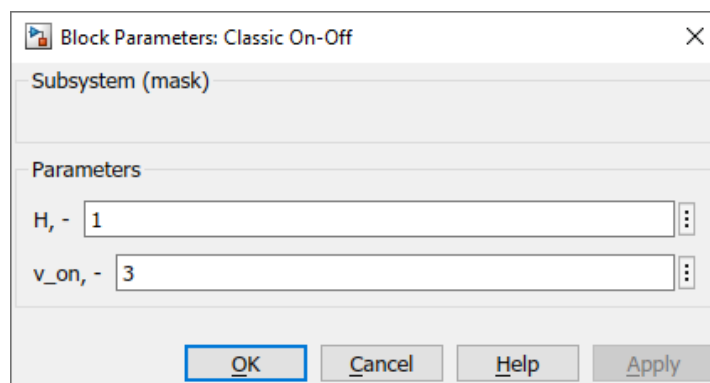
4.30. ábra A csőhővesztés modell belső felépítése

4.1.7. Kétállású szabályozó hiszterézissel

A gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott diszkrét szabályozási eljárás a hiszterézissel ellátott kétállású szabályozó, melynek blokkorientált megvalósítása a következőkben látható. A megvalósítás során a szabályozót szimmetrikus hiszterézissel láttam el. Az alrendszerbe foglalt szabályozót a 4.31. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.32. ábra mutatja.



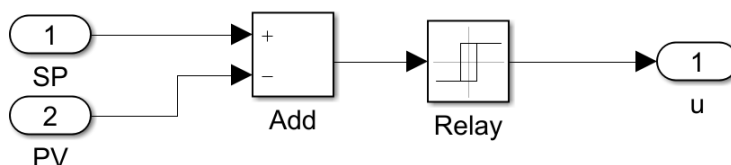
4.31. ábra Alrendszerbe foglalt kétállású szabályozó Simulink környezetben



4.32. ábra A kétállású szabályozó alrendszer beállítható paraméterei

Mivel a blokkot nem csak hőmérséklet-, vagy térfogatáram szabályozásra lehet alkalmazni, a paramétereknél nincs feltüntetve dimenzió. A „H” a hiszterézis értékét jelenti, ebben a konkrét példában a hiszterézis 1°C, míg a „v_on” paraméter a szabályozó kimeneti értékét adja meg, e konkrét példa esetében a szivattyú teljesítmény választó kapcsolójának 3-as, azaz maximális állását.

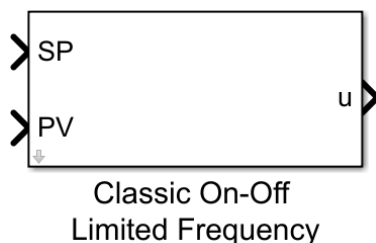
A modell belső felépítését a 4.33. ábra mutatja, míg a működését leíró összefüggést a 3.2a és 3.2b egyenlet adja meg.



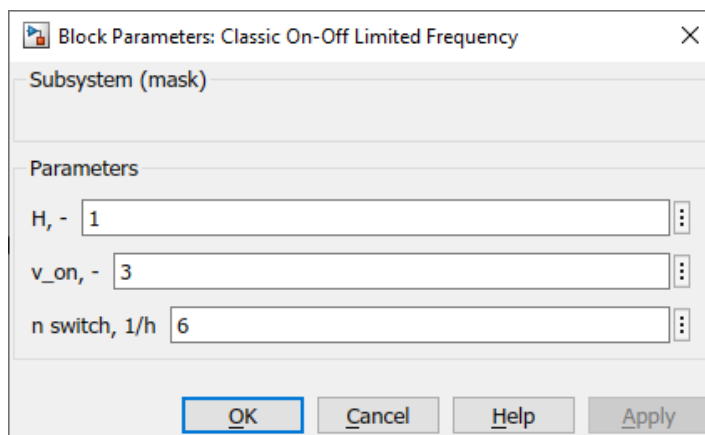
4.33. ábra A kétállású szabályozó belső felépítése

4.1.8. Kétállású szabályozó hiszterézissel és limitált kapcsolási frekvenciával

A valóságos rendszerek esetében alkalmazott kétállású szabályozóknál ügyelni kell a kapcsolási frekvenciára, mely műszaki szempontból aggályos lehet, ha túlzottan nagy. Gázkazánok esetében például tapasztalati szabály, hogy a kazán nem kapcsolhat ki és be óránként hatnál többször, hiszen az az élettartam, illetve energiahatékonyság rovására menne. A vizsgálatok során ezt a tapasztalati értéket fogom használni. Az alrendszerbe foglalt szabályozót a 4.34. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereit a 4.35. ábra mutatja. Valóságos irányítási rendszereknél ezt az értéket gyakran a vezérlő programja tartalmazza, ennek hiányában külső vezérlő berendezések megfelelő programozásával megvalósítható.

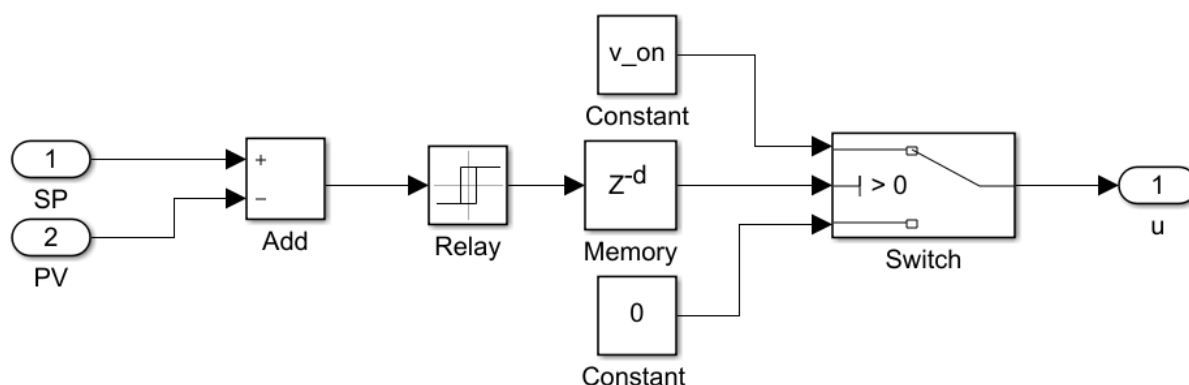


4.34. ábra Az alrendszerbe foglalt kétállású szabályozó határolt kapcsolási frekvenciával
Simulink környezetben



4.35. ábra A határolt kapcsolási frekvenciájú kétállású szabályozó alrendszer beállítandó paramétereit

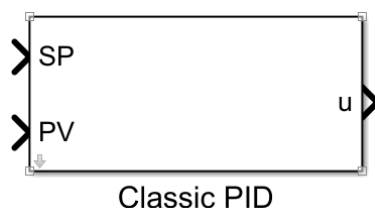
A modell belső felépítését a 4.36. ábra mutatja, míg a működését leíró összefüggést a 3.2a és 3.2b egyenlet adja meg, azzal a különbséggel, hogy a szabályozó csak a beállított óránkénti kapcsolási szám paramétertől (n switch, $1/h$) függő időközönként képes döntést hozni.



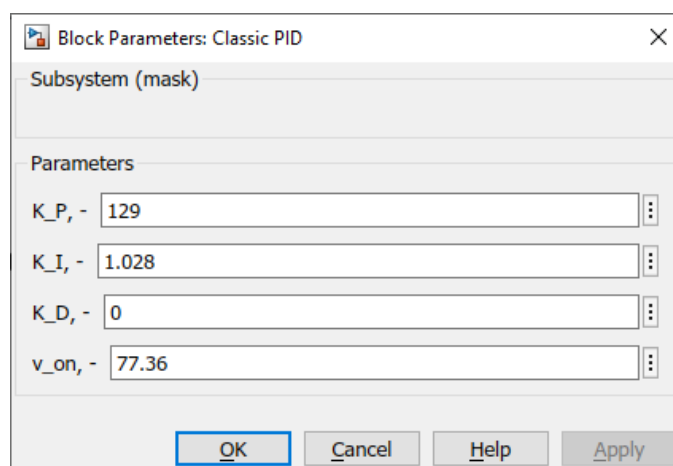
4.36. ábra A kapcsolási frekvencia korlátozott kétállású szabályozó felépítése

4.1.9. Klasszikus PID szabályozó

A gyakorlatban szintén széleskörben elterjedt szabályozó típus a már folytonos szabályozást megvalósító PID szabályozó, melyből jellemzően termikus rendszerek esetében csak a proporcionális tagot alkalmazzák. Az alrendszerbe foglalt szabályozót a 4.37. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.38. ábra mutatja.



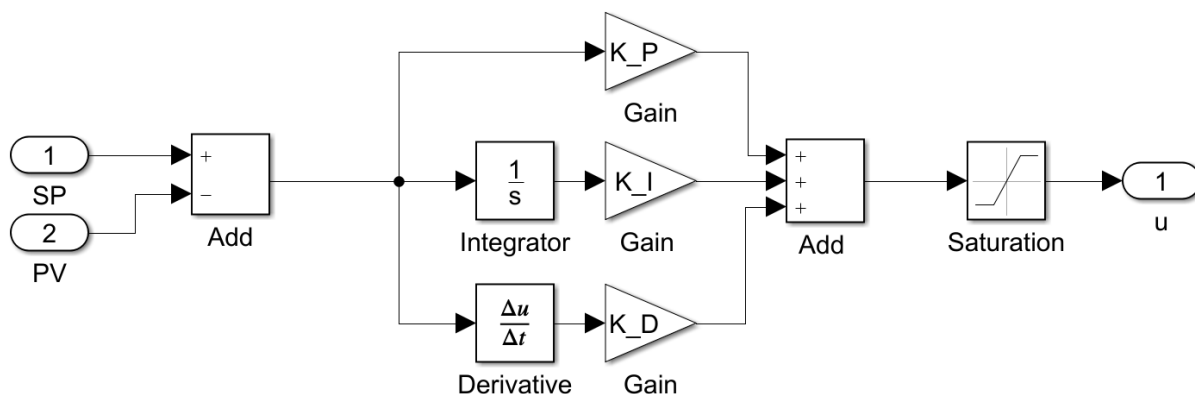
4.37. ábra Az alrendszerbe foglalt arányos-integráló-deriváló szabályozó Simulink környezetben



4.38. ábra A klasszikus PID szabályozó alrendszer maszkján beállítandó paraméterek

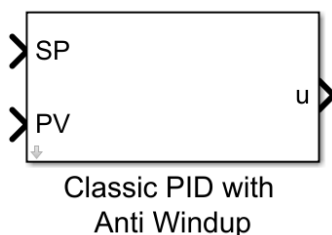
A maszkon látható paraméterek egyikéhez sincs dimenzió társítva, hiszen az erősítési tényezők eredendően dimenzió nélküli számok, a „v_on” paraméter dimenziója pedig az alkalmazástól függ, jelen példa esetében ez a fojtószelepként használt gömbcsap maximális nyitásához tartozó szög.

A modell belső felépítését a 4.39. ábra mutatja, míg a működését leíró összefüggést a 2.20 egyenlet adja meg.

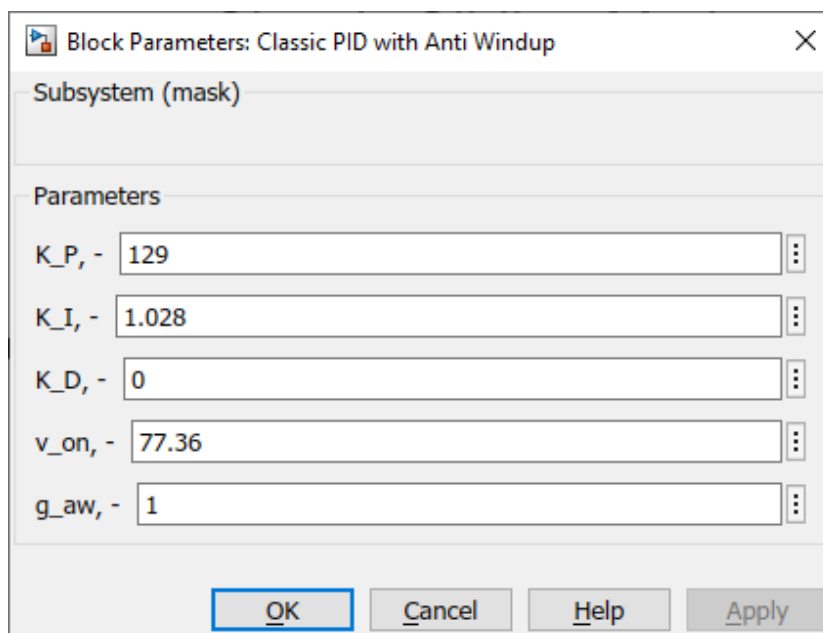


4.39. ábra A klasszikus PID szabályozó felépítése

Az integráló tag túltelítődési hajlama miatt nagy időállandójú rendszereknél érdemes úgynevezett anti-windup kompenzálást alkalmazni, mely az integráló tag túltelítődését akadályozza meg azáltal, hogy a maximálisan kivezérelhető rendelkezőjel és a szabályozó által előállított elméleti rendelkezőjel különbségét visszacsatolja az integráló tag elé. Az alrendszerbe foglalt szabályozót a 4.40. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.41. ábra mutatja.



4.40. ábra Az alrendszerbe foglalt anti-windup kompenzálással ellátott PID szabályozó

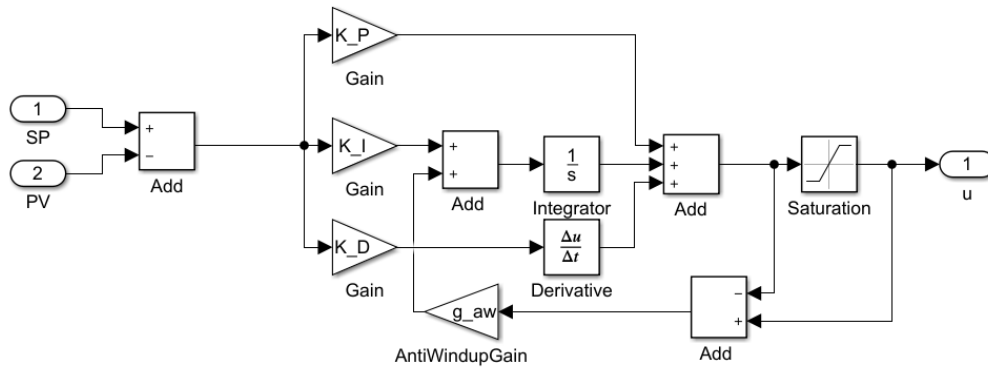


4.41. ábra Az anti-windup-al ellátott PID szabályozó alrendszer maszkján beállítandó

paraméterek

A paraméterek közt megjelent „g_aw” paraméter az anti-windup megoldás erősítési tényezőjét jelenti, mely dimenzió nélküli szám.

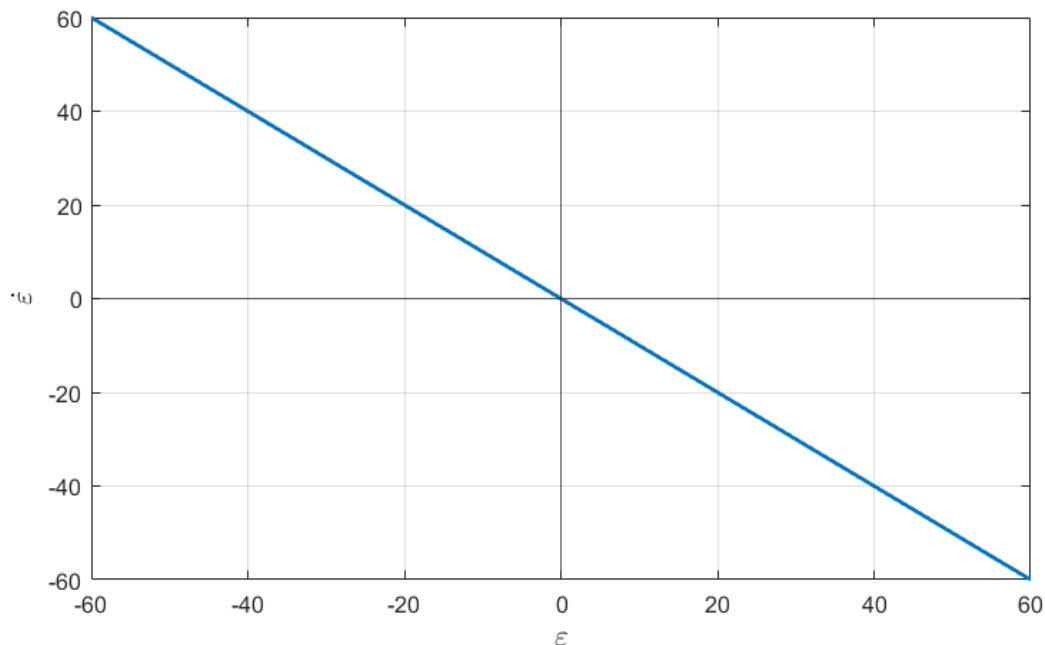
A modell belső felépítését a 4.42. ábra mutatja, míg a működését leíró összefüggést a 2.20 egyenlet adja meg, azzal a kiegészítéssel, hogy a kívánt beavatkozás és maximálisan kivezérelhető rendelkező jel közti különbséget az integráló tag elé vezetjük vissza, így megelőzve annak túltelítődését.



4.42. ábra Anti-windup kompenzációval ellátott PID szabályozó felépítése

4.1.10. Klasszikus csúszómód-szabályozó

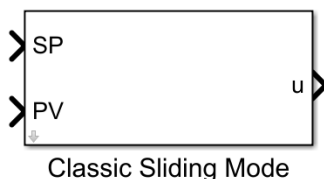
A klasszikus csúszómód-szabályozó csúszófelületként egy egyenest alkalmaz, ezen az egyenesen igyekszik tartani a szabályozó a szabályozott szakasz hiba-hiba derivált trajektóriáját (4.43. ábra).



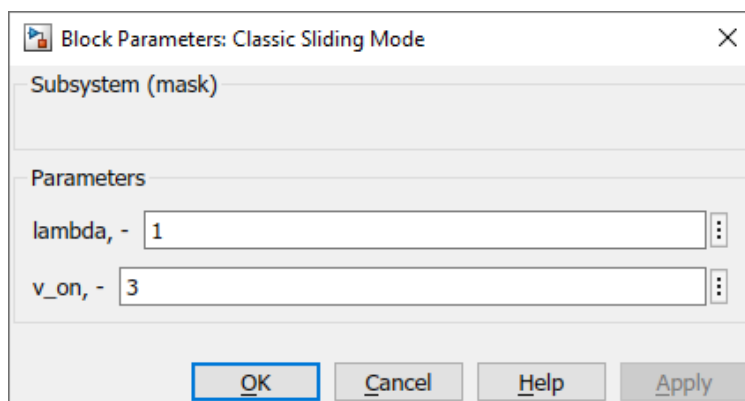
4.43. ábra A klasszikus csúszómód-szabályozó csúszóegyenese

A csúszóegyenese egyenletét a 3.6b egyenlet írja le.

Az alrendszerbe foglalt szabályozót a 4.44. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.45. ábra mutatja.



4.44. ábra Az alrendszerbe foglalt csúszómód-szabályozó

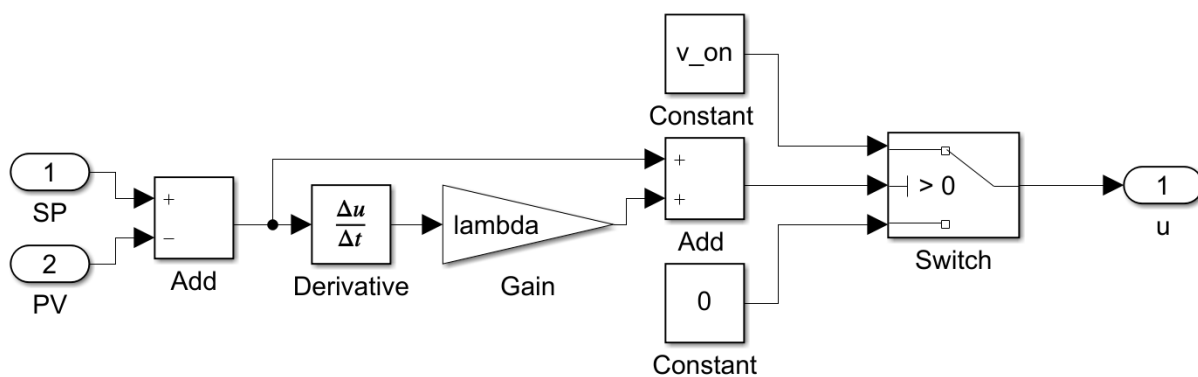


4.45. ábra A klasszikus csúszómód-szabályozó alrendszer beállítandó paraméterei

A „v_on” paraméter a szabályozó kimeneti értékét adja meg, e konkrét példa esetében a szivattyú teljesítmény választó kapcsolójának 3-as, azaz maximális állását.

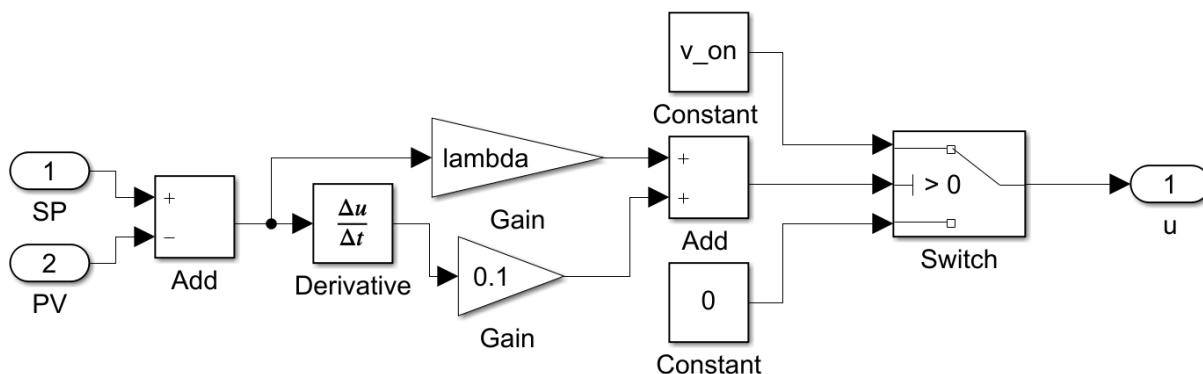
A lambda érték adja meg a csúszóegyenes meredekségét. A modell belső felépítését a 4.46. ábra szemlélteti, míg a működését leíró összefüggést a 3.6a-b egyenletek adják meg.

$$u(\tau) = \begin{cases} v_{on}, & s(\tau) > 0 \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (4.20)$$



4.46. ábra Klasszikus csúszómód-szabályozó felépítése Simulink környezetben

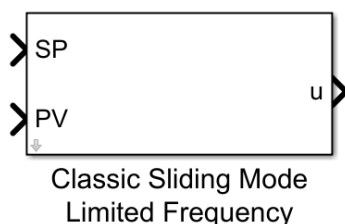
Annak érdekében, hogy a csúszóegyenes meredeksége nagyobb mértékben változtatható legyen, a klasszikus csúszómód-szabályozót a következőképp módosítottam (4.47. ábra). Az új összefüggést tapasztalati úton határoztam meg, a hibaderivált tized részére történő mérséklése és a hiba egy változóval (lambda) történő szorzása a lambda értékének változtatásával nagyobb mértékben módosítja a csúszóegyenes meredekségét, mint a klasszikus megoldás.



4.47. ábra A kis mértékben módosított klasszikus csúszómód-szabályozó

4.1.11. Klasszikus csúszómód-szabályozó limitált beavatkozási frekvenciával

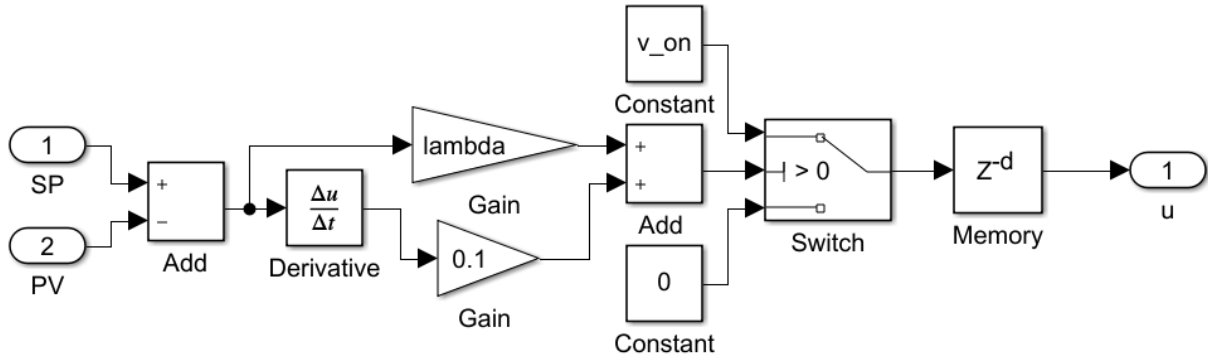
Az előző megoldás kitűnő eredményeket adhat szimulációs környezetben, hiszen a valóságtól eltérő módon nincs korlátozva a kapcsolási frekvencia, így végtelen gyakorisággal képes a szabályozott szakaszba avatkozni. A gyakorlatban azonban csak limitált frekvenciával vagyunk képesek beavatkozni, így a valóságot jobban közelítő megoldásra volt szükség, melyet a következőkben mutatok be. Az alrendszerbe foglalt szabályozót a 4.48. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.49. ábra mutatja.



4.48. ábra Alrendszerbe foglalt limitált beavatkozási frekvenciájú csúszómód-szabályozó

4.49. ábra A limitált beavatkozási frekvenciájú csúszómód-szabályozó alrendszer maszkon beállítható paraméterei

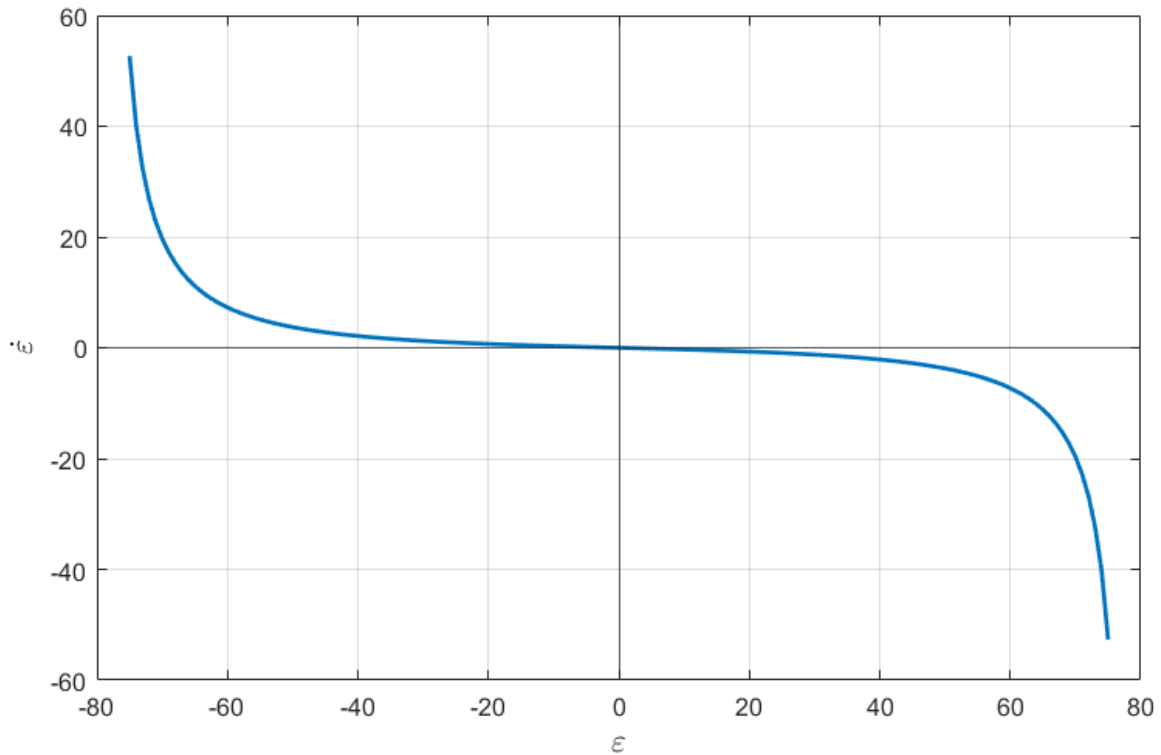
A maximális kapcsolási szám értékből számítom azt az időt, amíg az utolsó döntés által előállított rendelkezőjel érvényben marad. A modell belső felépítését a 4.50. ábra szemlélteti, míg a működését leíró összefüggést a 3.6a és 3.6b egyenlet adja meg, azzal a különbséggel, hogy a szabályozó csak a beállított óránkénti kapcsolásiszám paramétertől függő hosszúságú időközönként képes döntést hozni.



