



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

Folyadék munkaközegű fűtőlapok
hőmérséklet szabályozása

Doktori (PhD) értekezés tézisei
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.....	2
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	3
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....	3
1.2. Célkitűzések.....	3
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	5
2.1. Blokkorientált modellezés	5
2.2. Kisminta modell.....	5
2.3. Modell identifikáció és validáció.....	6
3. EREDMÉNYEK.....	8
3.1. Szimulációs keretrendszer	8
3.2. ET fojtómodell.....	9
3.3. Céltértékfüggvény szabályozási algoritmusok és stratégiák egységes optimalizálására és összehasonlítása	11
3.4. Módosított csúszómód-szabályozó	13
3.5. Kombinált szabályozási algoritmus	14
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	15
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	19
6. ÖSSZEFOGLALÁS	20
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	22

JELÖLÉSJEGYZÉK

A_f	fojtási keresztmetszet (javított modell)	[m ²]
b_1	módosított csúszófelület 1. paramétere	[1/°C]
b_2	módosított csúszófelület 2. paramétere	[-]
b_3	módosított csúszófelület 3. paramétere	[s/°C]
E_C	kumulált energiafelhasználás	[J]
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	mérési adat száma	[-]
p_j	paraméterek	[-]
PV	szabályozott jellemző	[°C]
r	golyóscsap golyófuratának sugara	[m]
R	golyóscsap golyójának sugara	[m]
s	csúszófelület	[-]
SP	alapjel	[°C]
$\check{y}$	mérési eredmény	[°C]
$\hat{y}$	szimuláció eredménye	[°C]
ε	szabályozási hiba	[°C]
τ	idő	[s, h]
τ_0	identifikáláshoz / optimalizáláshoz használt időtartomány kezdete	[s]
τ_1	identifikáláshoz / optimalizáláshoz használt időtartomány vége	[s]
φ	a golyóscsap záróelem szögelfordulása	[°]
ω_1	az új kritériumfüggvény 1. súlyfaktora	[1/Js]
ω_2	az új kritériumfüggvény 2. súlyfaktora	[1/°C ² s]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a fejezetben a téma jelentőségét és aktualitását fogalmazom meg, illetve a munkám célkitűzéseit mutatom be.

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Napjainkban rendkívül fontos, hogy megfelelő mennyiségű és minőségű húst tudjunk előállítani. Emiatt az állattartás nagyüzemi szinten kell történnjen. 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, 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.

1.2. Célkitűzések

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

Célom egy fűtése segítő 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 (állásos, PID, csúszómód, módosított csúszómód), különböző beavatkozószervek (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 rendszer részegységeinek matematikai modellezése.
3. A matematikai modellek alapján blokkorientált szimulációs keretrendszer elkészítése.
4. A vizsgálandó szabályozási algoritmusok és stratégiák meghatározása, modellbe illesztése.
5. A szabályozási algoritmusok optimalizálásához, valamint minősítéséhez egységes szempontrendszer felállítása, a szempontok alapján az optimalizációt lehetővé tevő módszer és kritériumfüggvény meghatározása.
6. Szabályozók egységes szempontrendszer szerinti optimalizálása.
7. A szabályozási algoritmusok és stratégiák komplex, technológiai szemléletű összehasonlítása.

2. 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.

2.1. 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.

A rendszer tartalmazza azokat az alapvető egységeket, amelyekből egy a napenergia-hasznosító rendszert leíró matematikai modellek felépíthetők, amik túlnyomó többségükben közönséges differenciálegyenletek. A Simulink rendszer tartalmazza a numerikus megoldáshoz elterjedten alkalmazott algoritmusokat, mint például a Runge–Kutta vagy a Dormand–Prince, vagyis tökéletes választás a dolgozatban kitűzött célok megvalósításához.

2.2. Kisminta modell

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

A fűtőlap szerepét egy hőcserélővel ellátott 30 l térfogatú, szigeteletlen, de a padozattól szigeteléssel elválasztott polipropilén tartály töltötte be. A hőtároló, illetve hőközlő közeg anyaga itt is víz.