4.50. ábra Limitált beavatkozási frekvenciájú csúszómód-szabályozó felépítése

4.1.12. Módosított csúszómód-szabályozó

A klasszikus csúszómód-szabályozó egy lehetséges hibája a csúszófelület egyenességében kereshető. Az y tengelyen lévő hiba derivált, azaz a hiba megváltozásának sebessége a lengések elkerülése érdekében elegendő, ha csak nagy hiba mellett magas. Amint a szabályozott jellemző közelíti a kívánt értéket, érdemes laposabb trajektóriát alkalmazni. Erre kínál megoldást a következő szabályozó, mely, habár diszkrét megoldás, de a hiba megváltozásának sebessége a célérték környezetében alacsony (4.51. ábra).

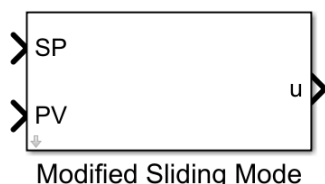


4.51. ábra A módosított csúszómód-szabályozó csúszófüggvénye

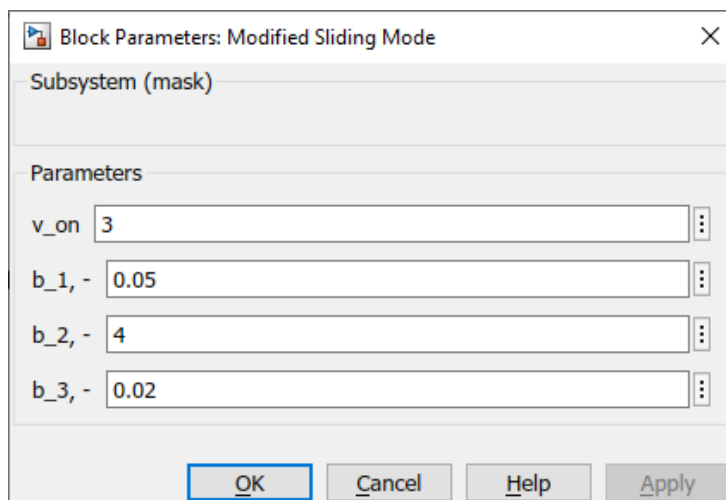
A csúszófelületet leíró egyenlet a következő:

$$s(\tau) = b_1 \frac{d\varepsilon}{d\tau} - b_2 \tan(\pi - b_3 \varepsilon(\tau)) \quad (4.21)$$

Az alrendszerbe foglalt szabályozót a 4.52. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.53. ábra mutatja.



4.52. ábra Az alrendszerbe foglalt módosított csúszómód-szabályozó

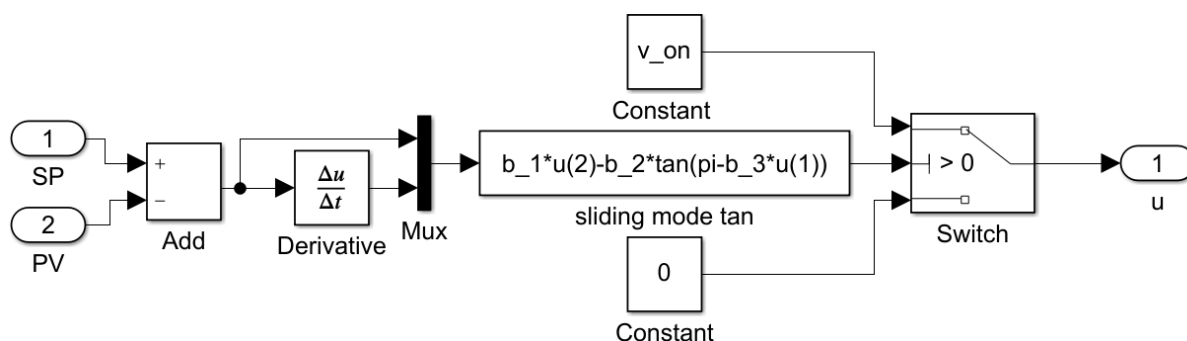


4.53. ábra A módosított csúszómód-szabályozó alrendszer maszkon beállítható paramétere

A „b_1”-től „b_3” paraméterek dimenzió nélküli számok, melyekkel a csúszófüggvény alakját lehet befolyásolni. Jelen paraméterek tapasztalati úton kerültek meghatározásra ezen konkrét irányítási feladat megoldásához. Ezen beállítások mellett a csúszófüggvény alakját a 4.51. ábra szemlélteti.

A modell belső felépítését a 4.54. ábra mutatja, míg a működését leíró összefüggést a 4.21 és 4.22 egyenlet adja meg.

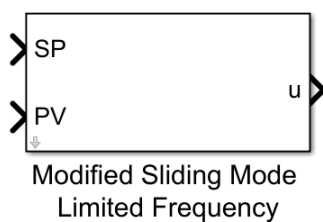
$$u(\tau) = \begin{cases} v_{on}, & s(\tau) > 0 \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (4.22)$$



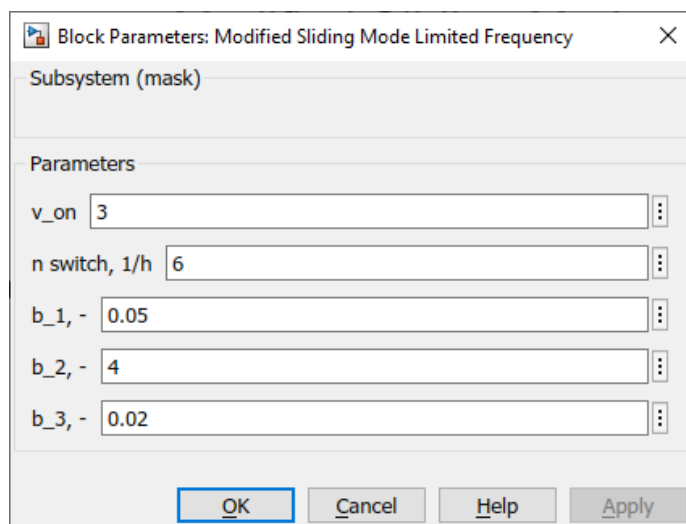
4.54. ábra A módosított csúszómód-szabályozó felépítése

4.1.13. Módosított csúszómód-szabályozó limitált kapcsolási frekvenciával

A fentiek kiegészítésére készült el a limitált kapcsolási frekvenciával ellátott szabályozó, mely Simulink környezetben alrendszerbe foglalását a 4.55. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.56. ábra mutatja.

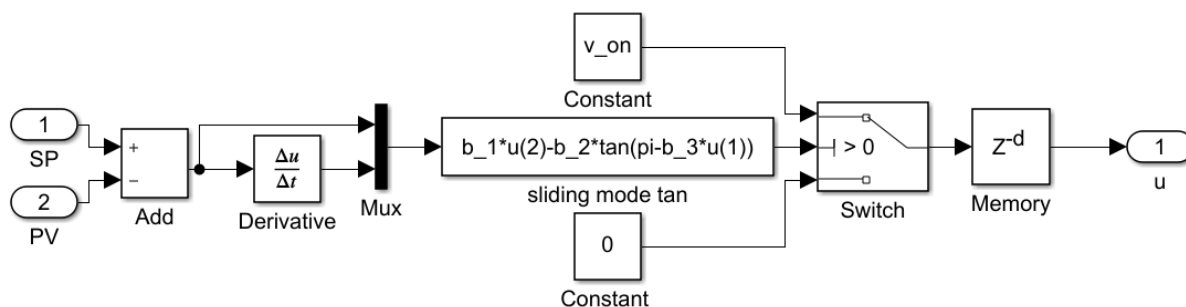


4.55. ábra Alrendszerbe foglat limitált kapcsolási frekvenciájú módosított csúszómód-szabályozó



4.56. ábra A limitált kapcsolási frekvenciájú módosított csúszómód-szabályozó alrendszer maszkon beállítható paraméterei

A modell belső felépítését a 4.57. ábra mutatja be, míg a működését leíró összefüggést a 4.22 és 4.23 egyenlet adja meg, azzal a különbséggel, hogy a szabályozó csak a beállított óránkénti kapcsolásiszám paramétertől függő hosszúságú időszakonként képes döntést hozni.



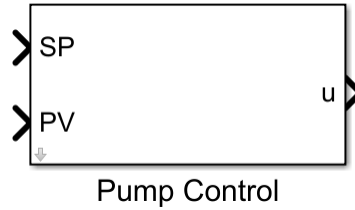
4.57. ábra A limitált kapcsolási frekvenciájú módosított csúszómód-szabályozó felépítése

4.1.14. Kombinált szabályozáshoz alkalmazott különálló szivattyúszabályozás

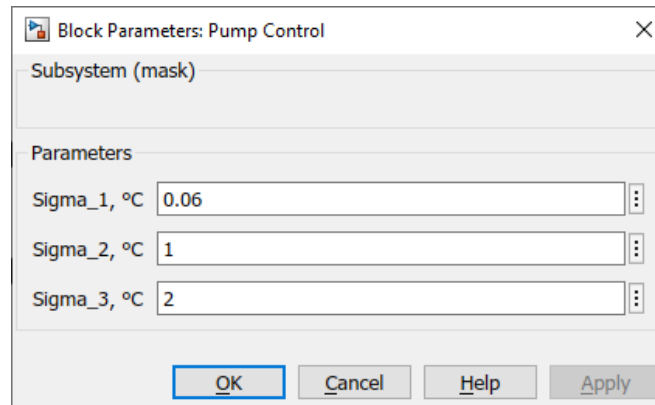
A szivattyúszabályozás az energiahatékonyságra való tekintettel különösen fontos alrendszer, hiszen amikor a szabályozó rendszer a fojtószeleppel csökkenteni igyekszik a térfogatáramot, felesleges a szivattyút maximális teljesítményen üzemeltetni. Amikor a szabályozás a térfogatáram teljes megállítását igényli, a szivattyút is érdemes kikapcsolni. Mivel a szivattyúk szerkezeti kialakításukból kifolyólag három különböző teljesítményszinten képesek üzemelni, ezzel a megoldással ki lehet váltani egy költséges fokozatmentes fordulatszám-szabályozó megoldást, mint amilyen egy frekvenciaváltó lehetne. A megoldás természetesen kis mértékű

módosítást igényel, a szivattyú kötődobozába integrált váltókapcsolót ki kell váltani egy relés vezérléssel.

Az alrendszerbe foglalt szabályozót a 4.58. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.59. ábra mutatja be.



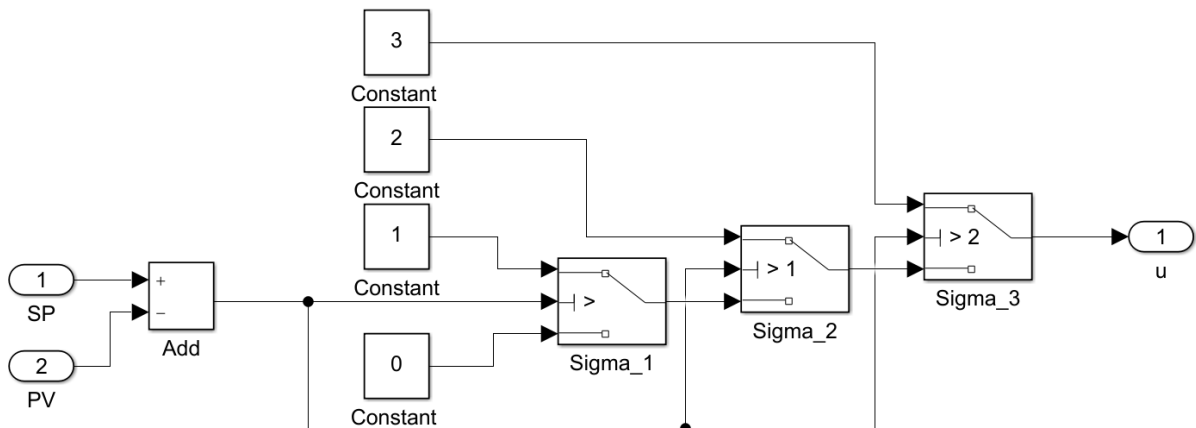
4.58. ábra A szivattyút a hibától függően 4 fokozatban állító alrendszer



4.59. ábra A szivattyúszabályozás alrendszer maszkon beállítható paraméterei

Az alrendszer belső felépítését a 4.60. ábra mutatja be, míg a működését leíró összefüggést a 4.23 egyenlet adja meg.

$$u(\tau) = \begin{cases} 3, & \varepsilon(\tau) > \sigma_3 \\ 2, & \varepsilon(\tau) > \sigma_2 \\ 1, & \varepsilon(\tau) > \sigma_1 \\ 0, & \varepsilon(\tau) \leq \sigma_1 \end{cases} \quad (4.23)$$

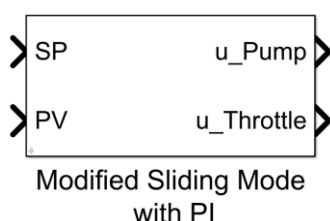


4.60. ábra A keringtető szivattyú szállítási teljesítményfokozat szabályozás felépítése

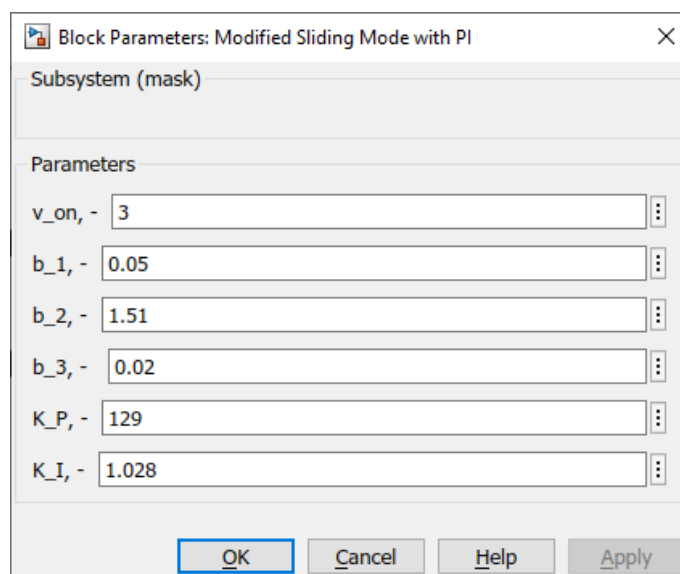
4.1.15. Kombinált módosított csúszómód-szabályozó

A kombinált szabályozó megoldás magában foglalja az előző 4.1.14. alfejezetben ismertetett szivattyú szállítási teljesítmény szabályozást és a módosított csúszómód-szabályozó megoldást is, annak érdekében, hogy az energiahatékonyság megőrzése mellett egy robusztus, de csattogásra nem hajlamos új megoldást érjünk el. A megoldás lényege, hogy a csúszómód-szabályozó a szivattyú motorjának működtetésébe avatkozik be, illetve a tömegáram módosítást végző beavatkozó szerv, a fojtószelep záróelemének szögelfordulását egy arányos-integráló szabályozási algoritmussal kombinálva látja el, mellyel a csúszómód-szabályozó csattogásra való hajlama megszüntethető, de a robusztusság is megmarad. Ezen kívül a csúszófüggvény alá érve a szivattyú kikapcsolásával a PI szabályozó túllendülésre való hajlama is kiküszöbölhető.

Az alrendszerbe foglalt kombinált szabályozót a 4.61. ábra, míg a maszkon beállítható paramétereket a 4.62. ábra mutatja be.



4.61. ábra Az alrendszerbe foglalt kombinált szabályozó Simulink-ben



4.62. ábra A kombinált módosított csúszómód-szabályozó modell alrendszer maszkján beállítható paraméterek

A „v_on” paraméter a szabályozó kimeneti értékét adja meg, e konkrét példa esetében a szivattyú teljesítmény választó kapcsolójának 3-as, azaz maximális állását. A „b” paraméter a csúszófüggvény alakját befolyásolja, a „K” paraméterek pedig az alkalmazott PI szabályozó erősítési tényezőjét módosítják.

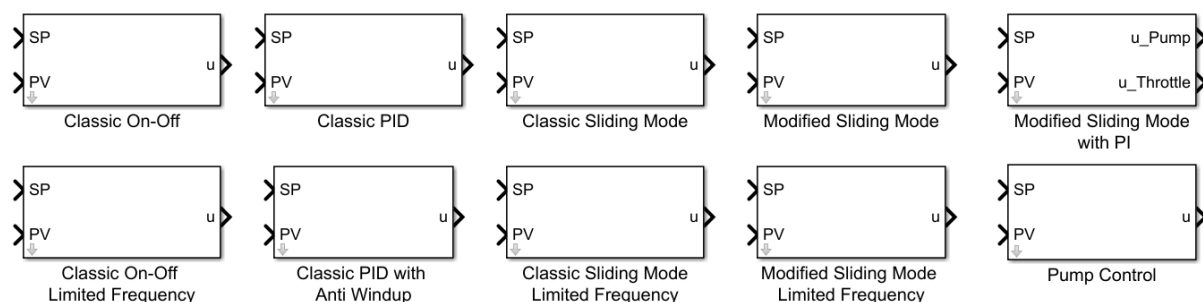
A kombinált módosított csúszómód-szabályozó két részre osztható. A szivattyú módosított csúszómóddal történő teljesítmény szabályozásra, mely a hibától függően 4 fokozat lehet és a fojtószelep módosított csúszómód-PI kaszkádszabályozására, ahogy azt a 4.63. ábra mutatja.



A 4.64. ábra mutatja be a kiegészített szimulációs keretrendszer komponenseit. A modellek között megtalálhatók a környezeti jellemzőket, a fűtőlap működését, a villamos bojler viselkedését leíró, valamint kétféle hőtároló, ezenkívül a csövek hőveszteségét számító és a gömbcsap modelljei.

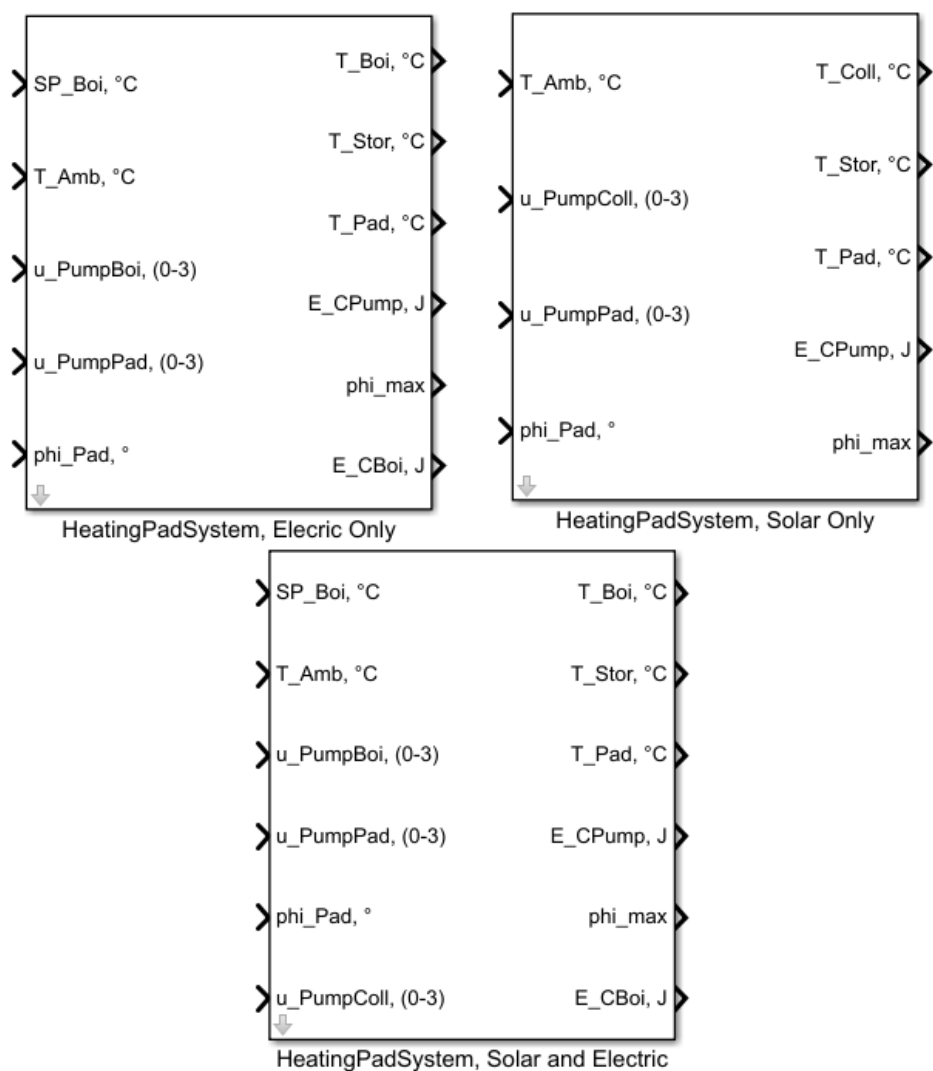


A 4.65. ábra mutatja a keretrendszerbe beépített szabályozókat, melyek közül a diszkrét szabályozók esetében a valóságban alkalmazható limitált kapcsolási frekvenciával rendelkező verzió is megtalálható.



4.65. ábra A kiegészített keretrendszer szabályozói

A 4.66. ábra mutatja be a szabályozóalgoritmusok gyors tesztelhetősége miatt létrehozott komplett rendszermodelleket, melyek esetében a bemenetek a környezeti jellemzőkre, illetve a rendelkezőjelekre vannak korlátozva, a maszkon pedig csak a legfontosabb rendszerjellemzők módosíthatók.



4.66. ábra Csak villamos, csak termikus napenergiás és kombinált rendszerek modelljei

Ha a kombinált, napenergiás és villamos fűtést is magába foglaló rendszert tekintjük, a rendszer bemenetei a kiegészítő fűtés hőmérsékleti alapjelét (SP_Boi, °C), a környezeti hőmérséklet értékét (T_Amb, °C), a kiegészítő fűtés, a felhasználói oldal fűtésének, illetve a kollektorkör szivattyújának teljesítményfokozatát (sorrendben: u_PumpBoi, (0-3), u_PumpPad, (0-3), u_PumpColl, (0-3)), valamint a fűtőlapp fojtószelep elzáróelemének szöghelyzetét (phi_pad, °) foglalja magában.

A kimenetek a kiegészítő fűtés által előállított víz hőmérséklete, a hőtároló közeg hőmérséklete, valamint a fűtőlapp hőmérséklete (sorrendben: T_Boi, °C, T_Stor, °C, T_Pad, °C). Ezen kívül a szivattyú energiafelhasználása (E_CPump, J), a kiegészítő fűtés energiafelhasználása (E_CBoi, J), illetve az adott fojtószelepgeometriához tartozó záráshoz szükséges elfordítási szög (phi_max). A maszkon csak a kezdeti hőmérsékletértékeket lehet megadni, de a maszk alá tekintve természetesen az összes paraméter beállítható az alrendszerek maszkjainak segítségével.

4.2. Fűtőlapp modell paraméterérzékenységi vizsgálata

A szimulációs kísérletek célja a fűtőlappok optimális hőmérsékletszabályozása, elvégeztem a fűtőlappok paraméterérzékenységi vizsgálatát. A paraméterérzékenységi vizsgálatot a fűtőlapp hűlésének 1 órára futtatott szimulációjával végeztem, a vizsgált paramétereket egy százalékkal csökkentettem az eredetihez képest. A vizsgálati eredményeket a 4.5. táblázat mutatja be.

4.5. táblázat Keringtetés nélküli paraméterérzékenységi vizsgálat eredményei

Paraméterérzékenységi vizsgálat				
	Keringtetés nélkül			
Modellkísérletben beállított értékek	Eredeti	Fűtőlapp felület 99%	Fűtőlapp hőátadási tényező 99%	Fűtőlapp víztérfogat 99%
Keringtetett vízhőmérséklet, °C	N/A	N/A	N/A	N/A
Fűtőlapp kiindulási hőmérséklete, °C	35	35	35	35
Környezeti hőmérséklet, °C	25	25	25	25
Térfogatáram, l/min	0	0	0	0
Vizsgált paraméter				
Fűtőlapp felület, m ²	1,421	1,40679	1,421	1,421
Fűtőlapp térfogat, l	39	39	39	38,61
Fűtőlapp-környezet hőátadási tényező, W/m ² K	14,163	14,163	14,02137	14,163
Beépített hőcserélő felület, m ²	0,2368	0,2368	0,2368	0,2368
Beépített hőcserélő hőátadási tényező, W/m ² K	1248,15	1248,15	1248,15	1248,15
Az eredmény a számított fűtőlaphőmérséklet 1 h-nál, °C.	31,43	31,45	31,45	31,4
Eltérés, %	N/A	-0,0636	-0,0636	0,0955

A vizsgálatból kiderül, hogy a fűtőlappok felülete, valamint hőátadási tényezője egyforma mértékben (0,0636%) befolyásolja a vég hőmérséklet alakulását, míg a vízzel töltött térfogata 0,0955%-kal. Mivel a felület és térfogat paraméterek pedig konstrukciós, mérhető jellemzők, így az identifikáláshoz a hőátadási tényezőt fogom vizsgálni. A működés közben azonban a fűtőlaphoz hőmérsékletben elhanyagolható mértékben különböző állapotok letakarják a fűtőlapp hőleadó felületének egy részét, a későbbi, terhelésérzékenységi vizsgálatok során ezt a paramétert fogom változtatni.

A következő vizsgálatban a fűtőlapp melegedését vizsgáltam a fűtőlapp hőcserélőjében keringtetett állandó hőmérsékletű és térfogatáramú fűtővíz segítségével. A vizsgált paraméterek a fűtőlappban elhelyezett hőcserélő hőátadó felülete és hőátadási tényezője volt. A vizsgálati eredményeket a 4.6. táblázat mutatja be.