A szabályozószelepként használt golyóscsap típusa: ARCO ½" KB.

A nyomásviszonyok vizsgálatához használt nyomásmérőket a körfolyamatba épített fojtószelep bemeneti és kimeneti oldalán helyeztem el.

2. Anyag és módszer

A nyomásérzékelő kimenetének kalibrálását 1 m-es vízoszlop segítségével, a hitelesítést pedig kalibrált Bourdon-csöves manométerrel végeztem.

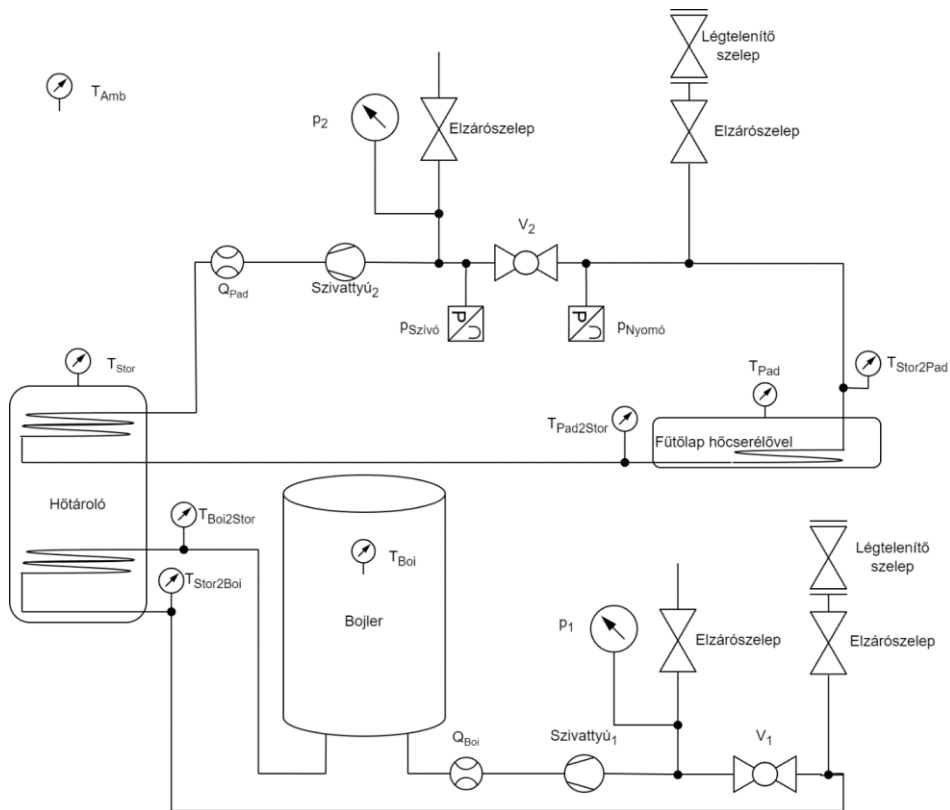
A vízkörökben a térfogatáram mérésére egy kalibrált, impulzus kimenettel rendelkező axiális turbina típusú térfogatárammérő készüléket használtam.

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

A felvett villamos teljesítenyeket fogyasztásmérővel mértem.

A hőmérsékletet több ponton elhelyezett kalibrált hőmérőszensorokkal mértem.

Az 1. ábra mutatja a kísérleti berendezés sematikus vázlatát.