4.6. táblázat: Keringtetéssel végzett paraméterérzékenységi vizsgálat eredményei

Paraméterérzékenységi vizsgálat			
	Keringtetéssel		
Modellkísérletben beállított értékek	Eredeti	Hőcserélő felület 99%	Hőcserélő hőátadási tényező 99%
Keringtetett vízhőmérséklet, °C	38	38	38
Fűtőlapp kiindulási hőmérséklete, °C	35	35	35
Környezeti hőmérséklet, °C	25	25	25
Térfogatáram, l/min	10	10	10
Vizsgált paraméter			
Fűtőlapp felület, m ²	1,421	1,421	1,421
Fűtőlapp térfogat, l	39	39	39
Fűtőlapp-környezet hőátadási tényező, W/m ² K	14,163	14,163	14,163
Beépített hőcserélő felület, m ²	0,2368	0,234432	0,2368
Beépített hőcserélő hőátadási tényező, W/m ² K	1248,15	1248,15	1235,6685
Az eredmény a számított fűtőlaphőmérséklet 1 h-nál, °C	37	36,99	36,99
Eltérés, %	N/A	0,0270	0,0270

A szintén konstrukciós jellemzőnek számító beépített hőcserélő hőátadási tényező és felület paraméterek azonos módon (0,027%) befolyásolták a fűtési kísérlet után kialakult fűtőlaphőmérsékletet.

4.3. Paraméter identifikáció, modellek validálása

A fizikai alapon nyugvó modelleket miután felállítottam őket, paraméteridentifikációnak vettem alá, hogy azok viselkedése kellő pontossággal, 5 %-on belül megközelítse a valóságot. A paraméteridentifikációt minimumkeresési algoritmussal hajtottam végre, ahol egyszerre egy

paramétert kerestem egy célfüggvény alapján. A nemlineáris rendszerek jellemzésére az irodalomban ugyan használnak lineáris regressziót, de mivel az iparban fűtés esetén hőmérsékleteltérés százalékos értékét alkalmazzák, így a célértékfüggvényem a teljes mérési időtartamra nézve a mért és szimulált értékek közt tapasztalható maximális eltérést veszi figyelembe, százalékos formában.

A célértékfüggvény a következő:

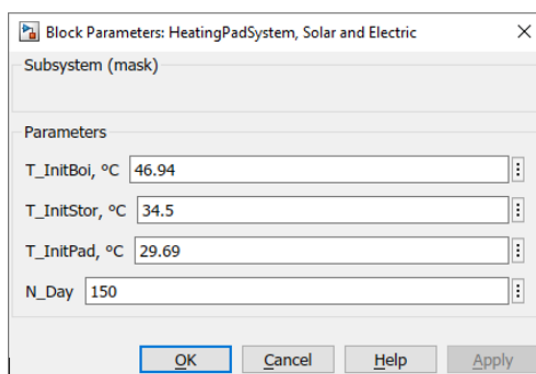
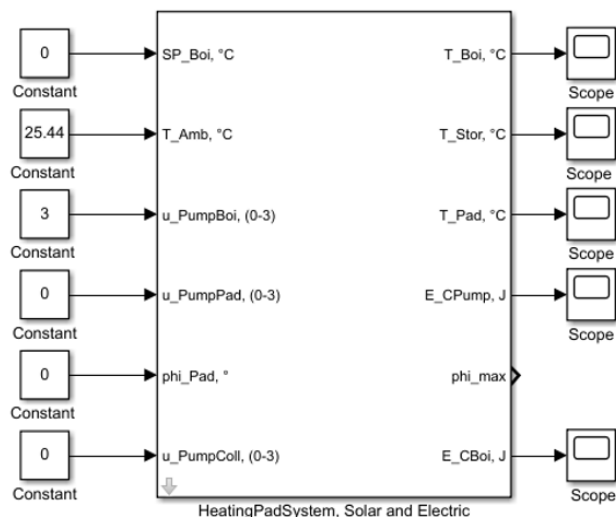
$$J_{\varepsilon max}(p_1, p_2, \dots, p_j) = \frac{\max |(\check{y}(k) - \hat{y}(k, p_1, p_2, \dots, p_j))|}{\max |(\check{y}(k))|} \cdot 100, \% \quad (4.24)$$

Melyet minimumkeresési eljárásnak vetek alá úgy, hogy a vizsgált modell paramétereit úgy változtatom, hogy a célfüggvény értéke minimális legyen.

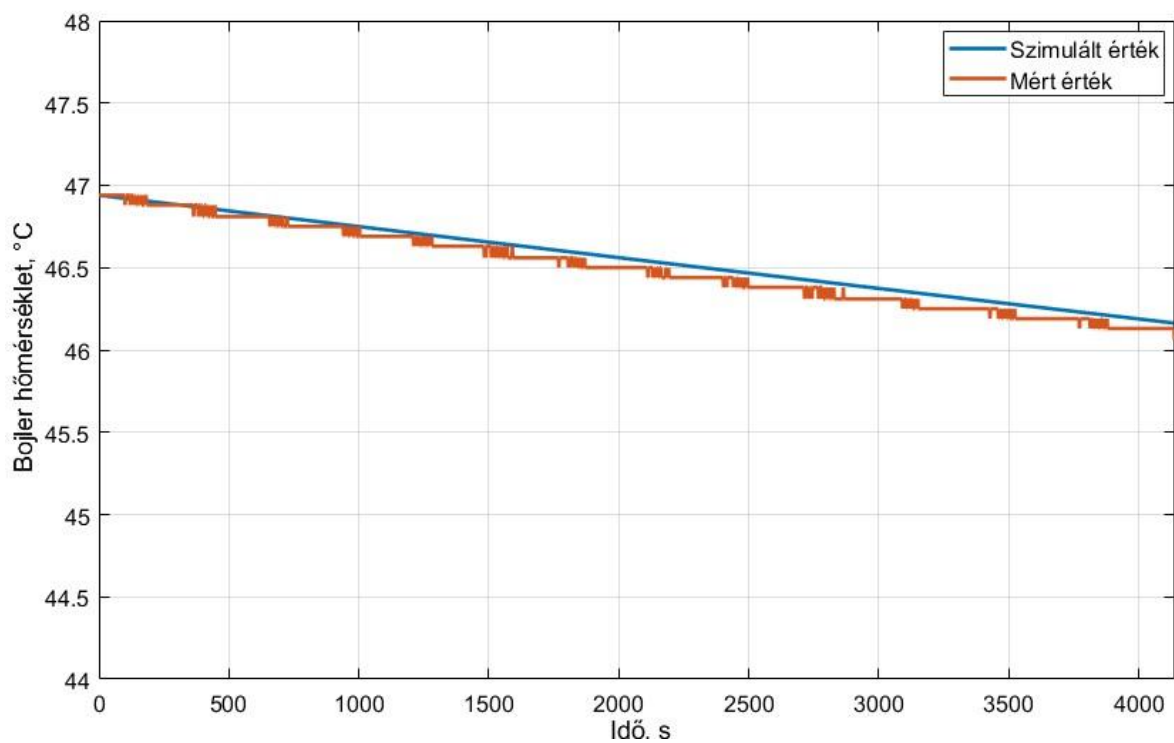
$$\min_{p_1, p_2, \dots, p_j} J_{\varepsilon max}(p_1, p_2, \dots, p_j) \rightarrow p_1, p_2, \dots, p_j. \quad (4.25)$$

4.3.1. A boiler és a környezet közti hőátadási tényező paraméter identifikációja

A boiler és a környezete közti hőátadási tényezőt mérések alapján az előbbi módszer alapján állapítottam meg. A boiler felmelegítettem, majd kikapcsoltam a fűtését és mérni kezdtem a hőmérséklet esést. A mérést egy óra nyolc percen keresztül végeztem, a környezeti hőmérséklet mérése mellett. A kiindulási és környezeti adatokat betápláltam a modellembe (4.67. ábra), majd a hőátadási paraméter változtatásával a MATLAB fminsearch minimum kereső függvénnyel megkerestem, milyen hőátadási tényező mellett közelíti meg a modellem a valóságot. Ezután megjelenítettem a szimulált és valós mérésekből származó adatokat (4.68. ábra).



4.67. ábra A kísérleti összeállítás



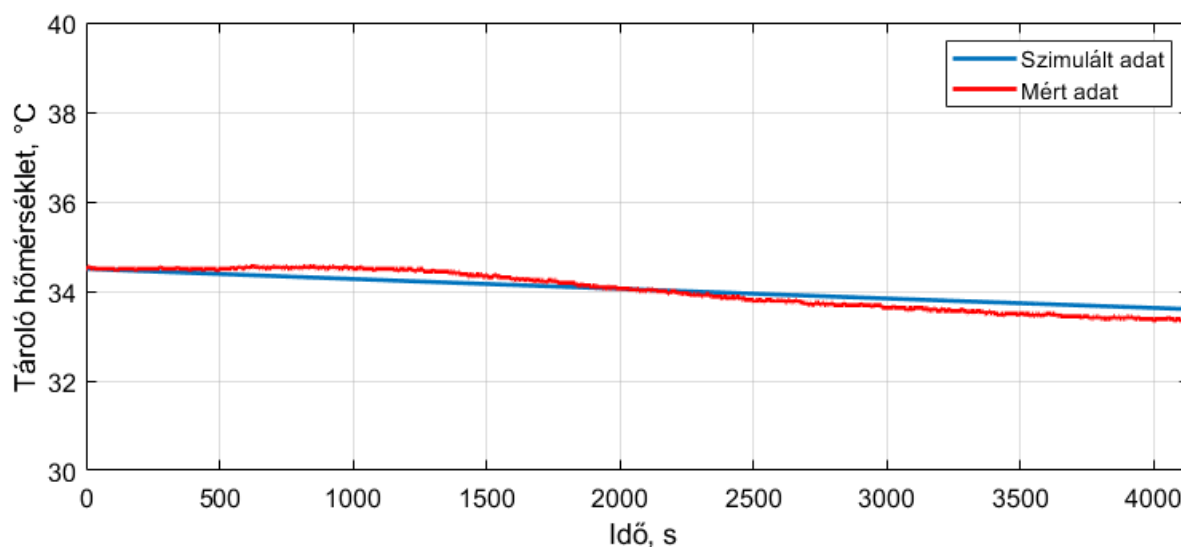
4.68. ábra A mért és szimulált értékek összehasonlítása identifikáció után

Az identifikált hőátviteli paraméter: $\kappa_{Boi2Amb} = 1,634 \frac{W}{m^2K}$.

A modellidentifikáció eredményeként a hiba a szimulált és mért eredmény közt: 0,1741%.

4.3.2. A tároló és a környezet közti hőátadási tényező paraméter identifikációja

A hőtároló és a környezete közti hőátadási tényezőt mérések alapján az előbbi módszer alapján állapítottam meg. A tárolót felmelegítettem, majd kikapcsoltam a fűtését és mérni kezdtem a hőmérséklet esést. A mérést egy óra nyolc percen keresztül végeztem, a környezeti hőmérséklet mérése mellett. A kiindulási és környezeti adatokat betápláltam a modellembe (4.67. ábra), majd a hőátadási paraméter változtatásával a MATLAB fminsearch minimum kereső függvénnyel megkerestem, milyen hőátadási tényező mellett közelíti meg a modellem a valóságot. Ezután megjelenítettem a szimulált és valós mérésekből származó adatokat (4.69. ábra).



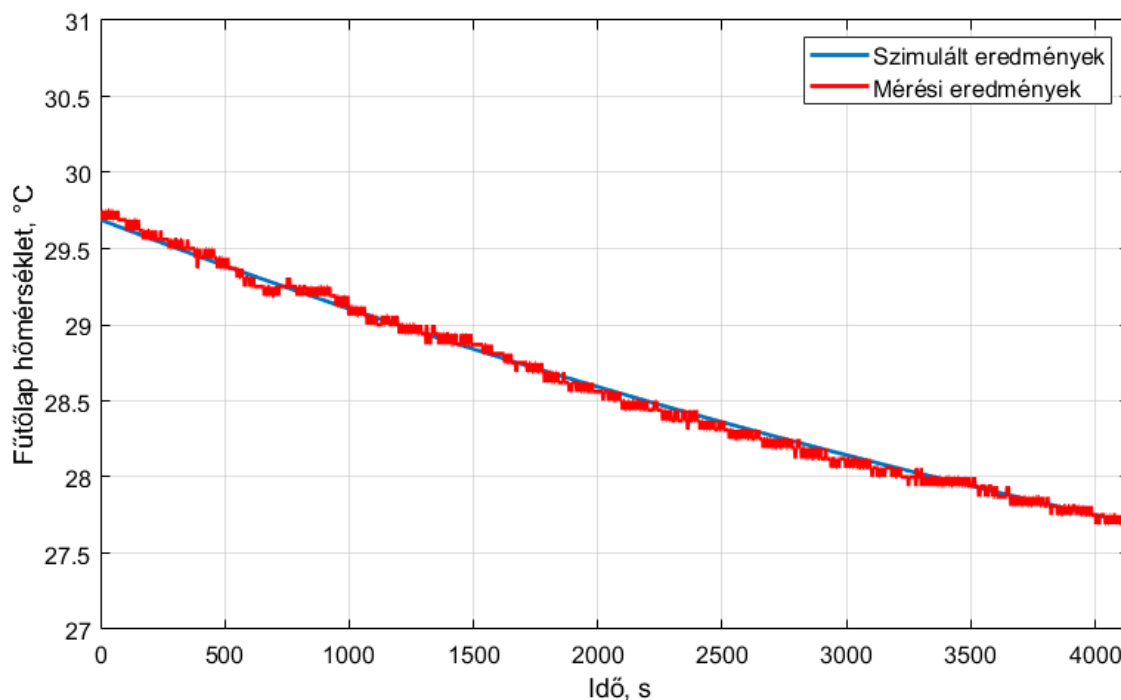
4.69. ábra A hőtároló hűlése

Az identifikált hőátviteli paraméter: $\kappa_{Stor2Amb} = 6,495 \frac{W}{m^2K}$.

A modellidentifikáció eredményeként a hiba a szimulált és mért eredmény közt: 0,923%.

4.3.3. A fűtőlappal és a környezet közti hőátadási tényező paraméter identifikációja

A fűtőlappal hőátadási tényezőjénél ugyanúgy jártam el, mint az előbbi esetekben. A szimuláció bemeneti paramétereit a 4.67. ábra mutatja, míg az identifikált paraméterrel történt futtatást a 4.70. ábra.



4.70. ábra A fűtőlap hűlése

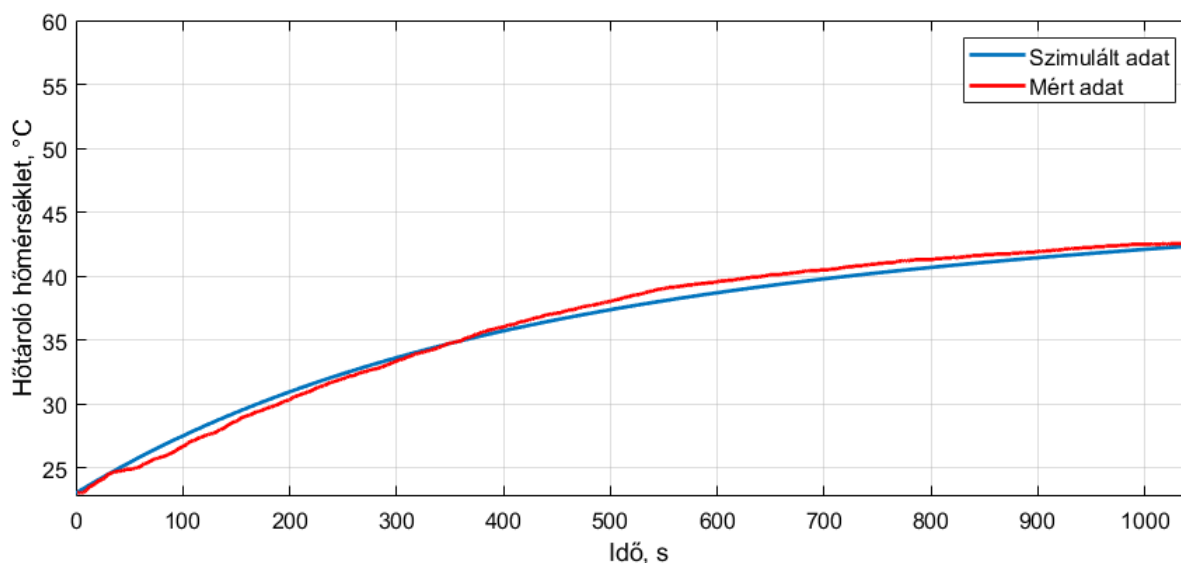
Az identifikált hőátviteli paraméter: $\kappa_{Pad2Amb} = 14,163 \frac{W}{m^2 K}$.

A modellidentifikáció eredményeként a hiba a szimulált és mért eredmény közt: 0,3815%.

4.3.4. Hőcserélő bordáscső hőátadási tényezőjének paraméter identifikációja

Az eljárás megegyezett a fent leírtakkal, azzal a különbséggel, hogy a hőtárolóba helyezett hőcserélőn mind a mérés, mind a szimulációs kísérlet során áramoltattam a folyadékot. A szimulációban alkalmazott térfogatáram, illetve a hőcserélőbe belépő folyadék hőmérsékletét mérések alapján állítottam be.

Az identifikálásra használt mért és számított adatokat a 4.71. ábra mutatja be.



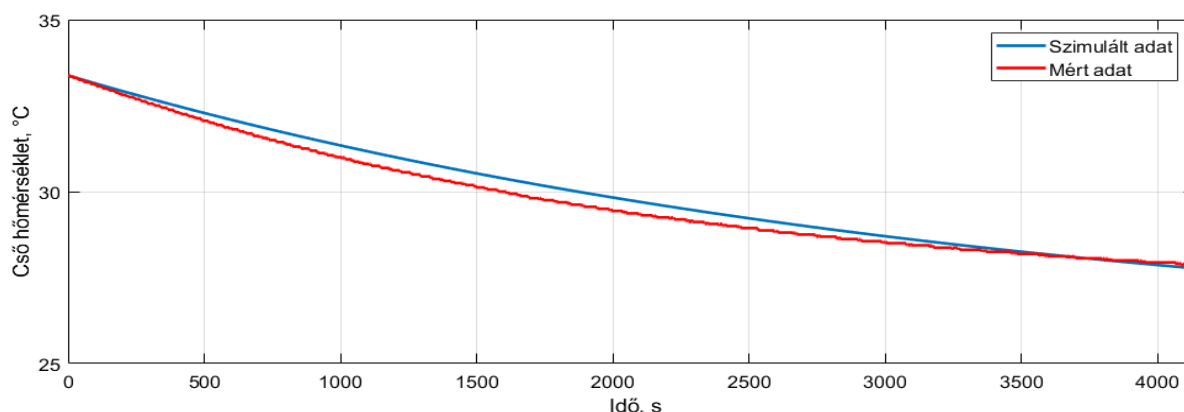
4.71. ábra A hőcserélő hőátzármaztatási paraméterének identifikálásához használt adatok

Az identifikált hőátviteli paraméter: $\kappa_{ex} = 1248,15 \frac{W}{m^2 K}$.

A modellidentifikáció eredményeként a hiba a szimulált és mért eredmény közt: 2,3486%.

4.3.5. A csövek hőátadási tényezőjének paraméter identifikációja

A csövekben elhelyezett hőmérők segítségével az előbbi módszer alapján végeztem a hőátadási paraméter identifikációját (lásd 4.72. ábra). A kísérletben polietilén anyagú, zártcellás, nylonfólia-kasírozott védőcsőhéjjal ellátott csővezetékek kerültek felhasználásra.



4.72. ábra A cső hőátadási tényezőjének identifikálására használt adatok

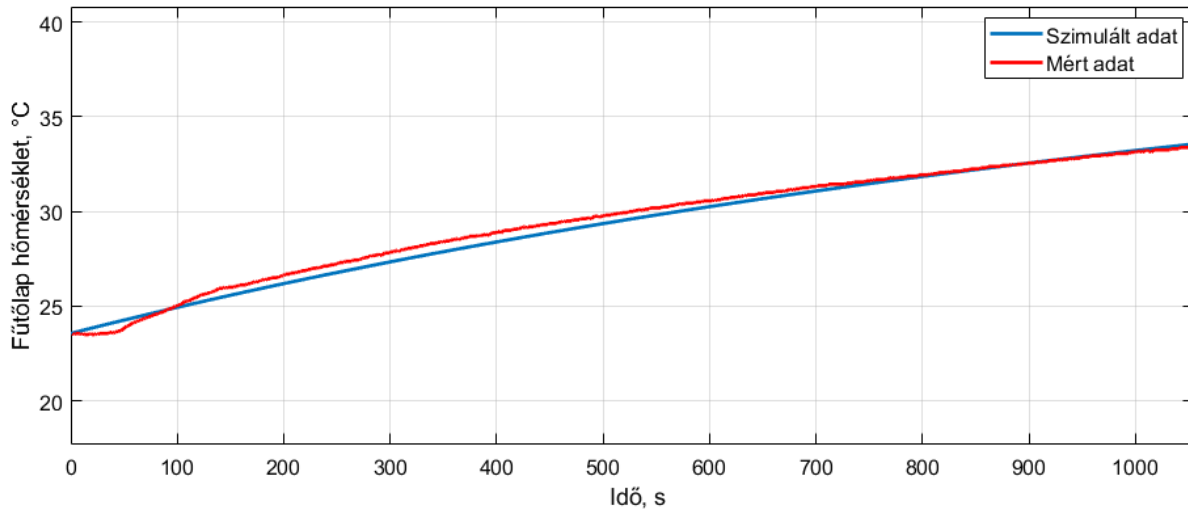
Az identifikált paraméter: $\kappa_{Pipe2Amb} = 3,015 \frac{W}{m^2 K}$.

A modellidentifikáció eredményeként a hiba a szimulált és mért eredmény közt: 1,3906%.

4.3.6. Modellek validálása

Mivel a teljes rendszer működésének eredménye a fűtőlap melegedése, így a validálás céljára a fűtőlap melegedésének vizsgálatát választottam a teljes rendszer egyidejű működtetése mellett.

A validálást egy felfűtési mérés alapján végeztem el, ahol a paraméteridentifikációnál használt mérési adatokhoz képest más kiindulási hőmérsékletekről és más környezeti hőmérséklet mellett végzett mérés alapján vizsgáltam a fűtőlap melegedését. A mérés során mind a bojler, mind a hőtároló, valamint a fűtőlap is folyamatos fűtés alatt állt, így az egész rendszer validálását egy menetben végeztem el. A mért adatok, valamint az identifikált modellek együttműködésének eredményét a 4.73. ábra mutatja be.



4.73. ábra A validálásra alkalmazott adatsorok összehasonlítása

A modellidentifikáció eredményeként a hiba a szimulált és mért eredmény közt: 1,7204%, mely elegendően alacsony érték ahhoz, hogy a modellt identifikáltnak és validáltnak, következésképp szimulációs kísérletek elvégzésére alkalmasnak ítéljem.

4.4. Új, energiafelhasználást is figyelembe vevő célértékfüggvény

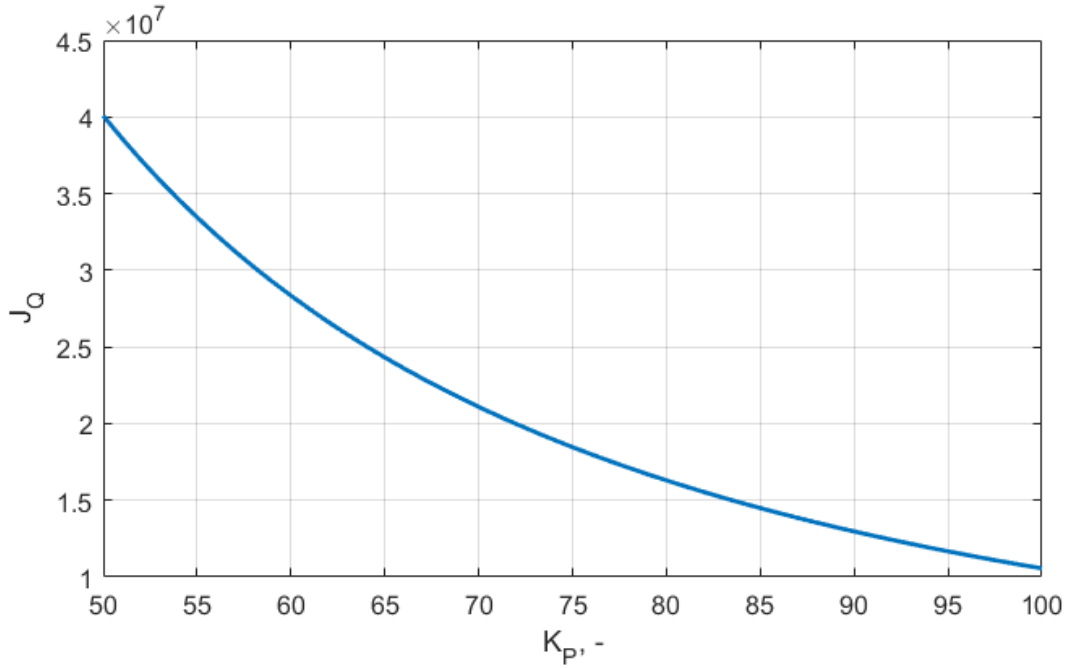
A szabályozás minőségi jellemzőjének optimalizálására szolgáló célértékfüggvény a következő:

$$J_Q(p_1, p_2, \dots, p_j) = \int_{\tau_0}^{\tau_1} \left(SP(\tau) - PV(\tau, p_1, p_2, \dots, p_j) \right)^2 d\tau. \quad (4.26)$$

Példaként egy arányos szabályozást alkalmazó fűtési rendszer célértékkeresésének eredményét mutatom be, ahol a célérték állandó, a keresett optimális paraméter az arányos erősítési tényező (K_p) értéke volt:

$$J_Q(K_p) = \int_0^{\tau_1} \left(SP - PV(\tau, K_p) \right)^2 d\tau \quad (4.27)$$

A 4.74. ábra mutatja a minimumkeresésnél figyelembe vett, $50 \leq K_p \leq 100$ tartományon kirajzolt paramétersíkot, ahol a függőleges tengelyen a célfüggvény által adott eredmény olvasható egy éves időtartamra végzett szimuláció esetén.



4.74. ábra J_0 paramétersíkja

A minimumkeresési eljárás $50 \leq K_p \leq 100$ közt lett végrehajtva, várakozásainknak megfelelően, ha csak a szabályozás hibájának csökkentése a kritérium, a magasabb arányos erősítési tényező, jobb, alacsonyabb hibaértéket ad. Ez praktikus azt jelenti, hogy ha a szabályozó célérték közelében tartja a hőmérsékletet, az energiafelhasználás terhére.

A numerikus optimalizálás eredménye: $K_p = 100$, hiszen csak eddig vizsgáltam a paramétertartományt.

A céloom azonban az energiafelhasználást is figyelembe vevő célértékfüggvény meghatározása, hiszen végtelen energiával elméletben tökéletes szabályozót lehetne létrehozni.

Az energiafelhasználást vizsgáló tag tehát a következő:

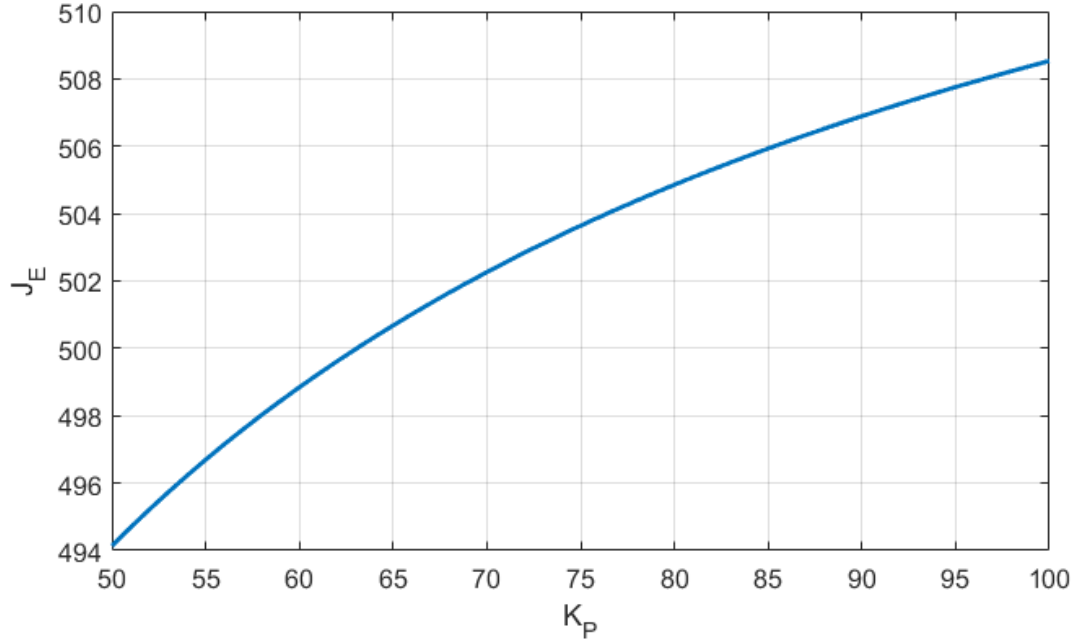
$$J_E(p_1, \dots, p_j) = \int_{\tau_0}^{\tau_1} E_C(\tau, p_1, \dots, p_j) d\tau \quad (4.28)$$

Önmagában ez az összefüggés is tévútra vezet, hiszen, ha csak az energiafelhasználás minimalizálása a cél, a célértékkeresés eredményeként egy olyan rendszert kapunk, mely nem avatkozik be, így valóban gyakorlatilag nulla energiafelhasználással működik.

Példa erre ugyanezen fűtési megoldás energiafelhasználásra optimalizálva, állandó alapjel esetén. A keresett paraméter ezesetben is az arányos erősítési tényező értéke volt:

$$J_E(K_p) = \int_0^{\tau_1} E_C(\tau, K_p) d\tau \quad (4.29)$$

A 4.75. ábra mutatja be a minimumkeresésnél figyelembe vett, $50 \leq K_p \leq 100$ tartományon kirajzolt paramétersík alakulását, ahol a függőleges tengelyen a célfüggvény által adott eredmény látható egy éves időtartamra végzett szimuláció esetén.



4.75. ábra J_E paramétersíkja

A minimumkeresési eljárás a K_p 50 és 100 közti tartományon lett végrehajtva, várakozásainknak megfelelően, ha csak az energiafelhasználás csökkentése a kritérium, a kisebb arányos erősítési tényező, jobb alacsonyabb hibaértéket ad. Ez praktikus azt jelenti, hogy ha az arányos erősítési tényező kellően kis mértékű, a rendszer sosem fog érdemben fűtéssel beavatkozni.

A numerikus optimalizálás eredménye: $K_p = 50$, hiszen csak eddig ábrázoltam a paramétertartományt.

Kell legyen viszont egy optimális kompromisszum, mely a lehető legkisebb energiafelhasználás árán képes a rendszer szabályozott jellemzőjét nagy pontossággal a célérték szűk környezetében tartani. A megoldás egy kombinált célértékfüggvény megalkotása volt, mely súlyozottan képes figyelembe venni az energiafelhasználást és minőségi jellemzőket egyaránt.

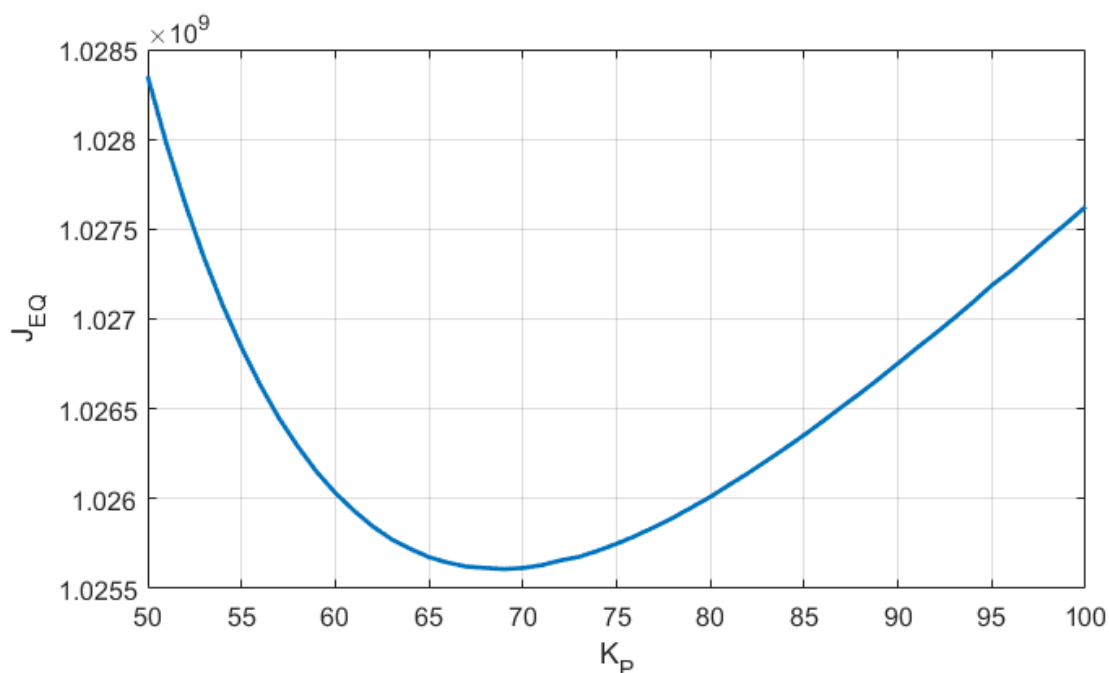
$$J_{EQ}(p_1, \dots, p_j) = \omega_1 \int_{\tau_0}^{\tau_1} E_C(\tau, p_1, \dots, p_j) d\tau + \omega_2 \int_{\tau_0}^{\tau_1} (SP(\tau) - PV(\tau, p_1, \dots, p_j))^2 d\tau \quad (4.30)$$

Erre az optimumkeresési feladatra ismételten ugyanazon fűtési rendszert hozom példának, mint az előbbi két esetben, ahol az alapjel állandó, a keresett paraméter ugyancsak az arányos tag átviteli tényezőjének (K_p) értéke volt.

$$J_{EQ}(K_p) = \omega_1 \int_0^{\tau_1} E_C(\tau, K_p) d\tau + \omega_2 \int_0^{\tau_1} (SP - PV(\tau, K_p))^2 d\tau \quad (4.31)$$

Az ω_1 és ω_2 értékeket úgy kell megválasztani, hogy a felhasznált energiával és a minőségi jellemzőt adó részek numerikus eredményei nagyságrendileg egybeessenek, illetve attól függően, mire fektetünk hangsúlyt, az energiafelhasználásra, vagy a pontos szabályozásra. A példában bemutatott paraméterek: $\omega_1 = 2 \cdot 10^6$, $\omega_2 = 1$.

A 4.76. esetben a minimumkeresésnél figyelembe vett, $50 \leq K_p \leq 100$ tartományon kirajzolt paramétertartomány látható, ahol a függőleges tengelyen a célfüggvény által adott eredmény látható egy éves időtartamra végzett szimuláció esetén.



4.76. ábra J_{EQ} paramétersíkja

Amennyiben a szabályozás minőségi jellemzőit is figyelembe vevő célfüggvényt alkalmaztam, látható módon van egy optimumpont, ahol a szabályozás minőségi jellemzői és az energiafelhasználás is megfelelő. A paramétertartomány ábrázolását egyes lépésközzel létrehozott K_p vektorral végeztem, így a minimumkeresési algoritmust az így kapott görbe minimumpontjáról, azaz a 69-es értékről indítottam.

A numerikus optimalizálás eredménye: $K_p = 69,656$.

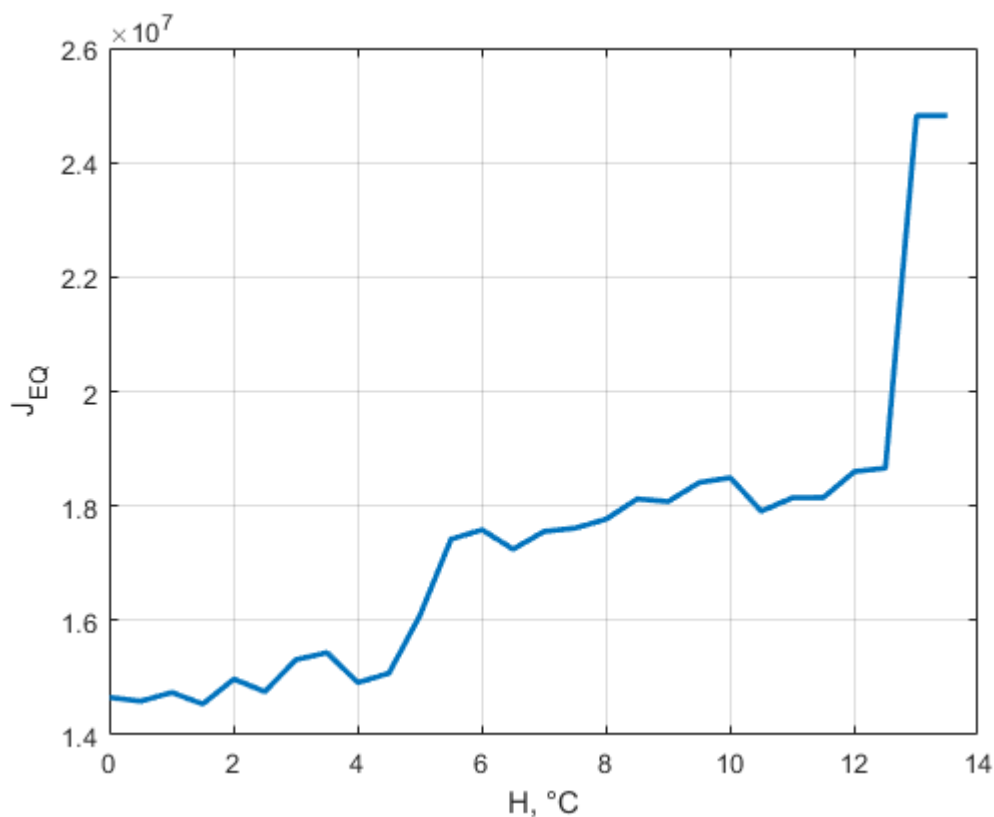
4.5. Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének kétállású szabályozása

Az összehasonlíthatóság érdekében minden szabályozóalgoritmust egységesen optimalizáltam.

A szimulációs kísérleteket a Pest megyei időjárási adatok alapján identifikált időjárási modell segítségével futtattam.

Az előzetes futtatások alapján a kritériumfüggvény paramétereit annak érdekében, hogy a minőségi jellemzők és az energiafogyasztás azonos nagyságrendbe kerüljenek a 4.28 egyenletben lévő paramétereket $\omega_1 = 1 \cdot 10^4$ és $\omega_2 = 1$ -re választottam. Az kétállású szabályozónál az optimalizálandó paraméter a szabályozó ki- és bekapcsolási hőmérséklet különbségét adó hiszterézis értéke. Az optimális hiszterézis értékének meghatározására először felvettem a szabályozó paramétertartományát, amint azt a 4.77. ábra mutatja. A paramétersík által meghatározott optimumpontról (1,51 °C) indított minimumkeresés eredményeként a hiszterézist 1,59 °C-ra választottam.

A szimulációt, illetve a minimumkeresés lépéseit fix, 1 s időközzel, egy május 30-ai napra futtattam le. A szimuláció időtartama 24 óra. A megoldáshoz, az ode4 numerikus megoldási algoritmust alkalmaztam.

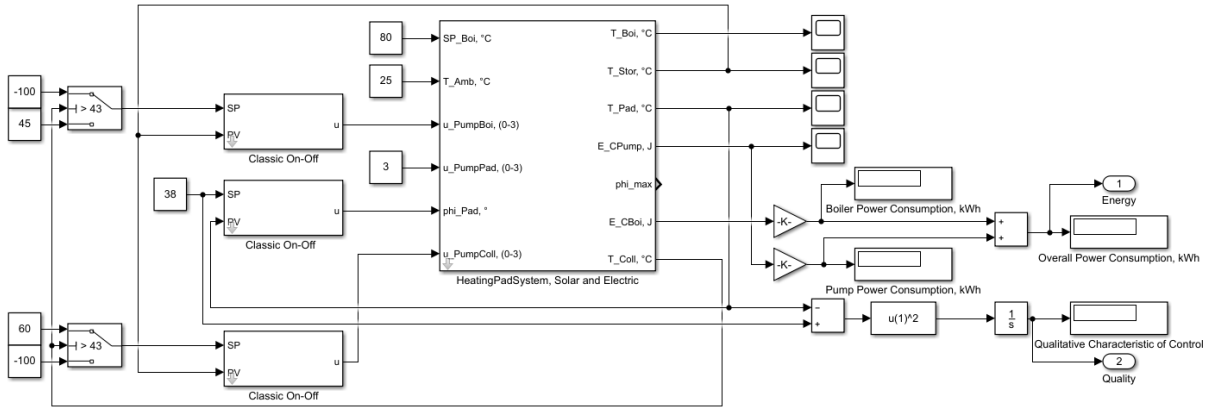


4.77. ábra Histerézissel kiegészített kétállású szabályozás paramétersíkja

Az ábrán megfigyelhető az erős folytonossági hiba. Ennek oka, hogy a rendszert alkotó elemek, így a napkollektor szivattyújának vezérlése, a bojler és a hőtároló hőmérséklet-szabályozása, valamint a napkollektorból érkező hőmérséklet is változik, mely tényezők hatással vannak a fűtőlap szabályozására.

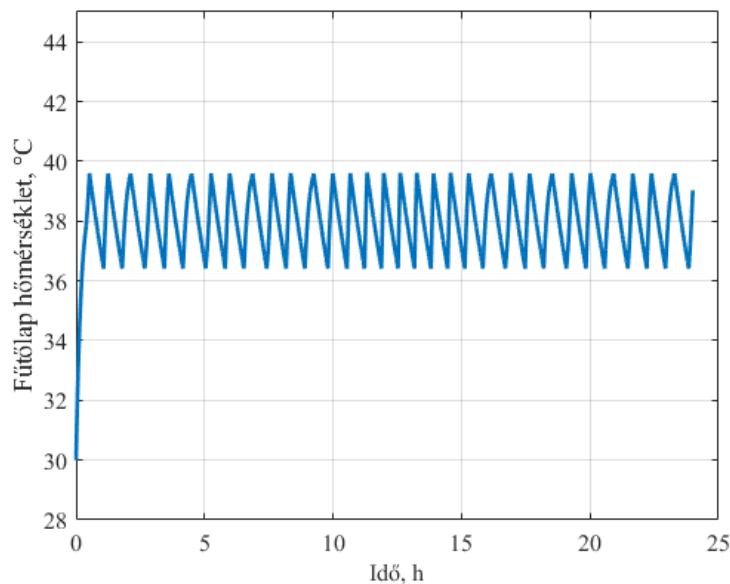
4.5.1. Vizsgálat optimális histerézissel, fojtószelep nyitással/zárással

Elsőként a gyakorlatban ritkábban használt megoldást vizsgáltam, ahol a felhasználó köri szivattyú folyamatosan üzemel, a fűtőlap hőmérséklet szabályozást a gömbcsap kinyitásával és elzárásával valósítom meg (4.78. ábra). A sertéstartásban ez a megoldás is használatos, amennyiben többkörös rendszerről beszélünk. A fűtőlap hőmérséklet kétállású szabályozása időben állandó 38 °C-os alapjelre történt, a histerézis értéke a 4.4. fejezet alapján 1,59 °C volt. A környezeti hőmérsékletet állandó 25 °C-ra a szivattyú teljesítményfokozatát konstans 3-ra míg a fűtőlap kiindulási hőmérsékletét 30 °C-ra állítottam.



4.78. ábra A fűtőlap hőmérséklet fojtószeleppel történő kétállású szabályozása

A 4.79. ábra mutatja a szabályozott jellemző, a fűtőlap hőmérséklet időbeli változását. Az kétállású szabályozókra jellemző módon a célérték körüli lengések tapasztalhatóak, melyek ugyan a gyakorlatban megengedettek, de a hőingadozás az állat stresszérzetére hátrányos hatással van.



4.79. ábra A fűtőlap hőmérséklet kétállású szabályozása fojtószelep nyitással/zárással

A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 8,814 \cdot 10^4$.

Szabályozás napi energiafelhasználása: 14,32 kWh.

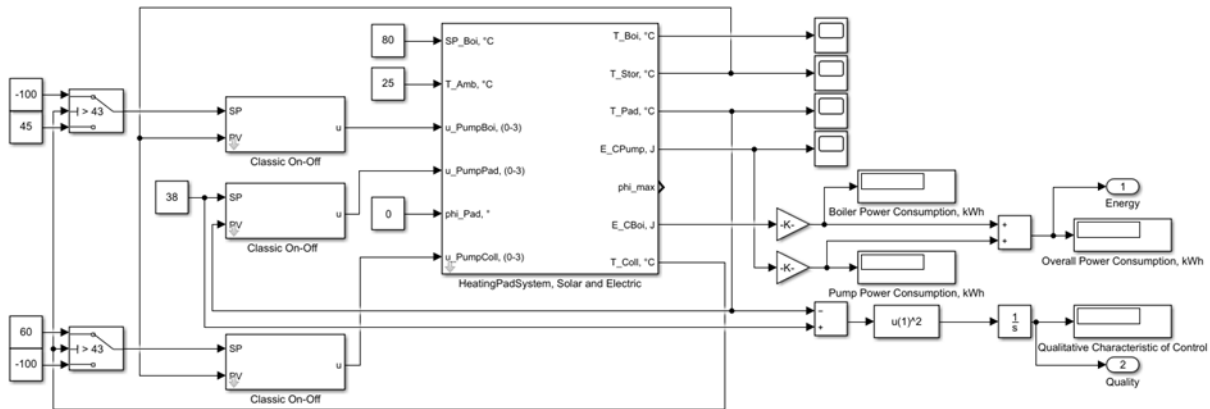
A szabályozás összesített jósági tényezője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 2,313 \cdot 10^5$.

4.5.2. Vizsgálat optimális hiszterézissel, szivattyú ki-/bekapcsolással

A másik, gyakrabban alkalmazott megoldás sertéstartásban, az istálló fűtőlapjainak együttes, szivattyúval történő szabályozása. A szabályozás időben állandó 38 °C-os alapjelre történt, a hiszterézis értéke a 4.4. fejezet alapján 1,59 °C volt. A környezeti hőmérsékletet állandó 25 °C-ra a fojtószelep állását a teljesen nyitott állapothoz tartozó konstans 0°-ra míg a fűtőlap kiindulási hőmérsékletét 30 °C-ra állítottam. A szabályozó kimenete kikapcsolt állapotban 0

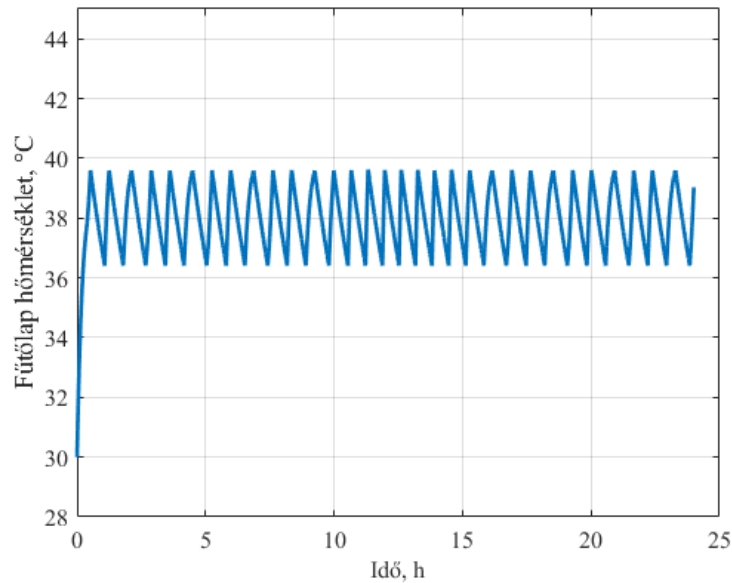
míg bekapcsolt állapotban 3 volt, vagy is a szivattyú bekapcsolt állapotban 3-as szállítási teljesítmény fokozatban működött.

A megoldást a 4.80. ábra mutatja.



4.80. ábra A fűtőlap hőmérséklet szivattyúval történő kétállású szabályozása

A szabályozás jellege megegyezik a fojtószeleppel történt szabályozásával (lásd 4.79. ábra és 4.81. ábra), de az energiafelhasználás elmarad attól.



4.81. ábra Fűtőlap hőmérséklet szivattyúval történő kétállású szabályozása

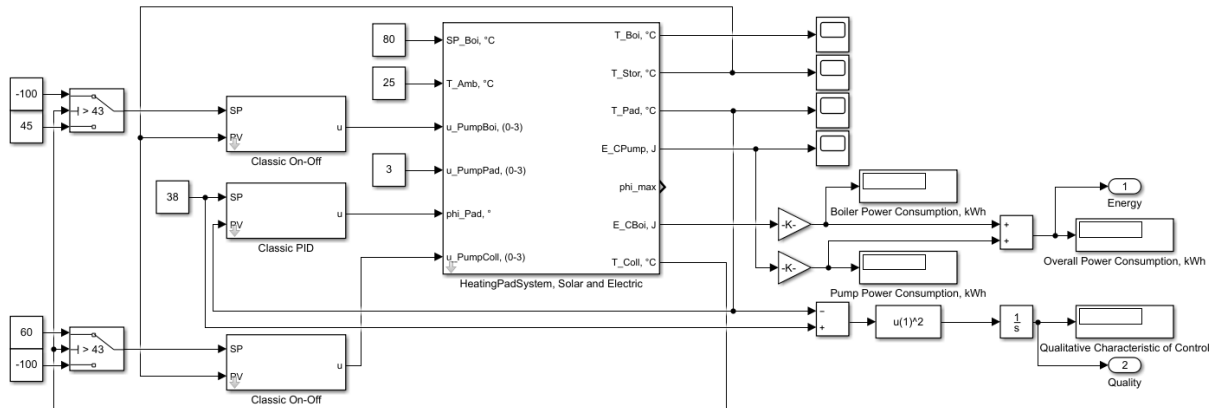
A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 8,814 \cdot 10^4$.

Szabályozás napi energiafelhasználása: 12,3 kWh.

A szabályozás összesített jósági tényezője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 2,111 \cdot 10^5$.

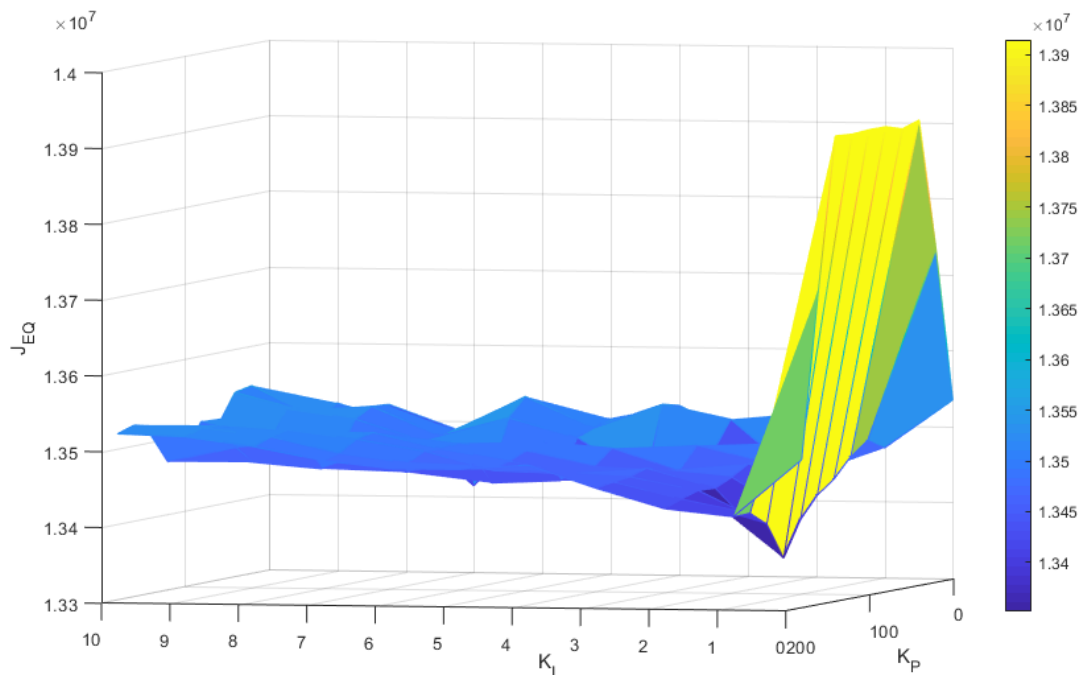
4.6. Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének PID szabályozása

A kísérleti összeállítást a 4.82. ábra mutatja.



4.82. ábra Fűtőlap hőmérséklet szabályozás klasszikus PID szabályozóval fojtószelep állítással

Az optimális arányos és integráló erősítési tényező értékeinek meghatározására először felvettem a szabályozó paraméterterét, amint azt a 4.83. ábra mutatja. A deriváló tag alkalmazása esetemben nem volt szükséges a rendszer lassú dinamikájának köszönhetően ($D=0$). A döntésemet előzetes modellkísérletek is megerősítették. A paraméterter által meghatározott optimumpontról ($P = 121$, $I = 1$) indított minimumkeresés eredményeként a proporcionális és integráló tagok erősítési tényezőjét $P = 129,903$ és $I = 1,028$ -ra választottam.



4.83. ábra A PI szabályozó paramétertere

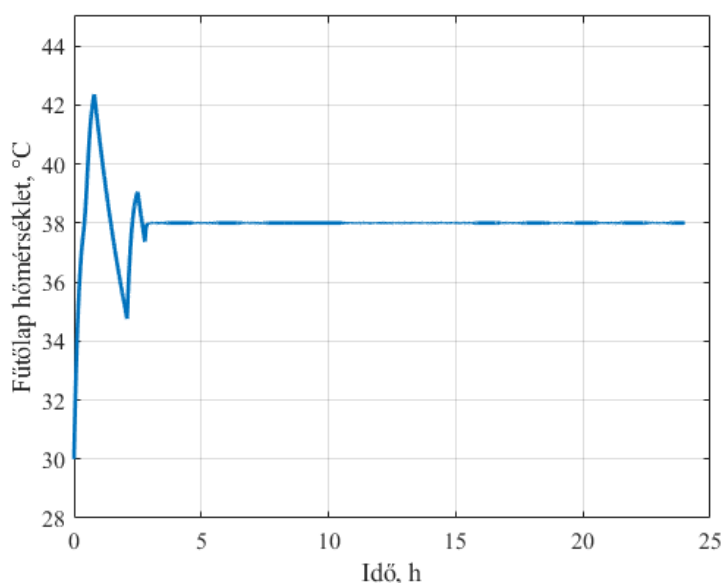
4.6.1. Fűtőlap hőmérsékletszabályozása PI szabályozóval, beavatkozó: fojtószelep

Mivel a szivattyú esetében nem volt felszerelve fordulatszám-szabályozással, csak egy háromállású kapcsolóval, három teljesítményszint eléréséhez, így a folytonos szabályozást csak a fojtószelep állításával valósítottam meg. A gömbcsapot, mint fojtószelepet így nem csak a

teljesen zárt, vagy nyitott, de a köztes állapotok felvételére is használtam. A szabályozás időben állandó 38 °C-os alapjelre történt, a környezeti hőmérsékletet állandó 25 °C-ra, a szivattyú teljesítményfokozatát konstans 3-ra, míg a fűtőlap kiindulási hőmérsékletét 30 °C-ra állítottam.