1. ábra A kismintamodell blokkvázlata

2.3. Modell identifikáció és validáció

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:

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

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

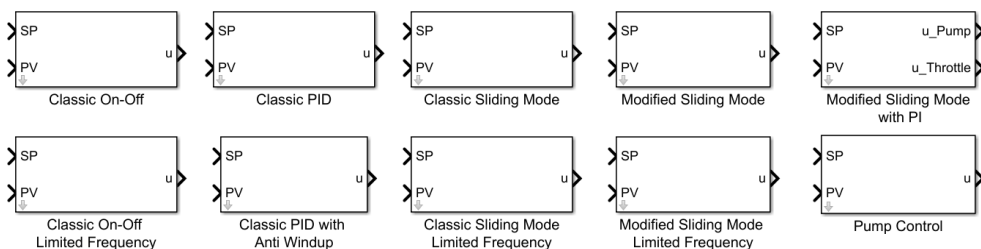
$$\min_{p_1, p_2, \dots, p_j} J_{\varepsilon max}(p_1, p_2, \dots, p_j) \rightarrow p_1, p_2, \dots, p_j$$

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetem a kutatásom során elért eredményeket, amelyek folyadék munkaközegű fűtőlapok hőmérséklet szabályozásának energiahatékony megvalósításához nyújtanak segítséget.