A tökéletes, csak a szivattyút, mint beavatkozót használó folytonos szabályozás a gyakorlatban egyébként sem valósítható meg, hisz a gyakorlatban a keringtetőszivattyúk villanymotorja jellemzően egy-, vagy háromfázisú aszinkronmotor, melyek tekercsei a névleges frekvencia felénél alacsonyabb értéken nem használhatóak az induktivitások reaktanciájának frekvenciafüggősége okán. A névleges frekvencia alatt működtetett indukciós motorok esetében szükséges lecsökkenteni a működtető feszültséget, valamint kiegészítő kényszerhűtést alkalmazni.

A szimuláció során a felfűtési szakaszban tapasztalható túllendülés, illetve lengés is, ahogy azt a 4.84. ábra mutatja.



4.84. ábra Fojtószelepet állító klasszikus PI szabályozás túllendüléssel

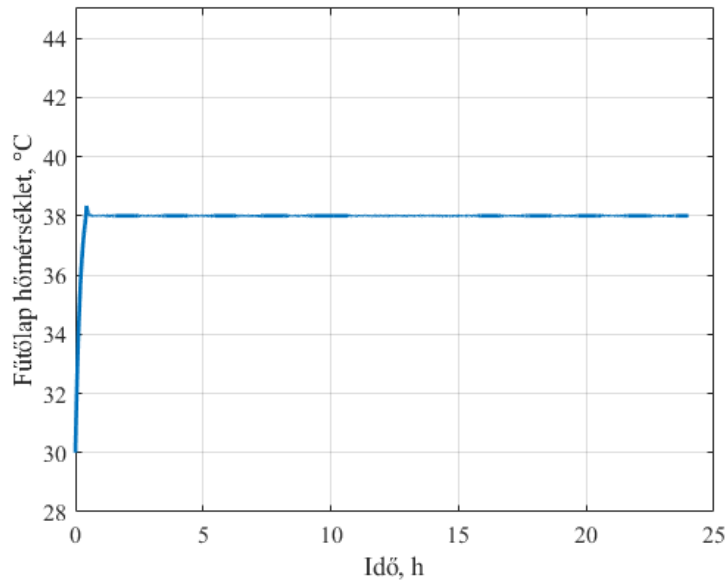
A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 4,948 \cdot 10^4$.

Szabályozás napi energiafelhasználása: 15,08 kWh.

A szabályozás összesített jósági tényezője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 2,002 \cdot 10^5$.

4.6.2. PI szabályozó „anti-windup” kompenzálással kiegészítve

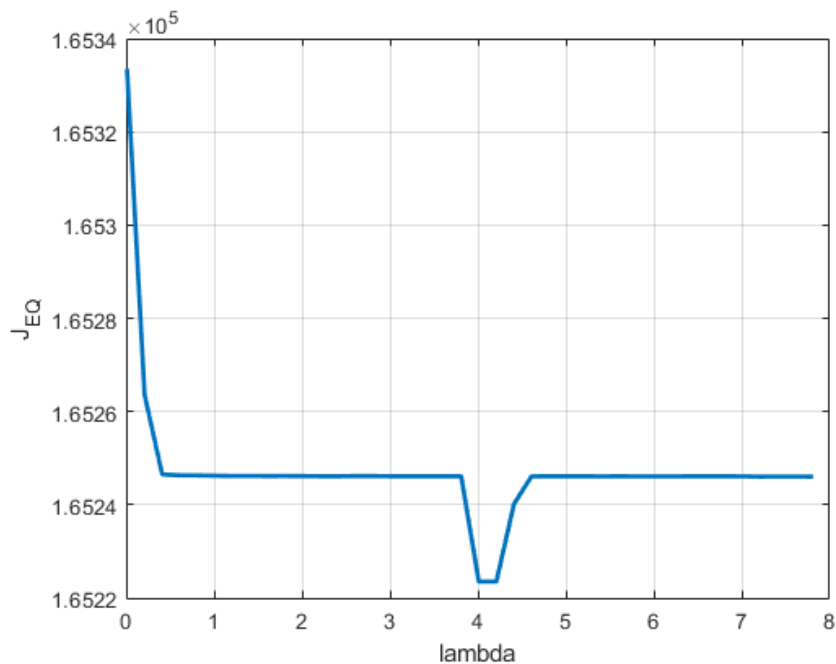
A 4.81. ábra szerinti fűtőlap hőmérséklet szabályozást fojtószelep állítással végző PI szabályozót anti-windup kompenzálással kiegészítve a túllendülés szignifikánsan csökkenthető (4.85. ábra), ezáltal a szabályozás minőségi jellemzői is szignifikánsan javulnak.



4.85. ábra Az „anti-windup” kompenzálás hatása a fojtószelep állítást végző PI szabályozóra
A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 1,499 \cdot 10^4$.
Szabályozás napi energiafelhasználása: 15,05 kWh.
A szabályozás összesített jósági tényezője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 1,655 \cdot 10^5$.

4.7. Folyadék munkaközegű fűtőlapp hőmérsékletének csúszómód szabályozása

Az optimális csúszóegyenest meredekség meghatározására először felvettem a szabályozó paramétertartományát, amint azt a 4.86. ábra mutatja. A paramétersík által meghatározott optimumpontról ($\lambda = 4$) indított minimumkeresés eredményeként az egyenes meredekségét meghatározó λ tényezőt 4,01 értékre választottam.

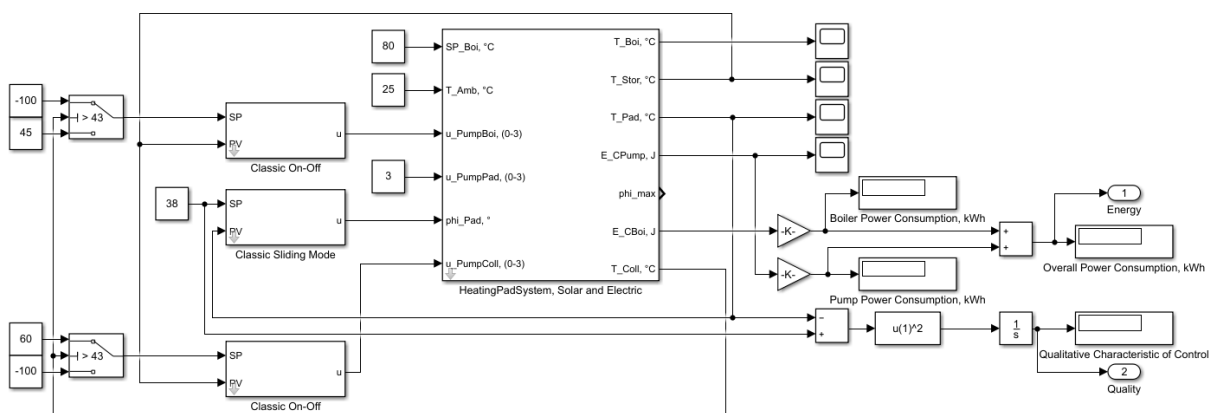


4.86. ábra A kismértékben módosított csúszómód-szabályozó paramétersíkja

4.7.1. Csúszómód szabályozás, fojtószelep nyitással/zárással

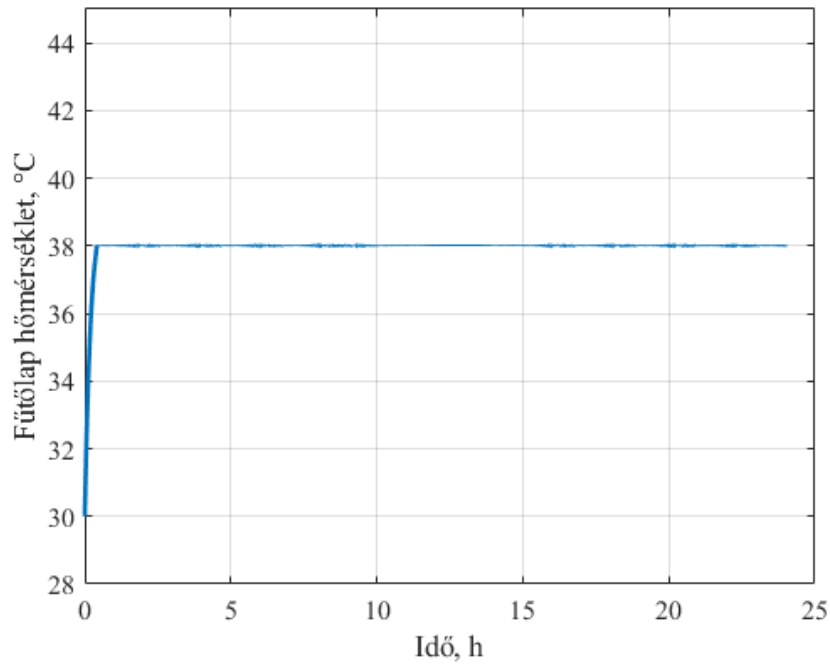
A következő modellkísérlet a behangolt csúszómód-szabályozóval történő szimuláció volt, ahol az általam kissé módosított és így jobb eredményeket adó csúszómód-szabályozó algoritmust alkalmaztam. A 4.87. ábra mutatja a kísérleti elrendezést.

A szabályozó kimenete a fojtószelep teljes nyitásához tartozó 0° vagy a teljes zárashoz tartozó $77,36^\circ$ valamelyike lehet. A nyitás és zárás között lévő átmeneti állapotokat a modellben elhanyagoltam. A fűtőlap hőszállítóközeg tömegáramot módosító beavatkozó szervnek, a fojtószelepnek csak két állása lehet, teljesen nyitott, vagy teljesen zárt. A szabályozás időben állandó 38°C -os alapjelre történt, a csúszóegyenes meredekségét meghatározó lambda tényezőt $4,01$ értékre választottam, a környezeti hőmérsékletet állandó 25°C -ra a szivattyú teljesítményfokozatát konstans, a maximális értéket jelentő 3-ra míg a fűtőlap kiindulási hőmérsékletét 30°C -ra állítottam.



4.87. ábra A fűtőlap hőmérséklet csúszómód szabályozása a fojtószelep kétállású, nyitott és zárt működtetésével

A 4.88. ábra mutatja a szimuláció eredményét. Jól látható módon a szabályozás minősége majdnem megegyezik a 4.5.3. alfejezetben bemutatott fojtószelep állítást végző „anti-windup” kompenzálással ellátott PI szabályozó és a szivattyú folyadékszállítási fokozat szabályozással kombinált szabályozással, viszont energiafogyasztása magasabb az említettnél.



4.88. ábra Fűtőlap hőmérséklet a fojtószelep kétállású, nyitott és zárt működtetésével csúszómód-szabályozóval

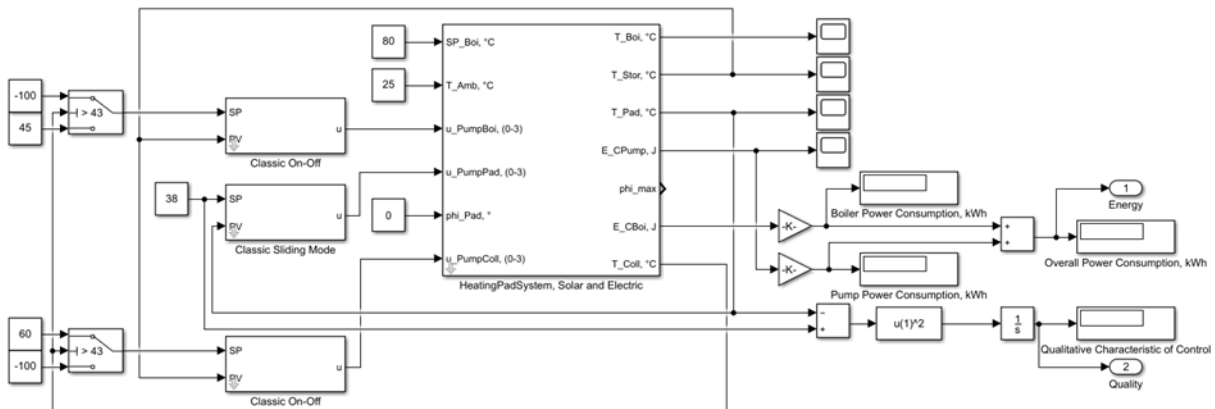
A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 1,499 \cdot 10^4$.

Szabályozás napi energiafelhasználása: 14,29 kWh.

A szabályozás minőségi jellemzője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 1,579 \cdot 10^5$.

4.7.2. Csúszómód szabályozás, szivattyú ki-/bekapcsolásával

A csúszómód-szabályozó szivattyú szabályozással történő használatát a 4.89. ábra szemlélteti.

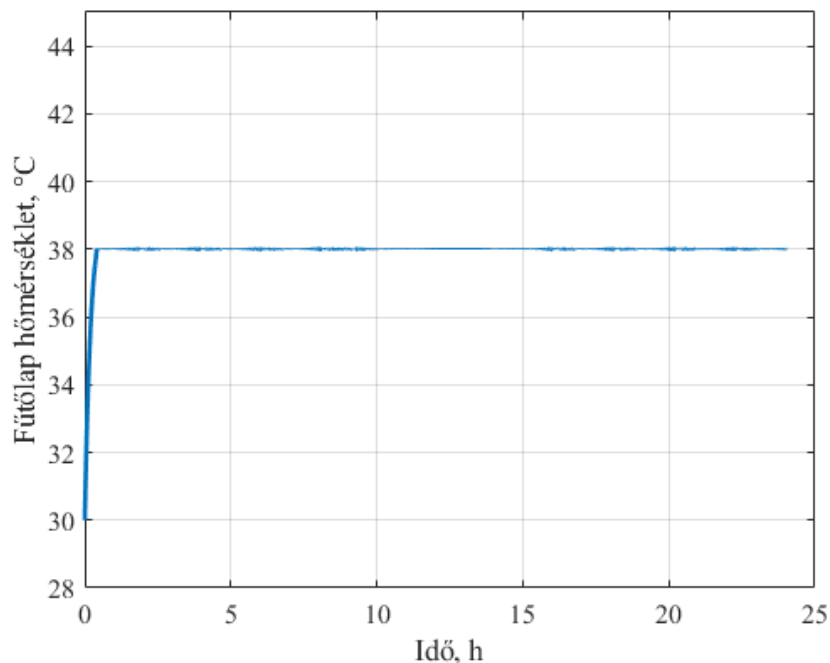


4.89. ábra Fűtőlap hőmérséklet szabályozás szivattyú ki-/bekapcsolást alkalmazó csúszómód-szabályozóval a fojtószelep záróelem 0°-os szöghelyzetében, állandóan nyitott állapotában

A szabályozó kimenete a motor maximális teljesítményen való működtetéséhez tartozó 3 vagy a kikapcsolt állapothoz tartozó 0 értékek valamelyike lehet. A be és kikapcsolt állapot között lévő átmeneti állapotokat a modellben elhanyagoltam. A szabályozás időben állandó 38 °C-os alapjelre történt, a csúszóegyenest meghatározó lambda tényezőt 4,01 értékre

választottam, a környezeti hőmérsékletet állandó 25 °C-ra a fojtószelepet a maximális nyitottságot jelentő 0°-ra, míg a fűtőlap kiindulási hőmérsékletét 30 °C-ra állítottam.

A szabályozás eredménye gyakorlatilag megegyezik a fojtó szelepet alkalmazó megoldással (4.90. ábra), viszont ennek energiaszükséglete alacsonyabb.



4.90. ábra Fűtőlap hőmérséklet csúszómód-szabályozóval működtetett szivattyú ki-/bekapcsolással

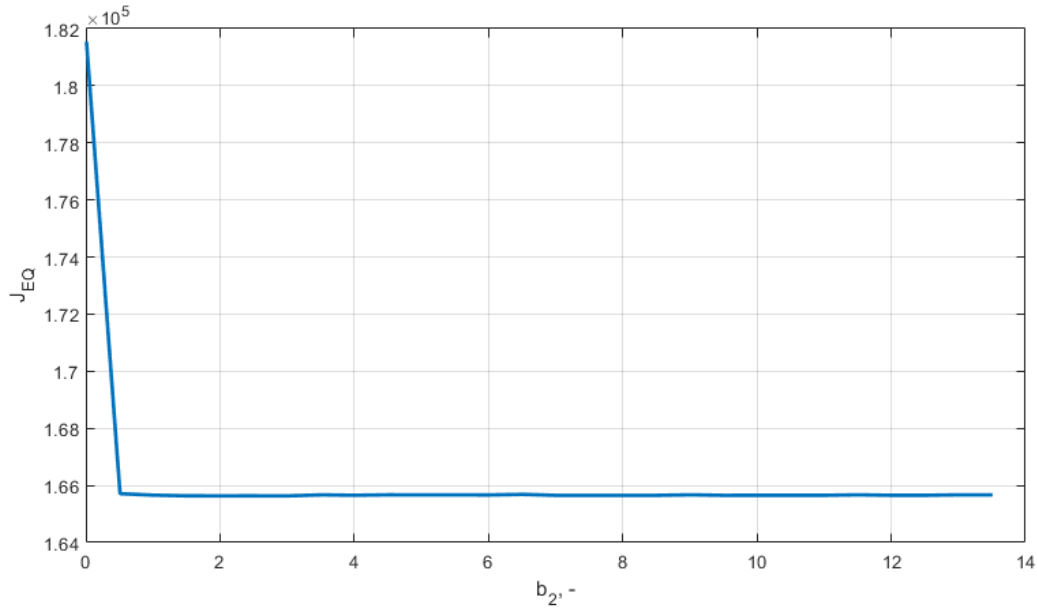
A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 1,499 \cdot 10^4$.

Szabályozás napi energiafelhasználása: 12,27 kWh.

A szabályozás összesített jósági tényezője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 1,377 \cdot 10^5$.

4.8. Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének módosított csúszómód szabályozása

A 4.22 egyenlettel megadott tangens függvénnel leírt csúszófelületet alkalmazó csúszómód-szabályozót szintén optimalizálásnak vettem alá. Először a 4.91. ábra szerint kirajzoltattam a paramétersíkot, ahol a tangens szélességét meghatározó paramétert (b_2) változtattam. A másik két paraméter, $b_1 = 0,05$ és $b_3 = 0,02$ értéken álltak, mivel ezekkel a függvény meredekségét lehet befolyásolni és itt kifejezett célom volt a nulla hiba közelében az alacsony hibamegváltozási sebesség biztosítása a túllendülések elkerülése érdekében.



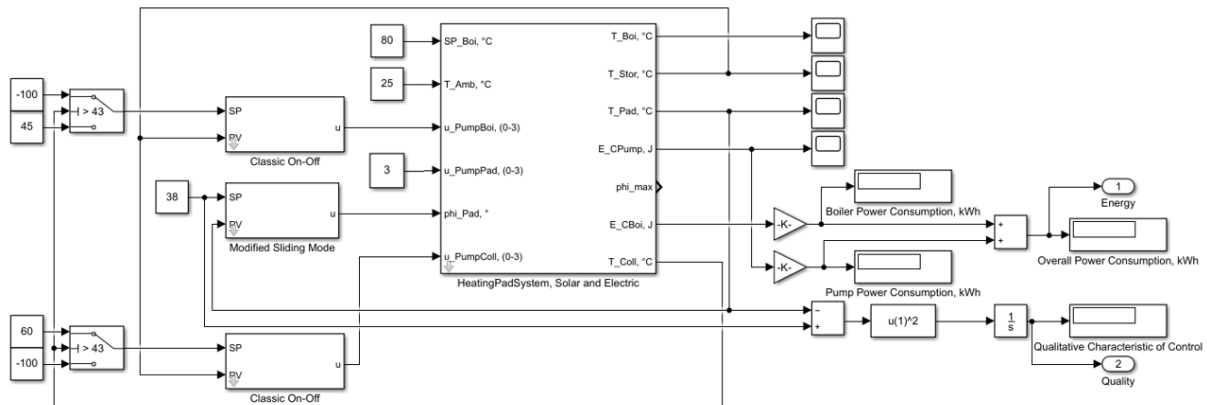
4.91. ábra A tangens alapú csúszómód-szabályozó paramétersíkja

A paramétersík által megadott legalacsonyabb célértékhez (1,49) tartozó erősítési tényezőről indítottam a minimumkeresést, melynek eredménye 1,51.

4.8.1. Fojtószelep nyitással/zárással

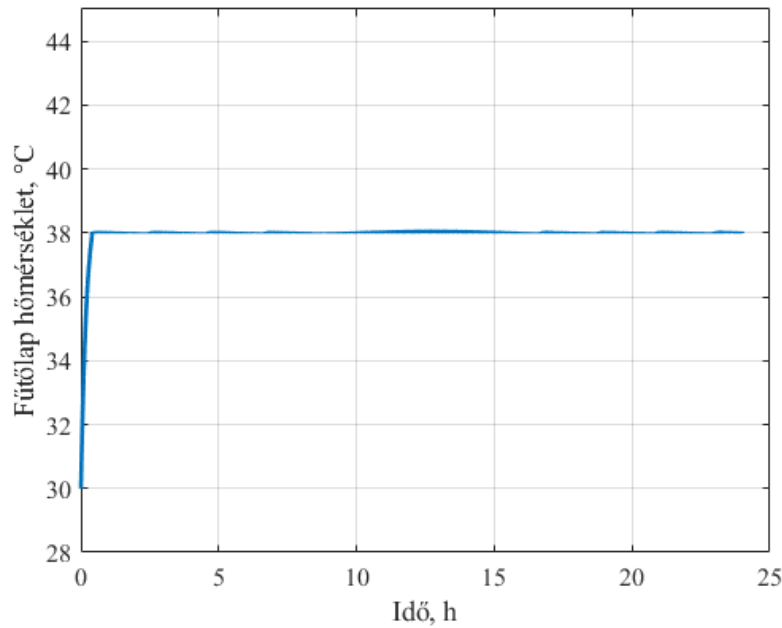
A módosított csúszómód-szabályozó fojtószelep működtetésre, nyitásra/zárásra történő használatát a 4.92. ábra szemlélteti.

A szabályozó kimenete a fojtószelep teljes nyitásához tartozó 0° vagy a teljes záráshoz tartozó $77,36^\circ$ valamelyike lehet. A nyitás és zárás között lévő átmeneti állapotokat a modellben elhanyagoltam. A szabályozás időben állandó 38°C -os alapjelre történt, a csúszófüggvényként alkalmazott tangens szélességét meghatározó paramétert (b_2) 1,51-re választottam, míg b_1 és b_3 értéke a 4.7. alfejezet címet követő bekezdésben megadottakkal azonos, a környezeti hőmérsékletet állandó 25°C -ra a szivattyú teljesítményfokozatát konstans, a maximális értéket jelentő 3-ra míg a fűtőlap kiindulási hőmérsékletét 30°C -ra állítottam.



4.92. ábra Fűtőlap hőmérséklet szabályozás módosított csúszómód-szabályozóval működtetett fojtószelep nyitással/zárással

A szabályozást 1 napra futtatva, a fűtőlapp hőmérséklet a 4.93. ábra szerint alakult.



4.93. ábra Fűtőlapp hőmérséklet módosított csúszómód-szabályozóval működtetett fojtószelep nyitással/zárással

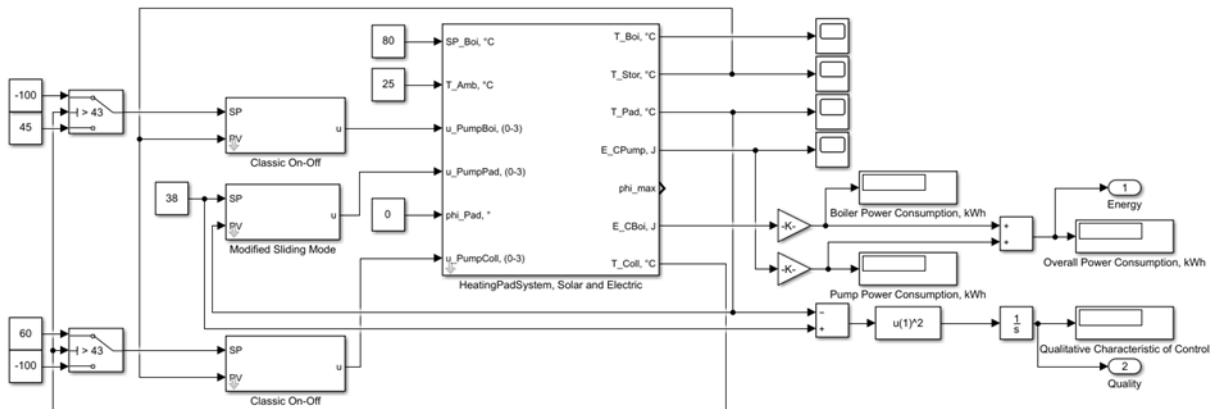
A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 1,498 \cdot 10^4$.

Szabályozás napi energiafelhasználása: 14,29 kWh.

A szabályozás minőségi jellemzője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 1,579 \cdot 10^5$.

4.8.2. Szivattyú ki-/bekapcsolással

A módosított csúszómód-szabályozó szivattyú működtetésre, ki-/bekapcsolásra történő használatát a 4.94. ábra szemlélteti.

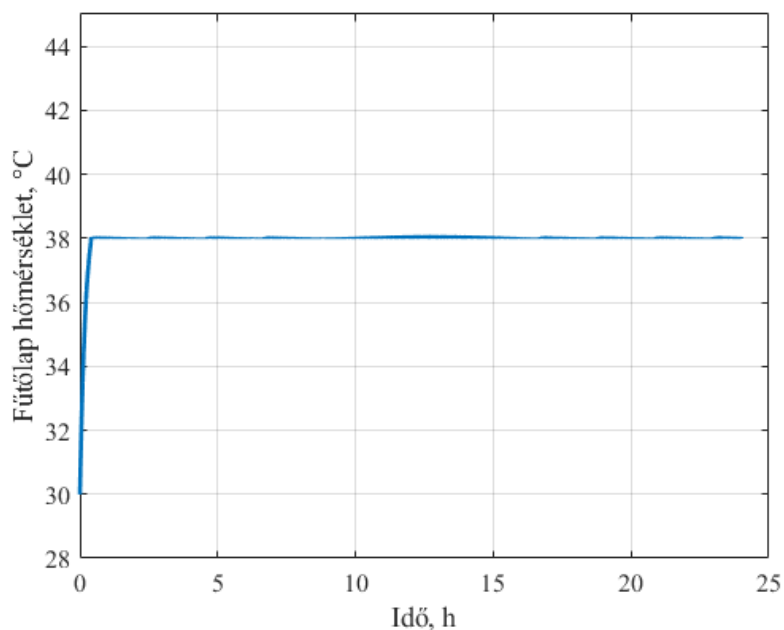


4.94. ábra Fűtőlapp hőmérséklet szabályozás módosított csúszómód-szabályozóval működtetett szivattyú ki-/bekapcsolással

A szabályozó kimenete a motor maximális teljesítményen való működtetéséhez tartozó 3 vagy a kikapcsolt állapothoz tartozó 0 értékek valamelyike lehet. A be és kikapcsolt állapot között lévő átmeneti állapotokat a modellben elhanyagoltam. A szabályozás időben állandó 38 °C-os alapjelre történt, a csúszófüggvényként alkalmazott tangens szélességét meghatározó

paramétert (b_2) 1,51-re választottam, míg b_1 és b_3 értéke a 4.7. alfejezet címet követő bekezdésben megadottakkal azonos, a környezeti hőmérsékletet állandó 25 °C-ra a fojtószelepet a maximális nyitottságot jelentő 0°-ra míg a fűtőlap kiindulási hőmérsékletét 30 °C-ra állítottam.

A fűtőlap hőmérséklet a 4.95. ábra szerint alakult, mely gyakorlatilag megegyezik a 4.7.1. alfejezetben ismertetett fojtószelep nyitást/zárást alkalmazó megoldással, viszont ez esetben az energiaigény kevesebb volt.



4.95. ábra Fűtőlap hőmérséklet módosított csúszómód-szabályozóval működtetett szivattyú ki-/bekapcsolással

A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 1,498 \cdot 10^4$.

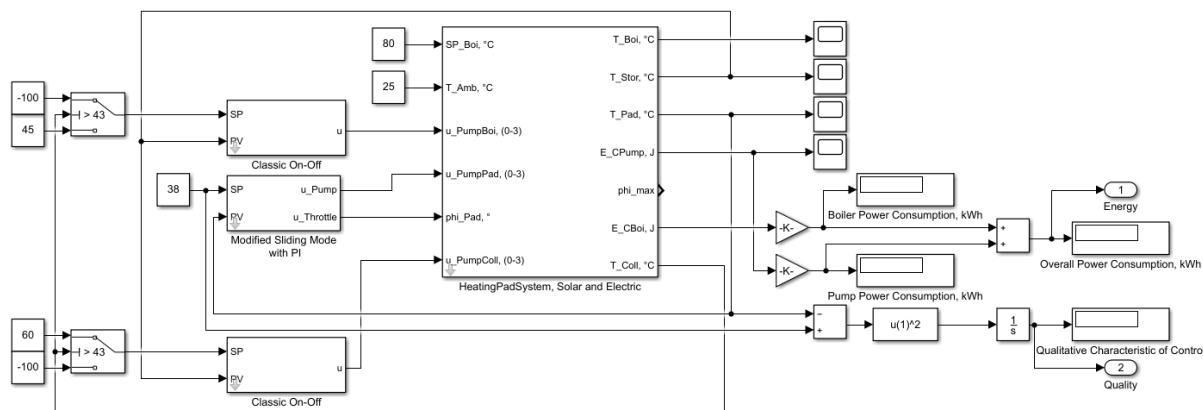
Szabályozás napi energiafelhasználása: 12,27 kWh.

A szabályozás összesített jósági tényezője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 1,377 \cdot 10^5$.

4.9. Folyadék munkaközegű fűtőlap hőmérsékletének kombinált szabályozása módosított csúszómód-szabályozóval

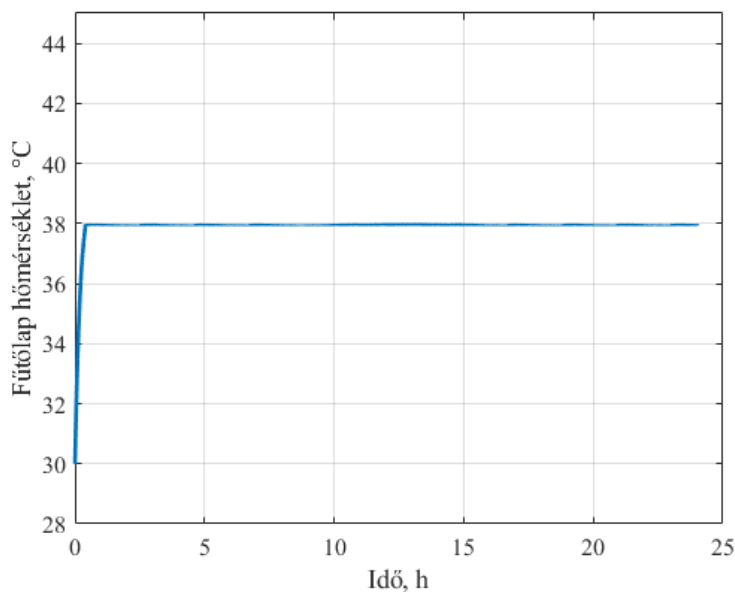
A kombinált módosított csúszómód-szabályozót tartalmazó modell felépítését a 4.96. ábra szemlélteti. A modell a 4.62. ábrán bemutatott kombinált csúszómód-szabályozót tartalmazza. A szabályozó módosított csúszómód része, a szivattyú szállítási teljesítmény fokozatváltást végző szabályozással együttműködve a szivattyút, mint egyik beavatkozó szervet 4 fokozatba kapcsolhatja, továbbá a módosított csúszómód-szabályozó PI kaszkádszabályozással kiegészítve a fojtószelepet, mint másik beavatkozó szervet teljesen nyitott és teljesen zárt pozíciója között közbenső szöghelyzetekbe is állíthatja.

A szabályozás időben állandó 38 °C-os alapjelre történt, a csúszófüggvényként alkalmazott tangens szélességét meghatározó paramétert (b_2) 1,51-re választottam, míg b_1 és b_3 értéke a 4.7. alfejezet címet követő bekezdésben megadottakkal azonos, a környezeti hőmérsékletet állandó 25 °C-ra a míg a fűtőlap kiindulási hőmérsékletét 30 °C-ra állítottam.



4.96. ábra Fűtőlap hőmérséklet kombinált szabályozása módosított csúszómód-szabályozóval működtetett szivattyúval és fojtószeleppel

30 °C kezdeti értékről, a szabályozást 1 napra futtatva, a fűtőlap hőmérséklet a 4.97. ábra szerint alakult, ahol a szabályozás minőségi jellemzője J_Q valamivel rosszabb, J_{EQ} valamivel jobb az előbbi, 4.7.2. alfejezetben ismertetett megoldásnál, továbbá az energiafelhasználás alacsonyabb az előzőnél.



4.97. ábra Fűtőlap hőmérséklet kombinált szabályozásnál módosított csúszómód-szabályozóval működtetett szivattyúval és fojtószeleppel

A szabályozás minőségi jellemzője a 4.24 összefüggéssel számítva: $J_Q = 1,528 \cdot 10^4$.

Szabályozás napi energiafelhasználása: 11,98 kWh.

A szabályozás összesített jósági tényezője a 4.28 összefüggéssel számítva: $J_{EQ} = 1,351 \cdot 10^5$.

4.10. Szabályozások értékelése egységes szempontrendszer alapján

Ebben a fejezetben a vizsgált szabályozási megoldásokat hasonlítom össze egységes szempontrendszer alapján.

4.10.1. A szabályozások minőségi- és energiahatékonysági jellemzői

A szabályozások energiafelhasználását és minőségi jellemzőit együttesen figyelembe vevő kvantitatív szám (J_{EQ}), melyet jósági tényezőnek is nevezhetünk, a 4.1. fejezet 4.30 összefüggése alapján lett számítva. A szabályozásnak csak a minőségi jellemzőit (J_Q) figyelembe vevő számítás a 4.1. fejezet 4.26 összefüggésével történt. Az összehasonlíthatóság miatt egy napos és egész éves szimulációk eredményét mutatom be a 4.7. táblázat és 4.8. táblázat segítségével. A szempontrendszer szerint, az a szabályozás jobb, melynek ez a kvantitatív mutatója kisebb.

A szimulációkat egységesen május 30-án 00:00-tól indítottam, a fűtőlap 30 °C, a bojler 75 °C, a hőtároló 45 °C kezdő, illetve a fűtőlap 38 °C, a bojler 80 °C a hőtároló napsütés esetén 60 °C anélkül 45 °C célhőmérsékleteivel.

A kísérleti beállításban használt paraméterek:

- Villamos fűtőtéljesítmény: 1800 W,
- Hőtároló térfogata: 120 l,
- Fűtőlap méretei: szabványos 1200 x 500 x 65 mm,
- Fűtőlap víztérfogata: 39 l,
- Fűtőlapok száma: 1 db,
- Napkollektorok hasznos felülete: 1910 x 950 mm,
- Napkollektorok száma: 4 db.

A szimulációk során ODE4 megoldó algoritmust alkalmaztam fix, 1 s lépésközzel.

4.7. táblázat: A szabályozó algoritmusok és stratégiák egységes összehasonlítása egy napos szimuláció alapján

Napi, az év május 30. napjára			
Szabályozó	Energia-felhasználás, kWh	Szabályozás minőségi jellemzője, J_Q	Jósági tényező, J_{EQ}
Kétállású, fojtószelep nyitással/zárással	14,32	$8,814 \cdot 10^4$	$2,313 \cdot 10^5$
Kétállású, szivattyú ki-/bekapcsolással	12,3	$8,814 \cdot 10^4$	$2,111 \cdot 10^5$
PI fojtóval	15,08	$4,948 \cdot 10^4$	$2,003 \cdot 10^5$
PI fojtó és anti-windup	15,05	$1,499 \cdot 10^4$	$1,655 \cdot 10^5$
Csúszómód fojtóval	14,29	$1,499 \cdot 10^4$	$1,579 \cdot 10^5$
Csúszómód szivattyúval	12,27	$1,499 \cdot 10^4$	$1,377 \cdot 10^5$
Módosított csúszómód fojtóval	14,29	$1,498 \cdot 10^4$	$1,579 \cdot 10^5$
Módosított csúszómód szivattyúval	12,27	$1,498 \cdot 10^4$	$1,377 \cdot 10^5$
Kombinált módosított csúszómód	11,98	$1,528 \cdot 10^4$	$1,351 \cdot 10^5$

4.8. táblázat: A szabályozó algoritmusok és stratégiák egységes összehasonlítása egy éves szimuláció alapján

Szabályozó	Éves		
	Energia-felhasználás, kWh	Szabályozás minőségi jellemzője, J_Q	Jósági tényező, J_{EQ}
Kétállású, fojtószelep nyitással/zárással	5732	$2,726 \cdot 10^7$	$8,256 \cdot 10^7$
Kétállású, szivattyú ki-/bekapcsolással	5457	$2,799 \cdot 10^7$	$8,458 \cdot 10^7$
PI fojtóval	6018	$4,950 \cdot 10^4$	$6,023 \cdot 10^7$
PI fojtó és anti-windup	5750	$1,928 \cdot 10^4$	$5,752 \cdot 10^7$
Csúszómód fojtóval	5723	$1,675 \cdot 10^4$	$5,725 \cdot 10^7$
Csúszómód szivattyúval	4995	$1,675 \cdot 10^4$	$4,997 \cdot 10^7$
Módosított csúszómód fojtóval	5723	$1,545 \cdot 10^4$	$5,725 \cdot 10^7$
Módosított csúszómód szivattyúval	4995	$1,545 \cdot 10^4$	$4,997 \cdot 10^7$
Kombinált módosított csúszómód	4828	$1,25 \cdot 10^5$	$4,841 \cdot 10^7$

Az adatokból látszik, hogy habár a kombinált módosított csúszómód szabályozás minőségi jellemzőjét (J_Q) tekintve alulmarad az kétállású szabályozón kívül vizsgált összes más szabályozónak, energiafelhasználásának kiemelkedően alacsony értéke miatt mégis ez a megoldás került ki elsőként. A „rosszabb” minőségi jellemző ezesetben azt jelenti, hogy a fűtőlap hőmérséklet állandósult állapotban, a szimulációk alapján a gyakorlatban használt hőmérőszensorok felbontásán belüli értékkel ($e_{max} = \pm 0,075 \text{ } ^\circ\text{C}$) tér el a célértéktől, mely az állatok hőérzetét hátrányosan nem befolyásolja.

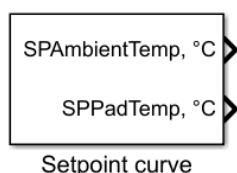
Ha összevetünk két, napenergiát is hasznosító rendszerben alkalmazott szabályozótípust, esetünkben a kombinált szabályozót az elterjedt kétállású szabályozóval, melynek a hibája $e_{max} = \pm 1,59 \text{ } ^\circ\text{C}$, láthatjuk, hogy szignifikáns különbség van a két szabályozó minősége közt, energiafelhasználás tekintetében pedig egy éves termelést figyelembe véve, egy fűtőlap esetében 629 kWh a különbség.

Ez elsőre talán nem tűnik szignifikáns különbségnek, de ha figyelembe vesszük, hogy Magyarországon a KSH adatai alapján évente 3 248 000 malac tölti az élete első 91 napját az itt bemutatott fűtőlapokon, hiszen az első 35 nap a fűtőlapokon is ilyen fűtőlapokon fekszenek, kiszámítható, hogy a kombinált megoldás országos szinten évente, ha csak minden századik malacra jut egy fűtőlap, és azt valójában csak az év 182 napjában alkalmazzák, mivel a vemhességi időszakot nem számíthatjuk, 5'093'487 kWh megtakarítást jelent, mely egyenértékű szintén a KSH adatai alapján megegyezik 2300 átlagos háztartás éves villamosenergia-szükségletével, illetve 1'782'720 kg kibocsátott széndioxiddal.

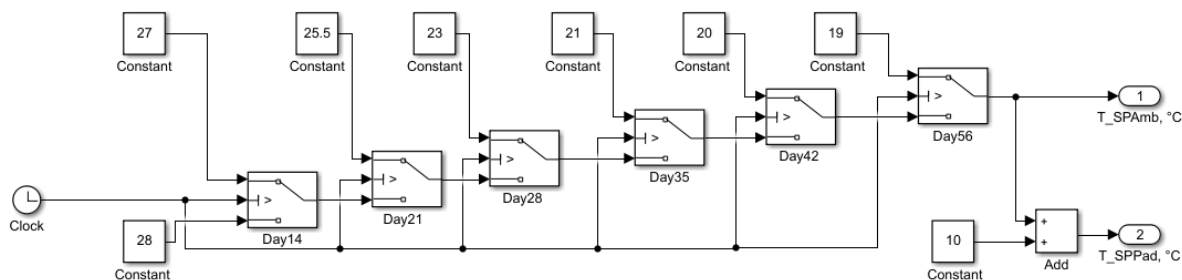
4.10.2. A munkapont változásra adott válasz

A modellkísérleteket a valóságos körülményeket modellező módon végeztem el, tehát mind a környezeti hőmérséklet, mind a fűtőlapok hőmérsékleti alapjele a termelési hőmérsékleti lépcsőknek megfelelően változott, valamint a fűtőlapok foglaltságát is változtattam szimulációs naponként hatszor. Ezáltal nem csak a használhatóság korlátait, hanem az optimalizált szabályozók a megváltozott körülményekre adott válaszát is vizsgáltam.

A változó alapjeleket, így az istálló lég- és fűtőlap hőmérsékletét generáló alrendszer (4.98. ábra) egyszerű időzítést alkalmaz a különböző alapjelek előállításához (4.99. ábra). Az alapjelgörbék az Európában legnagyobb sertéstartástechnológiával foglalkozó cég (Big Dutchman) ajánlásai alapján készültek, melyek nem hivatkozható, belső anyagok.



4.98. ábra A lég és fűtőlap hőmérséklet görbét generáló alrendszer Simulink környezetben



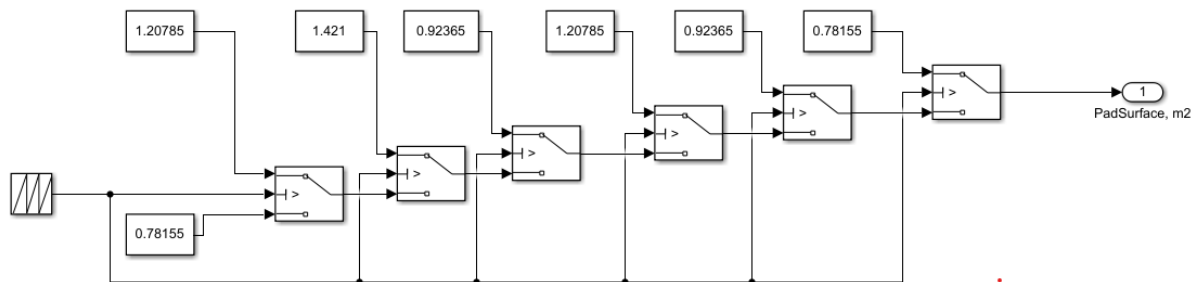
4.99. ábra Az alrendszer belső felépítése

Az ajánlás alapján a fűtési görbe a 4.9. táblázat alapján írható le.

4.9. táblázat: A 7-30 kilós malacok nevelésénél optimális hőmérsékletek

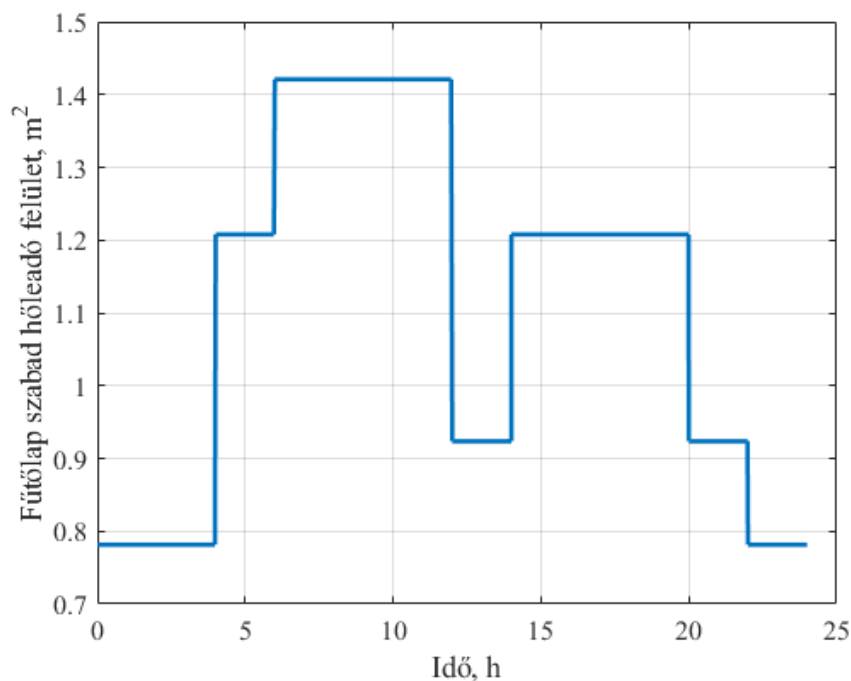
Nap	1	14	21	28	35	42	56
Léghőmérséklet, °C	28	27	25,5	23	21	20	19
Fűtőlaphőmérséklet, °C	38	37	35,5	33	31	30	29

A fűtőlapok terheltségét, azaz a rajta fekvő malacok számát a 4.100. ábra által bemutatott modell alapján változtattam. A malacok testhőmérséklete megközelítőleg egyezik a fűtőlap hőmérsékletével, ezért az állatok jelenlétét a fűtőlapok szabad hőleadó felületének változásával modelleztem.



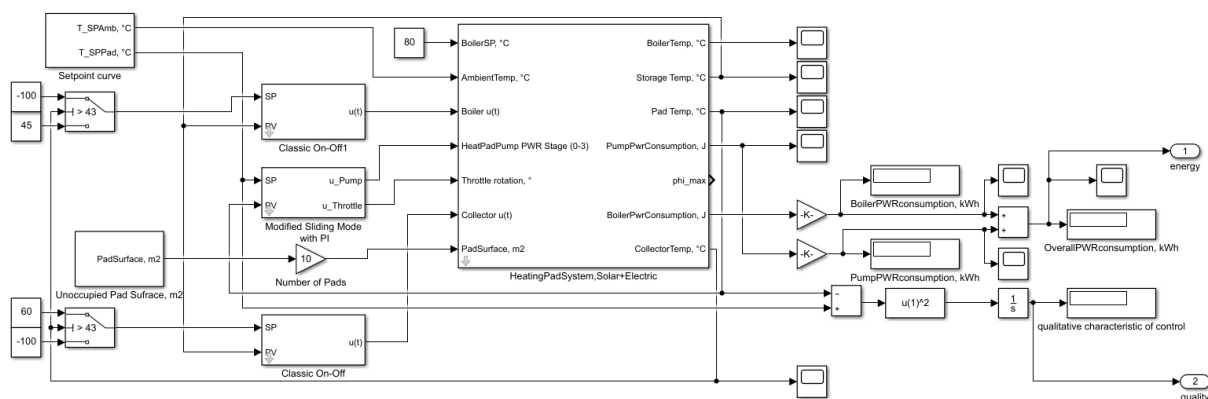
4.100. ábra A fűtőlápok szabad felületét meghatározó modell

A 4.101. ábra mutatja a fűtőláp szabad felületét napi eloszlásban.



4.101. ábra A fűtőláp szabad felülete a nap során

A 4.10. táblázatokban szabályozási típusonként a legsikeresebbeket vettem csak össze. A szimulációnál egy termelési ciklust, vettem figyelembe, május 30-ától indítva. A termelési ciklus vége július 25-e volt. A szimuláció egyéb körülményei változatlanok maradtak. Példa az ilyen szimulációs kísérletnek alávetett elrendezésre a 4.102. ábra.



4.102. ábra Változó körülményekkel végzett szimulációs kísérlet a kombinált módosított csúszómód szabályozás esetében

Az első kísérletben egy kisméretű, csupán egy fűtőlapot tartalmazó rendszert vizsgáltam. A kísérleti beállításban használt paraméterek:

- Villamos fűtőtéljesítmény: 1800 W,
- Hőtároló térfogata: 120 l,
- Fűtőlap méretei: szabványos 1200 x 500 x 65 mm,
- Fűtőlap víztérfogata: 39 l,
- Fűtőlapok száma: 1 db,
- Napkollektorok hasznos felülete: 1910 x 950 mm,
- Napkollektorok száma: 4 db.

4.10. táblázat Az öt legjobban teljesítő szabályozó algoritmus összehasonlítása egy termelési ciklusra végzett szimuláció alapján változó alapjel esetén

Kis rendszer (1 fűtőlap) egy termelési ciklus (56 nap), 1 fűtőlap Pest			
Szabályozó	Energia-felhasználás, kWh	Szabályozás minőségi jellemzője, J_Q	Jósági tényező, J_{EQ}
Kétállású, szivattyú ki-/bekapcsolással	519,3	$4,145 \cdot 10^6$	$9,338 \cdot 10^6$
PI fojtó és anti-windup	677,1	$2,637 \cdot 10^4$	$6,797 \cdot 10^6$
Csúszómód szivattyúval	518,1	$2,666 \cdot 10^4$	$5,208 \cdot 10^6$
Módosított csúszómód szivattyúval	518,1	$2,652 \cdot 10^4$	$5,208 \cdot 10^6$
Kombinált módosított csúszómód	511,7	$4,134 \cdot 10^4$	$5,158 \cdot 10^6$

A 4.10. táblázat alapján megállapítható, hogy az új kombinált módosított csúszómód szabályozási algoritmus és stratégia változó alapjel és környezeti paraméterek mellett is jobban teljesít az egységes szempontrendszer alapján. Ennek oka, hogy a szabályozó alapja egy robusztus szabályozó, mely a munkapont változásra való érzéketlensége miatt került kiválasztásra.

A használhatóság korlátainak megállapítása érdekében a kísérleti eszközön végzett mérések alapján identifikált modelleket felskáláztam a tapasztalataim alapján leggyakoribb méretekre.

Egy közepes méretű malacnevelőben jellemzően tíz kutricában, összesen tíz fűtőlap található, mely 100 malac melegen tartására elegendő.

A kísérleti beállításban használt paraméterek:

- Villamos fűtőtéljesítmény: 12 kW,
- Hőtároló térfogata: 1200 l,
- Fűtőlap méretei: szabványos 1200 x 500 x 65 mm,
- Fűtőlap víztérfogata: 39 l,
- Fűtőlapok száma: 10 db,
- Napkollektorok hasznos felülete: 1910 x 950 mm,
- Napkollektorok száma: 10 db.

Az eredményeket a 4.11. táblázat mutatja.

4.11. táblázat: Közepes méretű rendszer szimulációs eredményei

Közepes rendszer (10 fűtőlap) egy termelési ciklus (56 nap) Pest			
Szabályozó	Energia-felhasználás, kWh	Szabályozás minőségi jellemzője, J_Q	Jósági tényező, J_{EQ}
Kétállású, szivattyú ki-/bekapcsolással	2379	$4,144 \cdot 10^6$	$2,793 \cdot 10^7$
PI fojtó és anti-windup	2548	$2,707 \cdot 10^4$	$2,551 \cdot 10^7$
Csúszómód szivattyúval	2407	$2,735 \cdot 10^4$	$2,410 \cdot 10^7$
Módosított csúszómód szivattyúval	2407	$2,724 \cdot 10^4$	$2,410 \cdot 10^7$
Kombinált módosított csúszómód	2396	$4,220 \cdot 10^4$	$2,400 \cdot 10^7$

A 4.11. táblázat alapján megállapítható, hogy az új kombinált módosított csúszómód szabályozási algoritmus és stratégia változó alapjel és környezeti paraméterek mellett 10 fűtőlap szabályozásának esetén is jobban teljesít az egységes szempontrendszer alapján.

A nagyméretű rendszerek Magyarországon tapasztalataim szerint 30 kutricával, 30 fűtőlappal és 300 malaccal üzemelnek.

A kísérleti beállításban használt paraméterek:

- Villamos fűtőtéljesítmény: 24 kW,
- Hőtároló térfogata: 2000 l,
- Fűtőlap méretei: szabványos 1200 x 500 x 65 mm,
- Fűtőlap víztérfogata: 39 l,
- Fűtőlapok száma: 30 db,
- Napkollektorok hasznos felülete: 1910 x 950 mm,
- Napkollektorok száma: 50 db.

A szivattyú teljesítménye ekkora körben sem haladja meg az általam alkalmazott típusát, így azt használtam. A szimulációval kapott eredményeket a 4.12. táblázat tartalmazza.

4.12. táblázat Nagyméretű rendszer szimulációs eredményei

Nagy rendszer (30 fűtőlap) egy termelési ciklus (56 nap) Pest			
Szabályozó	Energia-felhasználás, kWh	Szabályozás minőségi jellemzője, J_O	Jósági tényező, J_{EQ}
Kétállású, szivattyú ki-/bekapcsolással	5372	$4,179 \cdot 10^6$	$5,790 \cdot 10^7$
PI fojtó és anti-windup	5400	$3,541 \cdot 10^4$	$5,404 \cdot 10^7$
Csúszómód szivattyúval	5224	$3,559 \cdot 10^4$	$5,228 \cdot 10^7$
Módosított csúszómód szivattyúval	5223	$3,547 \cdot 10^4$	$5,227 \cdot 10^7$
Kombinált módosított csúszómód	5174	$5,109 \cdot 10^4$	$5,179 \cdot 10^7$

A 4.12. táblázat alapján megállapítható, hogy az új kombinált módosított csúszómód szabályozási algoritmus és stratégia változó alapjel és környezeti paraméterek mellett 30 fűtőlap szabályozásának esetén is jobban teljesít az egységes szempontrendszer alapján.

A szimulációs kísérletek alapján megállapítható, hogy az új, kombinált módosított csúszómód szabályozási algoritmus és stratégia 1-30 fűtőlap esetében jobb eredményt ad a többi vizsgált megoldásnál.

A változó alapjel és fűtőlapfoglaltsági kísérleteket ezen kívül lefuttattam Magyarország legalacsonyabb átlaghőmérsékletével és napsugárzási intenzitásával rendelkező településére (Zabar), valamint a legmagasabbal rendelkezővel is (Szeged). Az időjárásmodellek paraméteridentifikációjához a 2020-2023-as évek meteorológiai adatait vettem alapul.

A Szeged meteorológiai körülményeinek szimulációjához a 2.4-es fejezetben bemutatott, Pest megyére vonatkozó időjárásmodellben újraidentifikált paraméterek:

- Napsugárzásintenzitás
 - $c_3 = 221$
- Hőmérséklet
 - $a_6 = 16,7514$

A Zabar meteorológiai körülményeinek szimulációjához az időjárásmodellben újraidentifikált paraméterek:

- Napsugárzásintenzitás
 - $c_3 = 68,5$
- Hőmérséklet
 - $a_6 = 21,7962$

A vizsgálatokat ezúttal 10 fűtőlapot tartalmazó rendszernél végeztem el, annak igazolására, hogy a megváltozott klimatikus körülmények a szabályozóalgoritmusok hasonló minőségi jellemzőire nincsenek szignifikáns hatással. A 4.13. és 4.14. táblázatok mutatják be, hogy azonos felépítésű, 10 fűtőlapot alkalmazó rendszerek hogyan viselkednek eltérő meteorológiai körülmények között.