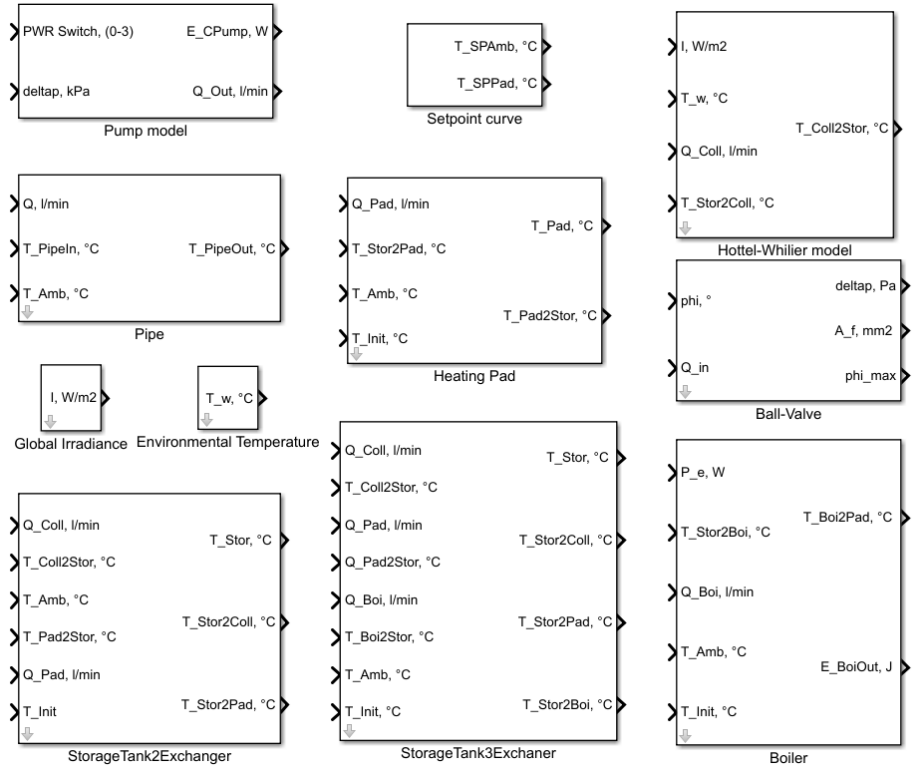
3.1. Szimulációs keretrendszer

A szimulációs keretrendszer kifejezetten napenergia termikus hasznosítását végző rendszerek blokkorientált modellezéséhez készült. A rendszer tartalmazza a szakirodalom tanulmányozása során megismert matematikai modelleket, amik egy termikus napenergia-hasznosító rendszert felépítő részegységeket írnak el. A fejlesztett rendszer nyílt architektúrával rendelkezik, amely lehetővé teszi a modellek utólagos módosítását és elemzését, ezáltal releváns kutatási és oktatási alkalmazások számára. Blokkorientált felépítése elősegíti a flexibilis szimulációs eljárások implementálását. A rendszer tervezésének egyik alapvető célkitűzése a bővíthetőség biztosítása volt, amely magában foglalja mind a szakirodalomban megtalálható, mind új modellek integrálását. Az új keretrendszer az alapvető napenergiahasznosító komponenseken felül tartalmaz egy három hőcserélőt tartalmazó hőtároló modellt, a csövek hővesztését megadó modellt, keringtetőszivattyúmodellt, egy továbbfejlesztett gömbcsapmodellt, melynek segítségével lehetőség nyílik a folytonos szabályozás ilyen beavatkozóval történő szimulációjára, illetve egy fűtőlapmodellt. A keretrendszer része még több, iparban is használt szabályozóalgoritmus, egy módosított csúszómód-szabályozó, mely robosztusságot kölcsönöz a rendszernek változó munkapont esetén, illetve egy komplex szabályozási algoritmus is, mely a szivattyú és fojtószelepek állításával robosztus módon, de a csúszómód-szabályozóra jellemző csattogás nélkül képes energiahatékony szabályozást megvalósítani. A modellkönyvtár elemeit a 2-4 ábrák mutatják be.

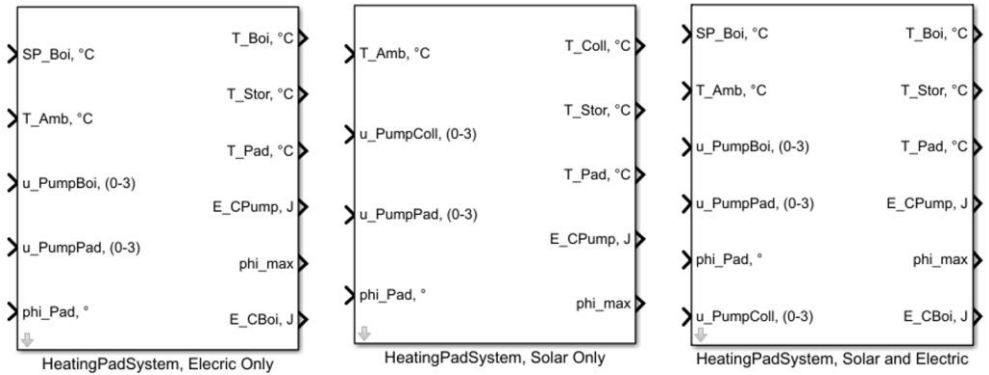


2. ábra A kiegészített keretrendszer szabályozói

3. Eredmények



3. ábra A kiegészített keretrendszer modellkönyvtára



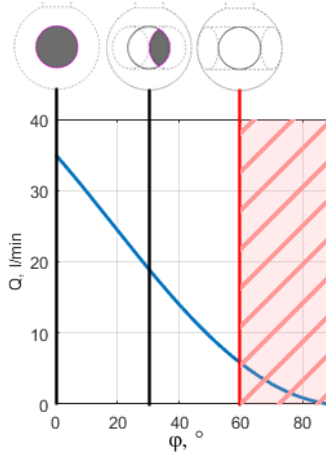
4. ábra Csak villamos, csak termikus napenergiás és kombinált rendszerek modelljei

3.2. ET fojtómodell

A régi rendszerek átalakíthatósága érdekében az ilyen rendszerekben a fűtőlapok elzárószerelvényeként alkalmazott gömbcsapok folytonos szabályozóként, kvázi fojtószelepként alkalmazása érdekében a gömbcsap áramlási keresztmetszetét a záróelem szögelfordulás függvényében megadó