4.13. táblázat Közepes méretű rendszer szimulációs eredményei szegedi időjárási körülményekkel futtatva

Közepes rendszer (10 fűtőlap) egy termelési ciklus (56 nap) Szeged			
Szabályozó	Energia-felhasználás, kWh	Szabályozás minőségi jellemzője, J_Q	Jósági tényező, J_{EQ}
Kétállású, szivattyú ki-/bekapcsolással	2094	$4,160 \cdot 10^6$	$2,510 \cdot 10^7$
PI fojtó és anti-windup	2275	$2,707 \cdot 10^4$	$2,278 \cdot 10^7$
Csúszómód szivattyúval	2074	$2,736 \cdot 10^4$	$2,077 \cdot 10^7$
Módosított csúszómód szivattyúval	2074	$2,724 \cdot 10^4$	$2,077 \cdot 10^7$
Kombinált módosított csúszómód	2062	$4,211 \cdot 10^4$	$2,066 \cdot 10^7$

4.14. táblázat Közepes méretű rendszer szimulációs eredményei zabari időjárási körülményekkel futtatva

Közepes rendszer (10 fűtőlap), egy termelési ciklus (56 nap) Zabar			
Szabályozó	Energia-felhasználás, kWh	Szabályozás minőségi jellemzője, J_Q	Jósági tényező, J_{EQ}
Kétállású, szivattyú ki-/bekapcsolással	2861	$4,135 \cdot 10^6$	$3,275 \cdot 10^7$
PI fojtó és anti-windup	3096	$2,707 \cdot 10^4$	$3,099 \cdot 10^7$
Csúszómód szivattyúval	2942	$2,734 \cdot 10^4$	$2,945 \cdot 10^7$
Módosított csúszómód szivattyúval	2942	$2,720 \cdot 10^4$	$2,945 \cdot 10^7$
Kombinált módosított csúszómód	2925	$4,236 \cdot 10^4$	$2,929 \cdot 10^7$

A 4.13.-4.14. táblázatok alapján is megállapítható, hogy az új kombinált módosított csúszómód szabályozási algoritmus és stratégia változó alapjel és környezeti paraméterek mellett 10 fűtőlap szabályozásának esetén, megváltozott időjárási körülmények közt is jobban teljesít az egységes szempontrendszer alapján.

A vizsgálatokból kiderül, hogy a napsugárzásintenzitás, valamint a kollektorok környezeti hőmérséklete a szabályozás minőségi jellemzőire nincsenek szignifikáns hatással, de a várttal egybevágó módon az energiafelhasználásra jelentős módon hatnak.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Munkám során a termikus napenergiahasznosítással kiegészített sertéstartásban alkalmazott folyadékmunkaközegű fűtőlapok hőmérsékletszabályozásával kapcsolatban olyan eredményekre jutottam, melyek az ilyen rendszerek szabályozási algoritmusai és stratégiái kiválasztásában gyakorlati szempontú segítséget nyújtanak.

Kísérleti eszközt állítottam össze, mely alkalmas termikus napenergiahasznosító, illetve hagyományos fűtési rendszerek modellezésére. A kísérleti eszközön méréseket végeztem, melyek eredményei szolgáltak alapul a szimulációs keretrendszer új modelljeinek paraméteridentifikációjához és validációjához. Javaslom a kísérleti rendszer kibővítését.

Megalkottam a SimSolar keretrendszer kibővítésével egy új, átfogó padlófűtési rendszerek részegységeit leíró modellkönyvtárat, mely alkalmas új szabályozási algoritmusok és stratégiák idő és költséghatékony modellkísérletalapú összehasonlítására. Javaslom a könyvtár további bővítését keverőszelepek, illetve a csövek nyomáskereső leíró függvényekkel.

Kidolgoztam egy fizikai alapon nyugvó fojtómodellt, mely alkalmas a hagyományos fűtési rendszerekben elzárószerelevényként alkalmazott gömbcsapok fojtóként történő alkalmazását nagy pontossággal leírni, javaslom az eltérő cső-furat átmérővel rendelkező golyóscsapok modelljének kidolgozását.

Kidolgoztam egy új kombinált szabályozási algoritmust és stratégiát, mely a szabályozás minőségi jellemzőinek szignifikáns romlása nélkül képes az energiahatékonyságot szignifikánsan növelni, ezáltal hozzájárulhat a 2030-ra kitűzött Európai Unió energiahatékonysági törekvések eléréséhez. Javaslom további szabályozási stratégiák és algoritmusok tesztelését mind a felhasználói, mind az energiatároló körökben.

Kidolgoztam egy, az iparban használt, valamint új szabályozási algoritmusok és stratégiák egységes összehasonlítását lehetővé tevő kritériumfüggvényt, mely gyakorlati jelentőséggel bír a megfelelő megoldások kiválasztásához. Javaslom a kritériumfüggvény további paraméterekkel történő kibővítését, mint például a diszkrét szabályozók esetében fontos kapcsolási frekvencia, illetve a hidraulikus rendszer kibővítése tágulási tartállyal.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Fluidtechnikai és szabályozástechnikai szimulációs keretrendszer

A kutatómunka során egy új, kiterjesztett szimulációs blokk-könyvtárat hoztam létre a SimSolar keretrendszer alapjaira építve, amely folyadék munkaközegű villamos, tisztán napenergiás és hibrid rendszerek modellezésére alkalmas. A könyvtár kiegészítésre került olyan új szabályozómodellekkel, mint a beavatkozási frekvencia korlátozással ellátott állásos, a módosított csúszómód, a szivattyúteljesítmény-, valamint a kombinált csúszómód-szabályozók.

2. Fojtószelep geometriai modellezése

Elkészítettem a gömbcsap áramlási keresztmetszetét leíró, fizikai alapú modellt. Az új modell figyelembe veszi a geometriát, a golyó és a golyófurat sugarát. A kidolgozott összefüggés geometria alapján pontos áramlási keresztmetszet értéket határoz meg a záróelem szögelfordulásának teljes tartományában.

A kidolgozott összefüggés zárt alakja az áramlási keresztmetszet felületét leíró függvény a következő:

$$A_f(\varphi, r, R) = -\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2})} \sin \varphi \\ + r^2 (\cos \varphi + 1) \sin^{-1} \left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \right),$$

ahol:

- A_f : átfolyási keresztmetszet, m^2 ,
- φ : a golyócsap záróelem szögelfordulása, $^\circ$,
- r : golyócsap golyófuratának sugara, m,
- R : golyócsap golyójának sugara, m.

3. Célérték függvény az energiahatékonyság és minőségi jellemzők figyelembevételével

Kidolgoztam a folyadék munkaközegű fűtőlapok hőmérséklet szabályozásának egységes összehasonlítási módszerét, valamint egységes optimalizálásra alkalmas kritériumfüggvényt, mely lehetővé teszi a szabályozók minőségi jellemzői mellett a szabályozás energiahatékonyságának összehasonlítását is. Az új kritériumfüggvény:

$$J_{EQ}(p_1, \dots, p_j) = \omega_1 \int_{\tau_0}^{\tau_1} E_C(\tau, p_1, \dots, p_j) d\tau + \omega_2 \int_{\tau_0}^{\tau_1} (SP(\tau) - PV(\tau, p_1, \dots, p_j))^2 d\tau,$$

ahol:

- J_{EQ} : energiafelhasználást és a szabályozás minőségi jellemzőit figyelembe vevő integrálkritérium,
- p_j : paraméterek, -,
- E_C : kumulált energiafelhasználás, J,
- τ : idő, s,
- ω_1 : az új kritériumfüggvény 1. súlyfaktora, $\frac{1}{J_s}$,
- ω_2 : az új kritériumfüggvény 2. súlyfaktora, $\frac{1}{^\circ C^2 s}$,
- SP : alapjel, $^\circ C$,
- PV : szabályozott jellemző, $^\circ C$.

4. Módosított csúszómód-szabályozó

Megalkottam egy módosított csúszófüggvényt alkalmazó csúszómód-szabályozót, mely csúszófelületként egy logaritmus alapú függvényt alkalmaz. Az új csúszófelületet leíró függvény:

$$s(\tau) = b_1 \frac{d\varepsilon}{d\tau} - b_2 \tan(\pi - b_3 \varepsilon(\tau)),$$

ahol:

- s : csúszófelület, -,
- τ : idő, s,
- ε : szabályozási hiba, $^\circ C$,
- b_1 : módosított csúszófelület 1. paramétere, $\frac{s}{^\circ C}$,
- b_2 : módosított csúszófelület 2. paramétere, -,
- b_3 : módosított csúszófelület 3. paramétere, $\frac{1}{^\circ C}$.

Szimulációs kísérletekkel igazoltam, hogy a vizsgált rendszeren az általam kidolgozott módosított csúszómód-szabályozó a vele azonos módon optimalizált klasszikus, lineáris csúszóegyenest alkalmazó szabályozóhoz képest egy éves vizsgálati időtartamra 7,76%-al jobb idővel súlyozott négyzetes integrálkritérium (Integral of Time-weighted Squared Error (ITSE)) minőségi jellemzővel bír.

5. Kombinált algoritmus fűtőlapok hőmérséklet szabályozására

Kidolgoztam egy kombinált szabályozási algoritmust, amely a folyadék munkaközegű fűtési rendszerek energiahatékonyágát és szabályozásának minőségét javítja. A kidolgozott módszer a módosított csúszómód-szabályozó robusztusságát egy arányos-integráló és egy kiegészítő szivattyúteltjesítmény-szabályozóval kombinálja. Szimulációs kísérletekkel igazoltam, hogy a vizsgált rendszeren ez az új szabályozótípus a hagyományos kétállású szabályozóval szemben 11,53% energiamegtakarítást és 99,6% idővel súlyozott négyzetes integrálkritérium (Integral of Time-weighted Squared Error (ITSE-re)) vonatkozó minőségi jellemző javulást eredményez.

A vizsgálatokat egy, tíz és harminc fűtőlapra végeztem el.

A szimulációk paraméterei:

- Egy fűtőlap mérete: 1200 x 500 x 65 mm, térfogata 39 l, egy napkollektor hasznos felülete: 1910 x 950 mm.
- 1, 10, 30 fűtőlapok esetén rendre:
 - Villamos fűtőteltjesítmény: 1,8 kW, 12 kW, 24 kW,
 - Hőtároló térfogata: 120 l, 1200 l, 2000 l,
 - Napkollektorok száma: 4 db, 10 db, 50 db.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatási munkám célja olyan energiahatékony szabályozási algoritmus és stratégia kidolgozása volt, mely figyelembe veszi az Európai Unió klímapolitikai törekvéseit és az állatjólléti irányelvekben megfogalmazottakat. A szakmai előéletem alapján a sertéstartásban is széles körben alkalmazott padlófűtési rendszerek optimalizálásával foglalkoztam.

Napjainkban az állattartásban alkalmazott fűtési rendszerek jellemzően közvetlenül fosszilis, vagy villamosenergiával állítják elő az állatok komfortérzetéhez elengedhetetlen kontakthőmérsékletet. A szabályozás sokszor pontatlan, s ez a malacok stresszérzetének fokozódásával, kirívó esetekben pedig akár elhullással is jár. A feladat tehát egy olyan megoldást találni, mely a nap termikus energiájának hasznosítása-, valamint a szabályozó rendszer energiahatékonyságának növelése révén a fűtés emisszióit csökkenti és a szabályozás minőségi jellemzőit javítja.

A feladat elvégzéséhez a szakirodalom által ajánlott szimulációs módszert választottam. Felépítettem a SimSolar keretrendszert alapul véve egy kiterjedt szimulációs modellesomagot, mely tartalmazza az ilyen rendszerekben használt legtöbb elem modelljét.

Létrehoztam egy új, a gömbcsapot, mint fojtót leíró geometriai alapon nyugvó modellt, mely lehetőséget ad, az eddig elzárószelengként alkalmazott szerelvény folytonos beavatkozást végző szabályozásokban történő alkalmazásának vizsgálatára.

A modellek paraméteridentifikációjához, valamint validálásához felépítettem egy kísérleti rendszert, melyen több alkalommal, változó környezeti és kiindulási hőmérsékletek esetében a szakirodalomban a vonatkozó alapelvek betartásával méréseket végeztem.

Létrehoztam többféle új szabályozási algoritmust, és stratégiát ezeket az iparban jelenleg is használtakkal vetettem össze, vagyis a kibővített, validált szimulációs keretrendszeren modellekísérleteket végeztem, többféle szabályozási algoritmust és stratégiát, valamint ezek kombinációit vizsgáltam.

A szabályozókat az általam újonnan felállított egységes kritériumfüggvény szerint optimaltam, illetve rangsoroltam.

Vizsgáltam továbbá a legsikeresebb szabályozási megoldások munkapontfüggőségét is és ezek alapján felállítottam egy egységes, többféle szempont szerint a szabályozókat jellemző táblázatot, mely segítséget nyújt a gyakorlati megvalósítás során a megfelelő megoldás kiválasztásához.

Végül megállapítottam, hogy az általam kidolgozott új szabályozási algoritmus hozzájárulhat az európai uniós energiamegtakarítási célok eléréséhez, anélkül, hogy az állatok hőérzetét, ezáltal a termelési mutatókat rontaná.

8. SUMMARY

The goal of my research was to develop an energy-efficient control algorithm and strategy that considers the climate policy objectives of the European Union as well as the requirements set forth in animal welfare guidelines. Based on my professional background, I focused on optimizing underfloor heating systems, which are widely used in pig farming.

Currently, the heating systems used in animal husbandry typically generate the contact temperature necessary for animal comfort directly from fossil fuels or electricity. Often, the control systems are inaccurate, leading to increased stress in piglets, and in extreme cases, even mortality. Therefore, the task is to find a solution that reduces heating emissions and improves the quality characteristics of the control by utilizing solar thermal energy and enhancing the energy efficiency of the control system.

To achieve this goal, I chose a simulation method recommended by the literature. I developed an extensive simulation model package based on the SimSolar framework, which includes models for most of the components used in such systems.

I created a new model based on geometry, describing the ball valve as a throttling device, which allows for the investigation of its application as a continuous regulator in systems where it was previously used solely as a shut-off valve.

To identify parameters and validate the models, I constructed an experimental system on which I conducted several measurements under varying environmental and initial temperature conditions, adhering to the relevant principles set forth in the literature.

I developed several new control algorithms and strategies and compared them with those currently used in the industry. This involved performing model experiments in the extended, validated simulation framework, where I examined multiple control algorithms and strategies, as well as their combinations.

I optimized and ranked the controllers according to a new unified criterion function that I established. I also examined the operating point dependence of the most successful control solutions and, based on these findings, compiled a unified table characterizing the controllers from various perspectives, which can assist in selecting the appropriate solution for practical implementation.

Finally, I concluded that the new control algorithm I developed could contribute to achieving the European Union's energy-saving targets without compromising the thermal comfort of the animals and, consequently, the production indicators.

9. MELLÉKLETEK

9.1. M1: Irodalomjegyzék

1. Abbas I. A., Mustafa M. K. (2024): A review of adaptive tuning of PID-controller: Optimization techniques and applications, *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 15(2), pp. 29-37., DOI 10.22075/ijnaa.2023.21415.4024
2. Ahmed A., Roy N. K., Nasir A. (2024): A novel weighted exponential sliding mode controller with a modified reaching law for the frequency regulation of a renewable integrated isolated AC microgrid, *Electric Power Systems Research*, 237, 111027. DOI 10.1016/j.epsr.2024.111027
3. Ahn K. K., Ahn H. P. H. (2009): Design and implementation of an adaptive recurrent neural networks (ARNN) controller of the pneumatic artificial muscle (PAM) manipulator, *Mechatronics*, Vol. 19., Issue 6., pp. 816–828., ISSN 0957-4158, DOI 10.1016/j.mechatronics.2009.04.006
4. Ahsan, M., Shahzad, W., & Arif, K. M. (2024): AI-Based Controls for Thermal Comfort in Adaptable Buildings: A Review, *Buildings*, 14(11), 3519. DOI 10.3390/buildings14113519
5. Aliko R., Mellouli E. M., Tissir E. H. (2024): A modified sliding mode controller based on fuzzy logic to control the longitudinal dynamics of the autonomous vehicle, *Results in Engineering*, 22, 102120. DOI 10.1016/j.rineng.2024.102120
6. Álmos A., Győri S., Horváth G., Várkonyiné Kóczy A. (2002): *Genetikus algoritmusok*, Typotex Kiadó, Budapest, ISBN 978-963-9321-07-6
7. Ashino R., Nagase M., Vaillancourt R. (2000): Behind and beyond the MATLAB ODE Suite, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 40, Issue 4-5, pp. 491-512, ISSN 0898-1221, DOI 10.1016/S0898-1221(00)00175-9
8. Asmundis R. (2011): *Modeling, programming and simulations using LabVIEW™ software*, ISBN 978-953-307-521-1
9. Åström K. J., Hägglund T. (2001): The future of PID control, *Control Engineering Practice*, Vol. 9, Issue 11, pp. 1163-1175, ISSN 0967-0661, DOI 10.1016/S0967-0661(01)00062-4
10. Bärnkopf R., Ezer R., Kiss P., Máté S. (1984): *Hidraulikus Rendszerek Tervezése*, p. 370., ISBN 963 10 5477 7
11. Barótfi I., Kocsis K. (1979): *Mezőgazdasági épületgépészeti kézikönyv*, Budapest, Mezőgazda kiadó, ISBN 963-230-047-5
12. Becker A. (2023): *KALMAN FILTER: from the Ground Up*, pp. 75-112, ISBN 978-965-598-439-2
13. Beizer B. (1995): *Black-box testing: Techniques for functional testing of software and systems*, ISBN 0-471-12094-4
14. Biró A., Farkas I. (1997): Theoretical and empirical approaches to the use of PID control for climate environment, *Hungarian Agricultural Engineering*, Issue 10/1997, pp. 64-67., HU ISSN 0864-7410

15. Bouhal T., Fertahi S., Agrouaz Y., El Rhafiki T., Kousksou T., Jamil A. (2017): Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study, *Solar Energy*, Vol. 157, pp. 441-455., ISSN 0038-092X, DOI 10.1016/j.solener.2017.08.061
16. Butcher J. C. (2008): *Numerical methods for ordinary differential equations*, New York: John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-72335-7
17. Buzás J., Farkas I., Biró A., Németh R. (1998): Modelling and simulation aspects of a solar hot water system, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 48, Issue 1, pp. 33-46, ISSN 0378-4754, DOI 10.1016/S0378-4754(98)00153-0
18. Chen T. Y. (2002): Application of adaptive predictive control to a floor heating system with a large thermal lag, *Energy and Buildings*, 34(1), pp. 45-51., DOI 10.1016/S0378-7788(01)00076-7
19. Chen, S., Xu, H., & Zhao, Z. (2021): Modeling and optimization of novel ball valve with high adjustable ratio, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 190, 104299. DOI 10.1016/j.ijpvp.2020.104299
20. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. (2001): 3.1: Asymptotic notation, *Introduction to Algorithms* (2nd ed.). MIT Press and McGraw–Hill., ISBN 0-262-03293-7
21. Dequan S., Guili G., Zhiwei G., Peng X. (2012): Application of expert fuzzy PID method for temperature control of heating furnace, *Procedia Engineering*, Vol. 29, pp. 257-261., ISSN 1877-7058, DOI 10.1016/j.proeng.2011.12.703
22. Dormand J. R. (1996): *Numerical methods for differential equations: A computational approach*, Boca Raton, ISBN 0-8493-9433-3
23. Dormand J. R., Prince P. J. (1980): A family of embedded Runge-Kutta formulas, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 6, pp 19-26, ISSN 0377-0427, DOI 10.1016/0771-050X(80)90013-3
24. Douglas B., *The Fundamentals of Control Theory*, p. 8.
25. Duddeti B. B., Naskar, A. K. (2024): A new method for model reduction and controller design of large-scale dynamical systems. *Sādhanā*, 49(2), p. 164., DOI 10.1007/s12046-024-02451-w
26. EU (2019): COMMISSION RECOMMENDATION (EU) 2019/1659 comprehensive assessment of the potential for efficient heating and cooling under Article 14
27. Fahrenbruch A., Bube R. (1983): *Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion*, Elsevier, pp. 9-10, ISBN 0-12-247680-8
28. Farkas I. (1999): *Számítógépes szimuláció*, Egyetemi jegyzet
29. Farkas I. (2003): *Napenergia a mezőgazdaságban*, Mezőgazda Kiadó, ISBN 963-935-891-6
30. Farkas I. (2017): *Folyamatirányítás I.*, Egyetemi jegyzet
31. Farkas I., (2011): *Folyamatirányítás II.*, Szent István Egyetemi Kiadó, pp. 53-57
32. Farkas I., Vajk I. (2005): Internal model-based controller for solar plant operation, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 49, Issue 3, pp. 407-418., ISSN 0168-1699, DOI 10.1016/j.compag.2005.08.004

33. Fath H. E. (1998): Technical assessment of solar thermal energy storage technologies, Renewable Energy, Vol. 14, Issue 1-4, pp. 35-40., ISSN 0960-1481, DOI 10.1016/S0960-1481(98)00044-5
34. Gerhartz J., Scholz D. (2001): Closed-Loop Pneumatics, Festo Didactic, Derkendorf
35. Grewal M. S., Andrews A. P. (2014): Kalman filtering: Theory and Practice with MATLAB, John Wiley & Sons, ISBN 978-1-118-85121-0
36. Guney A., Cakir O. (2025): Design and Real-Time Control of an Electric Furnace with Three-Dimensional Heating, Electronics, 14(3), 602. DOI 10.3390/electronics14030602
37. Gyeveiki J. (2007): Szervopneumatikus pozicionálás pontosságának növelése DSP-alapú csúszómód szabályozással, PhD-disszertáció, Interdiszciplináris Agrár- és Természettudományok Doktori Iskola, Debreceni Egyetem
38. Hamel P. (1979): Parameter Identification, Agard Lecture Series, p. 3., ISBN 92-835-1340-1
39. Horánszky B. (2005): A termikus napenergia-felhasználás alkalmazási lehetőségei, Workshop jelentés, OTKA T-046224, Miskolc
40. Horváth J. (2011): Megújuló energia, Egyetemi jegyzet, TÁMOP 4.2.5
41. Hossain E. (2022): MATLAB and Simulink Crash Course for Engineers, ISBN 978-3-030-89761-1
42. Huba A., Aradi P., Czmerk A., Lakatos B., Chován T., Varga T. (2014): Mechatronikai berendezések tervezése, Budapest, TÁMOP 4.1.2
43. Jahangir M. H., Montazeri M., Mousavi S. A., Kargarzadeh A. (2022): Reducing carbon emissions of industrial large livestock farms using hybrid renewable energy systems, Renewable Energy, 189, pp. 52-65., DOI 10.1016/j.renene.2022.02.022
44. Jiang C., Xie G., Wu D., Yan T., Chen S., Zhao P., Li W. (2021): Experimental investigation on an energy-efficient floor heating system with intelligent control: A case study in Chengdu, China, Case Studies in Thermal Engineering, 26, 101094. DOI 10.1016/j.csite.2021.101094
45. Johnson J. S., Aardsma M. A., Duttlinger A. W., Kpodo K. R. (2018): Early life thermal stress: impact on future thermotolerance, stress response, behavior, and intestinal morphology in piglets exposed to a heat stress challenge during simulated transport, Journal of Animal Science, Vol. 96, Issue 5, pp. 1640-1653., DOI 10.1093/jas/sky107
46. Kalechman M. (2018): Practical MATLAB for Engineers - 2 Volume Set ISBN 1482281295
47. Kalman R. E. (1960): A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Trans. of the ASME - Journal of Basic Engineering, pp. 35-45., DOI 10.1115/1.3662552
48. Kalogirou S. A. (2004): Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, Issue 3, pp. 231-295., ISSN 0360-1285, DOI 10.1016/j.peccs.2004.02.001
49. Keçebaş A., Alkan M. A., Bayhan M. (2011): Thermo-economic analysis of pipe insulation for district heating piping systems, Applied Thermal Engineering, Vol. 31, Issue 17-18, pp. 3929-3937., ISSN 1359-4311, DOI 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.042

50. Keviczky L., Bars R., Hetthéssy J., Bányász C. (2019): Control Engineering: MATLAB Exercises, Springer, Singapore, pp. 1-27., ISBN 978-981-10-8320-4
51. Konecsny F. (2011): Irányítástechnika, Egyetemi jegyzet, TAMOP 4.2.5
52. Kopp G., Lean J. L. (2011): A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance, *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, Issue 1, DOI 10.1029/2010GL045777
53. Korondi P. (2017): Csúszómód-szabályozás a teljesítményelektronikában és mechatronikában, Akadémiai Kiadó, ISBN 978 963 454 100 4
54. Korondi P., & Gyeviki J. (2006): Robust position control for a pneumatic cylinder, In 2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 513-518, DOI 10.1109/EPEPMC.2006.4778451
55. Kull T. M., Thalfeldt M., Kurnitski J. (2019): Estimating time constants for underfloor heating control, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1343, Issue 1, DOI 10.1088/1742-6596/1343/1/012121
56. Kyn M., Urban M. (2013): TRNSYS Software model of solar system with long-term storage, *Advanced Materials Research* Vol. 649, pp. 303-306., DOI 10.4028/www.scientific.net/amr.649.303
57. Lacoste B., Wolf A., Witzig A., Marklin A. (2010): Polysun: PV, Wind and power-heat cogeneration in one design tool, *Proceedings of the 5th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference*, pp. 269-276.,
58. Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E. (1998): Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, *SIAM Journal of Optimization*, Vol. 9, Number 1, 1998, pp. 112–147, DOI 10.1137/S1052623496303470
59. Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E. (1998): Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, *SIAM Journal of Optimization*, Vol. 9, Issue 1, pp. 112–147., DOI 10.1137/S1052623496303470
60. Lakoba T. I. (2012): Simple Euler method and its modifications, *Lecture notes*
61. Li X., Wang W., Ye L., Ren G., Fang F., Liu J., Zhou Q. (2024): Improving frequency regulation ability for a wind-thermal power system by multi-objective optimized sliding mode control design, *Energy*, 300, 131535. DOI 10.1016/j.energy.2024.131535
62. Lin T., Zhu Z., Li X., Li J., Lin Y. (2021): Theoretical, experimental, and numerical methods to predict the best efficiency point of centrifugal pump as turbine, *Renewable Energy*, Vol. 168, pp. 31-44., ISSN 0960-1481, DOI 10.1016/j.renene.2020.12.040
63. Liu Y., Nan X., Han H., Li J. (2024): The variable water temperature control strategy of the air-source heat pump compatible with floor heating system for an apartment, *Journal of Building Engineering*, 90, 109440. DOI 10.1016/j.job.2024.109440
64. Lofroth N. M. (2024): Matrix exponential integrator algorithm for accurate and efficient simulation of power converter systems, *Doctoral dissertation*, University of British Columbia, DOI 10.14288/1.0444167

65. Lu S., Gao J., Tong H., Yin S., Tang X., Jiang X. (2020): Model establishment and operation optimization of the casing PCM radiant floor heating system, *Energy*, Vol. 193, p. 116814., ISSN 0360-5442, DOI 10.1016/j.energy.2019.116814
66. Luke H. D. (1999): The origins of the sampling theorem, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 37, Issue 4, pp. 106-108. DOI 10.1109/35.755459
67. Ma'arif I., Iswanto, Nuryono A. A., Alfian R. I. (2019): Kalman filter for noise reducer on sensor readings., *Signal and Image Processing Letters*, pp. 50-61., ISSN 2714-6677
68. Magnolo F., Candel J., & Speelman S. (2024): Biomethane from manure in the RePowerEU: A critical perspective on the scale-up of renewable energy production from the livestock sector, *Energy Research & Social Science*, 118, 103793. DOI 10.1016/j.erss.2024.103793
69. Majdoul R., Touati A., Ouchatti A., Taouni A., Abdelmounim E. (2022): Comparison of backstepping, sliding mode and PID regulators for a voltage inverter, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 12, Issue 1, pp. 166-178., ISSN 2722-2578, DOI 10.11591/ijece.v12i1.pp166-178
70. Mammoli A., Vorobieff P., Barsun H., Burnett R., Fisher D. (2010): Energetic, economic and environmental performance of a solar-thermal-assisted HVAC system, *Energy and Buildings*, Vol. 42, Issue 9, pp. 1524-1535., ISSN 0378-7788, DOI 10.1016/j.enbuild.2010.03.023
71. Mardia K. V., Kent J.T., Bibby J.M. (1979): *Multivariate analysis*, ISBN 0-12-471252-5
72. Mathews J. H., Fink K. K. (2004): *Numerical methods using Matlab*, 4th Edition, Upper Saddle River, New Jersey, USA, ISBN 0-13-065248-2
73. Mizsey P. (2011): *Folyamatirányítási rendszerek*, Budapest, Typotex Kiadó, ISBN 978-963-2794-75-4
74. Mun H. S., Ahmed S. T., Islam M. M., Park K. J., Yang C. J. (2015): Retrofitting of a pig nursery with solar heating system to evaluate its ability to save energy and reduce environmental pollution, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, Vol. 8, Issue 4, pp. 235-240., ISSN 1881-8366, DOI 10.1016/j.eaef.2015.02.001
75. Muresan C. I., De Keyser R. (2022): Revisiting Ziegler–Nichols. A fractional order approach, *ISA Transactions*, Vol. 129, Part A, pp. 287-296., ISSN 0019-0578, DOI 10.1016/j.isatra.2022.01.017.
76. Nagle N. K., Saff E. B., Snider A. D. (2012): *Fundamentals of differential equations*, Pearson Education, ISBN 978-0321977069
77. Najjari B., Barakati M.S., Mohammadi A., Futohi M.J., Bostanian M. (2014): Position control of an electro-pneumatic system based on PWM technique and FLC, *ISA Transactions*, Vol. 53, pp. 647–657., ISSN 0019-0578, DOI 10.1016/j.isatra.2013.12.023
78. Okereke M., Keates S. (2018): *A brief introduction to MATLAB™*, Springer Tracts in Mechanical Engineering, pp. 27-45., DOI 10.1007/978-3-319-67125-3_2
79. Olemskoi I. V. (2005): A fifth-order five-stage embedded method of the Dormand–Prince type, *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*, Vol. 45, Issue 7, pp. 1181-1191., ISSN 0965-5425

80. Ortiz M., Barsun H., He H., Vorobieff P., Mammoli A. (2010): Modeling of a solar-assisted HVAC system with thermal storage, *Energy and Buildings*, Vol. 42, Issue 4, pp. 500-509., ISSN 0378-7788, DOI 10.1016/j.enbuild.2009.10.019
81. Páger Sz., Földi L., Géczi G. (2024): Comparative temperature and consumption data measurement of model buildings with different thermal time constants, *Thermal Science* Volume 28, Issue 2, Part C, pp. 1881-1891., ISSN: 0354-9836, DOI 10.2298/TSCI230604228P
82. Paluszek M., Thomas S. (2021): *MATLAB Recipes: A Problem-Solution Approach*, Second Edition, ISBN 978-1-4842-6123-1
83. Paraskevopoulos P. N. (2002): *Modern control engineering*, ISBN 978-0824789817
84. Paris B., Vandorou F., Tyris D., Balafoutis A. T., Vaiopoulos K., Kyriakarakos G., Papadakis G. (2022): Energy use in the EU livestock sector: A review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Applied Sciences*, 12(4), 2142. DOI 10.3390/app12042142
85. Petz E. (1996): *Bevezető irányítástechnikai alapismeretek*, Egységes főiskolai jegyzet
86. Poiseuille J.L.M. (1840): Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très-petits diamètres, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, pp. 961-965
87. Pribelszky Cs. (2012): *Megújuló energiák hasznosítása: a napenergia*, előadás, ELTE, Budapest
88. Prochazka A., Kingsbury N. G., Payner P. J. W., Uhlir J. (2013). Signal analysis and prediction, *Springer Science & Business Media*, pp. 163-164, DOI 10.1007/978-1-4612-1768-8_11
89. Rátkai M., Géczi G., Székely L. (2024): Investigation of the Hottel–Whillier–Bliss Model Applied for an Evacuated Tube Solar Collector, *Eng*, Vol. 5, Issue 4, pp. 3427-3438. DOI 10.3390/eng5040178
90. Raul A., Jain M., Gaikwad S., Saha S. K. (2018): Modelling and experimental study of latent heat thermal energy storage with encapsulated PCMs for solar thermal applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 143, pp. 415-428., ISSN 1359-4311, DOI 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.123
91. Réger M., Horváth R., Fábíán E. R., Réti T. (2024): Modelling the Impregnation of a Pressure-Tight Casting, *International Journal of Metalcasting*, pp. 1-11., DOI 10.1007/s40962-024-01272-1
92. Rodríguez-Hidalgo M. C., Rodríguez-Aumente P. A., Lecuona A., Legrand M., Ventas R. (2012): Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank, *Applied Energy*, Vol. 97, pp. 897-906., ISSN 0306-2619, DOI 10.1016/j.apenergy.2011.12.088
93. Roots W. K., Woods J. T. (1969): On-off control of thermal processes, *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, Vol. 2, pp. 136-146., ISSN: 2375-0502, DOI 10.1109/TIECI.1969.230431
94. Saleem A., Taha B., Tutunji T., Al-Qaisia A. (2015): Identification and cascade control of servo-pneumatic system using Particle Swarm Optimization, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 52. pp. 164-179., ISSN 1569-190X, DOI 10.1016/j.simpat.2015.01.007

95. Schaumann R., Xiao H., Mac V. V. (2009): Design of analog filters 2nd Edition, Oxford University Press, Inc., ISBN 978-0-19-537394-3
96. Shannon, C. E. (1949): Communication in the presence of noise, Proceedings of the IRE, Vol. 37, Issue 1, pp. 10-21., ISSN: 2162-6634, DOI 10.1109/JRPROC.1949.232969
97. Shumway R. H., Stoffer D. S. (2011): Time series analysis and its applications, pp. 319-404., Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-52452-8
98. Silvestri A., Coraci D., Brandi S., Capozzoli A., Borkowski E., Köhler J., Schlueter, A. (2024): Real building implementation of a deep reinforcement learning controller to enhance energy efficiency and indoor temperature control, Applied Energy, 368, 123447. DOI 10.1016/j.apenergy.2024.123447
99. Sommer T., Mennel S., Sulzer M. (2019): Lowering the pressure in district heating and cooling networks by alternating the connection of the expansion vessel, Energy, Vol. 172, pp. 991-996., ISSN 0360-5442, DOI 10.1016/j.energy.2019.02.010
100. Sontag E. D. (2013): Mathematical control theory: deterministic finite dimensional systems (Vol. 6), Springer Science & Business Media, p. 20. DOI 10.1007/978-1-4612-0577-7
101. Stoyan G. (2008): MATLAB -frissített kiadás- Numerikus módszerek, grafika, statisztika, eszköztárak, TypoTEX, ISBN 978-963-9548-49-7
102. Süli E., Mayers D. (2003): An introduction to numerical analysis, ISBN 0521-00794-1
103. Szabó I. (1994): Rendszer- és irányítástechnika, Műegyetemi Kiadó, pp.331-334
104. Thounthong P. (2011): Model based-energy control of a solar power plant with a supercapacitor for grid-independent applications, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, Issue 4, pp. 1210-1218., ISSN 0885-8969, DOI 10.1109/TEC.2011.2168400
105. Tian Y., Zhao C. Y. (2013): A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, Applied Energy, Vol. 104, pp. 538-553., ISSN 0306-2619, DOI 10.1016/j.apenergy.2012.11.051
106. Tóth J., (2013): Automatika, TERC Kereskedelmi és Szolgáltató Kft., ISBN 978-963-9968-57-8
107. Tóth J., Farkas I. (2018): Block-oriented simulation of solar thermal systems, 17th International Workshop for Young Scientists "BioPhys Spring 2018": Book of abstracts, ISBN 9788389969576
108. Tóth J., Farkas I. (2021): Predictive control of a solar thermal system via on-line communication with a meteorological database server, Időjárás, Vol. 125, Issue 2, pp. 211-227., ISSN 0324-6329, DOI 10.28974/idojaras.2021.2.3
109. Tóth L. (2021): EuroTier és EnergyDecentral – Hannover Állatjóléti és környezetvédelmi újdonságok, Mezőgazdasági Technika, pp. 4-7., ISSN 0026-1890
110. Tóth, J. (2021): Termikus napenergia-hasznosító rendszerek modellalapú szabályozása Doktori (PhD) értekezés, DOI: 10.54598/000250

111. Tryhuba, A., Hutsol, T., Česna, J., Tryhuba, I., Mudryk, K., Francik, S., ... & Oliinyk, R. (2025): Optimizing energy systems of livestock farms with computational intelligence for achieving energy autonomy, *Scientific Reports*, 15(1), 10777. DOI 10.1038/s41598-025-92836-6
112. Ulpiani G., Borgognoni M., Romagnoli A., Di Perna, C. (2016): Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building, *Energy and Buildings*, Vol. 116, pp. 116, 1-17., ISSN 0378-7788, DOI 10.1016/j.enbuild.2015.12.027
113. Vahidhosseini, S. M., Rashidi, S., Hsu, S. H., Yan, W. M., & Rashidi, A. (2024): Integration of solar thermal collectors and heat pumps with thermal energy storage systems for building energy demand reduction: A comprehensive review, *Journal of Energy Storage*, 95, 112568. DOI 10.1016/j.est.2024.112568
114. Varga P. (2017): A napenergia aktív hőhasznosítása – hazai és nemzetközi helyzetkép, *Magyar Tudomány*, Vol. 2017, No. 5., pp. 524-531, HU ISSN 0025-0325
115. Véghely T. (2012): Napenergia hasznosító berendezések (rendszerek), Egyetemi jegyzet, TAMOP-4.1.2.A/2-10/1
116. Wang, L., Guo, L., Ren, J., & Kong, X. (2022): Using of heat thermal storage of PCM and solar energy for distributed clean building heating: A multi-level scale-up research, *Applied Energy*, 321, 119345. DOI 10.1016/j.apenergy.2022.119345
117. Woolfson M. (2000): The origin and evolution of the solar system, *Astronomy & Geophysics*, Vol. 41, Issue 1. pp 1.12–1.19., ISSN 1366-8781, DOI 10.1046/j.1468-4004.2000.00012.x
118. Xie Q., Ni J.Q., Bao J., Su Z. (2019): A thermal environmental model for indoor air temperature prediction and energy consumption in pig building. *Building and Environment*, Vol. 161, p. 106238., ISSN 0360-1323, DOI 10.1016/j.buildenv.2019.106238
119. Xue D. (2022): Modeling and simulation with Simulink®: For engineering and information systems, ISBN 3110734958
120. Yu X., Ren Z., Liu P., Imsland L., Georges L. (2024): Comparison of time-invariant and adaptive linear grey-box models for model predictive control of residential buildings, *Building and Environment*, 254, 111391. DOI 10.1016/j.buildenv.2024.111391
121. Yu, J., Sun, C., Zhao, J., Ma, L., Zheng, W., Xie, Q., & Wei, X. (2025): Prediction and control of greenhouse temperature: Methods, applications, and future directions, *Computers and Electronics in Agriculture*, 237, 110603. DOI 10.1016/j.compag.2025.110603
122. Zhang Z., Yang X., Wang W., Chen K., Cheung N. C., Pan J. (2024): Enhanced sliding mode control for PMSM speed drive systems using a novel adaptive sliding mode reaching law based on exponential function, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(10), pp.11978-11988, DOI 10.1109/TIE.2023.3347845
123. Zhao, Z., Liu, Y., Gao, X., & Tong, S. (2024): Design of a high-precision linear regulating ball valve, *Flow Measurement and Instrumentation*, 100, 102708. DOI 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102708

124. Zheng Y., Zheng J., Shao K., Zhao H., Man Z., Sun Z. (2024): Adaptive fuzzy sliding mode control of uncertain nonholonomic wheeled mobile robot with external disturbance and actuator saturation, *Information Sciences*, 663, 120303. DOI 10.1016/j.ins.2024.120303

Internetes források

125. Központi Statisztikai Hivatal “ksh.hu” (2024): 2024.08.27. [Online]. Elérhető: https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0114.html
126. MathWorks, “mathworks.com,” (2024a): 2024.07.09. [Online]. Elérhető: <https://nl.mathworks.com/help/hydro/ref/centrifugalpump.html>
127. MathWorks, “mathworks.com,” (2024b): 2024.04.10. [Online]. Elérhető: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/ballvalveil.html>
128. Simulink User’s Guide, (2023): 2023.09.24 [Online]. Elérhető: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405443232/sl_using_r2015a.pdf
129. Toshinori K. (2009): On Dormand-Prince Method, 2024.01.17. [Online]. Elérhető: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/DormandPrince_19856.pdf
130. Kormányrendelet „kormany.hu” (2023): 2023.11.25. [Online]. Elérhető: <https://kormany.hu/dokumentumtar/a-sertes-agazat-reszere-nyujtott-allatjoleti-tamogatasok-modositasa>
131. Mayr O. (1970): The Origins of Feedback Control. *Scientific American*, vol. 223, no. 4, pp. 110–19, [Online] 2025.08.29 Elérhető: <http://www.jstor.org/stable/24927641>

9.2. M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk

Lektorált idegen nyelvű tudományos cikk

1. **Erdélyi V.**, Tóth J., Buzás J., Földi L., Székely L., Farkas I. (2025): New Cross-Section Model for full Bore Ball-Valves, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, IF 1.0, DOI 10.3311/PPme.40915
2. Alshibil A., Víg P., **Erdélyi V.**, Tóth J., Farkas I. (2024): Performance Assessments of Direct Contact Serpentine Tube Based Photovoltaic Thermal Module: An Experimental Comparison, *Journal of Engineering and Sustainable Development*, Vol. 28, Issue 4., pp. 473-479., ISSN 2520-0925, DOI 10.31272/jeasd.28.4.6, Q3, SJR 0.16
3. **Erdélyi V.**, Buzás J., Földi L. (2020): The use of solar thermal systems in piglet nurseries, *Mechanical Engineering Letters: R and D: Research and Development*, Vol. 20, pp. 73-79.
4. Erdelyi V., Toth J., Janosi L., & Farkas I. (2020). Modelling experiments with small-scale thermal system used for pig fattener heating. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 749, No. 1, p. 012034). IOP Publishing, DOI 10.1088/1757-899X/749/1/012034
5. **Erdélyi V.**, Tóth J., Jánosi L., Farkas, I. (2019): Experimental results of a small-scale thermal system, *Mechanical Engineering Letters: R and D: Research and Development*, Vol. 18, pp. 7-16.

6. **Erdélyi V., Jánosi L.**, (2019): Digital Twin and Shadow in Smart Pork Fatteners, International Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények Vol. 4, Issue 1., pp. 515-520. DOI 10.21791/IJEMS.2019.1.63
7. **Erdélyi V., Jánosi L.** (2017): Model based optimization in smart livestock farming: an introduction, Mechanical Engineering Letters: R and D: Research and Development, Vol. 15, pp. 164-172.
8. **Erdélyi V., Jánosi L.** (2015): Agriculture 4.0 or the complex optimization of agricultural tasks based on the experience of industry 4.0, Mechanical Engineering Letters: R and D: Research and Development, Vol. 13, pp. 7-13.

Lektorált cikk magyar nyelven

9. **Erdélyi V., Földi L., Buzás J.** (2021): Folyadék munkaközegű fűtőlápok szabályozása az állatjóléti komfort biztosítására, Energiagazdálkodás Vol. 62, Issue 2-3, pp. 23-27.
10. **Tóth J., Erdélyi V., Jánosi L., Farkas I.** (2019): Termikus napenergia-hasznosító rendszer kismintamodelljének identifikációja, Magyar Energetika, Vol. 26, Issue 4, pp. 18-23.

Nemzetközi konferencia proceedings

11. **Erdélyi V., Toth J., Janosi L., Farkas I.** (2020): Modelling experiments with small-scale thermal system used for pig fattener heating, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 749, Paper: 012034, pp. 1-8.
12. **Erdélyi V., Jánosi L.** (2018): Model based optimization of pork fatteners, Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018): Book of extended abstracts, Debrecen, Magyarország: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen (2018), Vol. 238, pp. 47-48.
13. **Erdélyi V., Jánosi L.** (2016): Mechatronics in agriculture, CEurSIS 2016: The International Conference of the Carpathian Euro-Region's Specialists in Industrial Systems. 11th Edition – Proceedings, Cluj-Napoca, Románia: Editura U.T. Press, pp. 75-79.
14. **Erdélyi V., Jánosi L.** (2016): Smart livestock farming in the footsteps of industry 4.0, Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016), Debrecen, Magyarország: University of Debrecen Faculty of Engineering, Vol. 654, pp. 167-172.

Nemzetközi konferencia abstract

15. Tóth J., **Erdélyi V.**, Farkas I., Jánosi L. (2019): Hardware-in-the-loop control of a small-scale thermal system, BioPhys Spring 2019 - 18th International Workshop for Young Scientists, Gödöllő, Magyarország: Szent István Egyetem Vol. 50. p. 40.
16. Tóth J., **Erdélyi V.**, Jánosi L., Farkas I. (2019): On-off and PID control of a small-scale solar system, 25th Workshop on Energy and Environment, Book of Abstracts, Gödöllő, Magyarország: Szent István Egyetem, Fizika és Folyamatirányítás Tanszék Vol. 34, p. 21.

9.3. M3: Az ET fojtó modell levezetése

A következőkben az új, geometriailag helyes modell matematikai levezetését mutatom be.

A q egyszerűsítése:

$$\begin{aligned}
 q(\varphi, r, R) &= -R \cos \left(90^\circ + \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi \right) \\
 &\quad - \frac{1}{2} R \left(\cos \left(90^\circ + \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi - 2 \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) \right) \right. \\
 &\quad \left. - \cos \left(90^\circ + \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi \right) \right) \\
 &= -\frac{1}{2} R \left(\cos \left(90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi \right) + \cos \left(90^\circ + \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi \right) \right) \\
 &= -\frac{1}{2} R \left(\sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) + \varphi \right) - \sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi \right) \right) \\
 &= -\frac{1}{2} R \left(\sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) \right) \cos \varphi + \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) \right) \sin \varphi \right. \\
 &\quad \left. - \sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) \right) \cos \varphi + \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) \right) \sin \varphi \right) \\
 &= -R \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) \right) \sin \varphi \\
 &= -R \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2} \sin \varphi \\
 &= -\sqrt{R^2 - r^2} \sin \varphi
 \end{aligned}$$

Az r_e egyszerűsítése a q mintájára:

$$\begin{aligned}
 r_e(\varphi, r, R) &= \frac{1}{2} R \left(\cos \left(90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi \right) - \cos \left(90^\circ + \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) - \varphi \right) \right) \\
 &= r \cos \varphi
 \end{aligned}$$

C_{1x} egyszerűsítése:

$$\begin{aligned}
 C_{1x}(\varphi, r, R) &= -\sqrt{r^2 - \left(\frac{p(\varphi, r, R) r}{r_e(\varphi, r, R) + r} \right)^2} \\
 &= -\sqrt{r^2 - \left(\frac{-r\sqrt{R^2 - r^2} \sin \varphi}{r \cos \varphi + r} \right)^2} \\
 &= -\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \left(\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi + 1} \right)^2} \\
 &= -\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}}
 \end{aligned}$$

A C_{2x} egyszerűsítése, C_{1x} alapján:

$$C_{2x}(\varphi, r, R) = \sqrt{r^2 - \left(\frac{p(\varphi, r, R) r}{r_e(\varphi, r, R) + r} \right)^2}$$

$$= \sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}}$$

Az A_f zárt alakjának levezetése:

$$\begin{aligned}
 A_f(\varphi, r, R) &= \int_{C_{1x}(\varphi, r, R)}^{C_{2x}(\varphi, r, R)} q(\varphi, r, R) + \sqrt{\frac{r^2 r_e(\varphi, r, R)^2 - x^2 r_e(\varphi, r, R)^2}{r^2}} + \sqrt{r^2 - x^2} \, dx \\
 &= \int_{C_{1x}(\varphi, r, R)}^{C_{2x}(\varphi, r, R)} q(\varphi, r, R) + \frac{r_e(\varphi, r, R)}{r} \sqrt{r^2 - x^2} + \sqrt{r^2 - x^2} \, dx \\
 &= \int_{C_{1x}(\varphi, r, R)}^{C_{2x}(\varphi, r, R)} q(\varphi, r, R) + \left(\frac{r_e(\varphi, r, R)}{r} + 1 \right) \sqrt{r^2 - x^2} \, dx \\
 &= q(\varphi, r, R) (C_{2x}(\varphi, r, R) - C_{1x}(\varphi, r, R)) \\
 &\quad + \left(\frac{r_e(\varphi, r, R)}{r} + 1 \right) \int_{C_{1x}(\varphi, r, R)}^{C_{2x}(\varphi, r, R)} \sqrt{r^2 - x^2} \, dx \\
 &= 2q(\varphi, r, R) C_{2x}(\varphi, r, R) + (r_e(\varphi, r, R) + r) \int_{C_{1x}(\varphi, r, R)}^{C_{2x}(\varphi, r, R)} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{r} \right)^2} \, dx \\
 &= 2q(\varphi, r, R) C_{2x}(\varphi, r, R) \\
 &\quad + (r_e(\varphi, r, R) + r) \int_{\sin^{-1}\left(\frac{C_{1x}(\varphi, r, R)}{r}\right)}^{\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)} \sqrt{1 - \sin^2 t} \, r \cos t \, dt \\
 &= 2q(\varphi, r, R) C_{2x}(\varphi, r, R) + (r_e(\varphi, r, R) + r) r \int_{\sin^{-1}\left(\frac{C_{1x}(\varphi, r, R)}{r}\right)}^{\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)} \cos^2 t \, dt \\
 &= 2q(\varphi, r, R) C_{2x}(\varphi, r, R) + (r_e(\varphi, r, R) + r) r \int_{\sin^{-1}\left(\frac{C_{1x}(\varphi, r, R)}{r}\right)}^{\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)} \frac{1 + \cos 2t}{2} \, dt \\
 &= 2q(\varphi, r, R) C_{2x}(\varphi, r, R) + (r_e(\varphi, r, R) + r) r \left[\frac{t}{2} + \frac{\sin 2t}{4} \right]_{\sin^{-1}\left(\frac{C_{1x}(\varphi, r, R)}{r}\right)}^{\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2q(\varphi, r, R)C_{2x}(\varphi, r, R) \\
 &\quad + (r_e(\varphi, r, R) + r)r \left(\frac{\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{C_{1x}(\varphi, r, R)}{r}\right)}{2} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\sin\left(2\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)\right) - \sin\left(2\sin^{-1}\left(\frac{C_{1x}(\varphi, r, R)}{r}\right)\right)}{4} \right) \\
 &= 2q(\varphi, r, R)C_{2x}(\varphi, r, R) \\
 &\quad + (r_e(\varphi, r, R) + r)r \left(\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right) + \frac{\sin\left(2\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)\right)}{2} \right) \\
 &= 2q(\varphi, r, R)C_{2x}(\varphi, r, R) \\
 &\quad + (r_e(\varphi, r, R) + r)r \left(\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right) \right. \\
 &\quad \left. + \sin\left(\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)\right) \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)\right) \right) \\
 &= 2q(\varphi, r, R)C_{2x}(\varphi, r, R) \\
 &\quad + (r_e(\varphi, r, R) + r)r \left(\sin^{-1}\left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{C_{2x}(\varphi, r, R)}{r}\right)^2} \right) \\
 &= -2\sqrt{R^2 - r^2} \sin \varphi \sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \\
 &\quad + (r \cos \varphi + r)r \left(\sin^{-1}\left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}}\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}}}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2) \tan^2 \frac{\varphi}{2}}}{r}\right)^2} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -2\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\sin\varphi \\
&\quad + (\cos\varphi + 1)r^2\left(\sin^{-1}\left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\right)\right. \\
&\quad \left.+ \frac{\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}}{r}\sqrt{1 - \frac{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}{r^2}}\right) \\
&= -2\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\sin\varphi \\
&\quad + (\cos\varphi + 1)r^2\sin^{-1}\left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\right) \\
&\quad + (\cos\varphi + 1)r^2\frac{\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}}{r}\sqrt{1 - \frac{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}{r^2}} \\
&= -2\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\sin\varphi \\
&\quad + (\cos\varphi + 1)\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\sqrt{r^2 - (r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})} \\
&\quad + r^2(\cos\varphi + 1)\sin^{-1}\left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\right) \\
&= -2\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\sin\varphi \\
&\quad + (\cos\varphi + 1)\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\sqrt{(R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}} \\
&\quad + r^2(\cos\varphi + 1)\sin^{-1}\left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\right) \\
&= -2\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\sin\varphi \\
&\quad + (\cos\varphi + 1)\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\tan\frac{\varphi}{2} \\
&\quad + r^2(\cos\varphi + 1)\sin^{-1}\left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\right) \\
&= -2\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\sin\varphi \\
&\quad + \sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\sin\varphi \\
&\quad + r^2(\cos\varphi + 1)\sin^{-1}\left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\right) \\
&= -\sqrt{(R^2 - r^2)(r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2})}\sin\varphi \\
&\quad + r^2(\cos\varphi + 1)\sin^{-1}\left(\sqrt{r^2 - (R^2 - r^2)\tan^2\frac{\varphi}{2}}\right)
\end{aligned}$$

10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőimnek, dr. Földi Lászlónak és dr. Buzás Jánosnak, hogy a disszertációm írásában hathatós segítséget nyújtottak, időt és fáradságot nem kímélve ellenőrizték és segítettek a munkám.

Külön köszönöm dr. Jánosi Lászlónak, hogy bevont a PhD oktatásba és hogy elindított ezen az úton.

Köszönöm továbbá dr. Tóth János kollégámnak, hogy a felmerülő szimulációs problémáimmal kapcsolatban mindig számíthattam rá.

Szintén köszönet illeti dr. Székely Lászlót, aki a matematika nehézségeivel segített megküzdennem.

Köszönöm ezen kívül dr. Kalácska Gábornak és a volt GÉTI minden kollégájának, akik az IPMP-k alkalmával hasznos tanácsokkal, illetve építő kritikával segítettek.

Köszönöm feleségemnek, Radevszki Mónikának, hogy támogatott a rögzös úton, és gyermekeimnek, Lilinek, Viktornak és Andrásnak, hogy a fárasztó napok után mindig felvidítottak.

Köszönöm szüleimnek, dr. Kőbányai Ritának és Erdélyi Viktornak, hogy elindítottak a felsőoktatásban és anyagilag, valamint erkölcsileg támogatták tanulmányaimat.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm Opponenseim munkáját, akik korrekt, konstruktív módon elemezték a munkám, fáradságot nem kímélve támogatták a doktori fokozatszerzésemet.

Gödöllő, 2025.