3. Eredmények

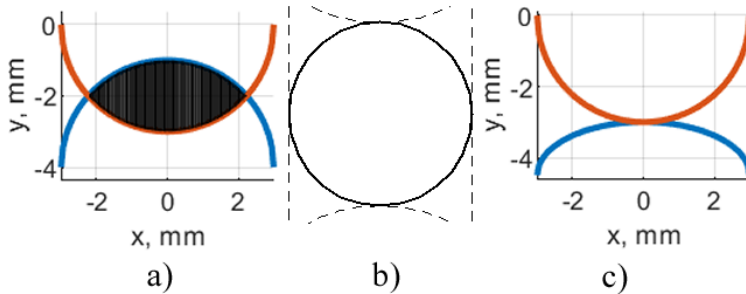
új, pontosabb modellre volt szükség. Létezik ugyan a MATLAB Simscape programcsomagjában egy modell, a *Ball Valve (IL)* izotermikus folyadék hálózatokban alkalmazható golyóscsap blokkban, de az az áramlási keresztmetszet alakulását két kör, a golyó furat és a golyóscsap golyófészek csatlakozónyílás átfedő körök területével közelíti. A problémát a 5. ábra szemlélteti



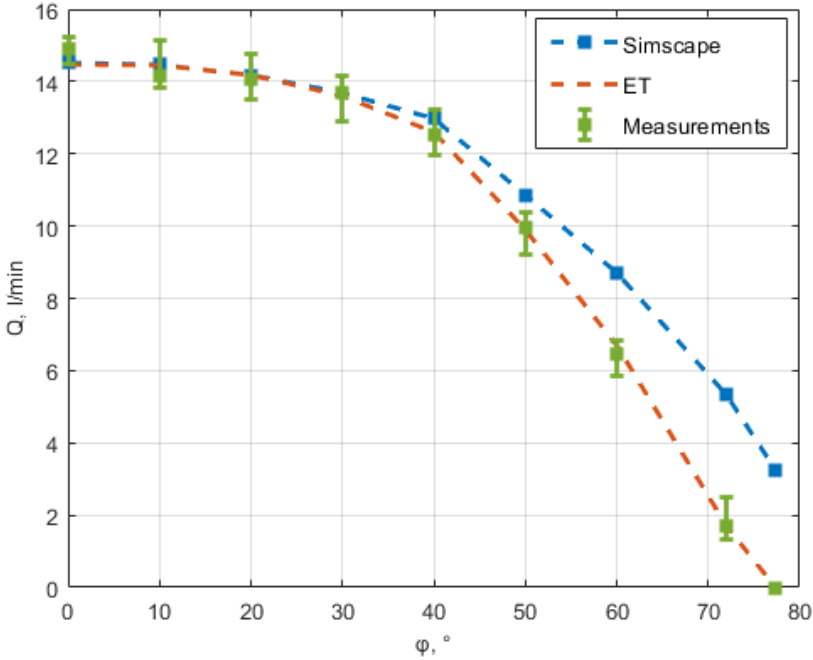
5. ábra A Simscape modell golyóscsap térfogatáram számítás pontatlansága a záróelem szögelfordulás függvényében

Az újonnan felállított ET-modell geometriai alapon nyugvó, white box modell, melyet CAD szoftverrel (6. ábra) és mérésekkel (7. ábra) validáltam. Az összefüggés zárt formája az áramlási keresztmetszet felületét leíró egyenlet a következő:

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



6. ábra A Simscape modell a CAD modell és az ET-modell összehasonlítása



7. ábra Mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása

3.3. Célértékfüggvény szabályozási algoritmusok és stratégiák egységes optimalizálására és összehasonlítása

A szabályozások energiafelhasználását és minőségi jellemzőit együttesen figyelembe vevő kvantitatív szám (J_{EQ}), melyet jósági tényezőnek is nevezhetünk. Az optimalizálás a

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

összefüggéssel történt. Az összehasonlíthatóság miatt egy napos szimulációk eredményét mutatom be az 1. táblázat segítségével. A szempontrendszer szerint, az a szabályozás jobb, melynek ez a kvantitatív mutatója alacsonyabb.

3. Eredmények

1. 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	$1,528 \cdot 10^4$	$1,351 \cdot 10^5$

Az adatokból látszik, hogy habár a kombinált módosított csúszómód szabályozás minőségi jellemzőjét (J_Q) tekintve alulmarad az kétállású szabályozón és anti-windup nélküli PI szabályozókon 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.

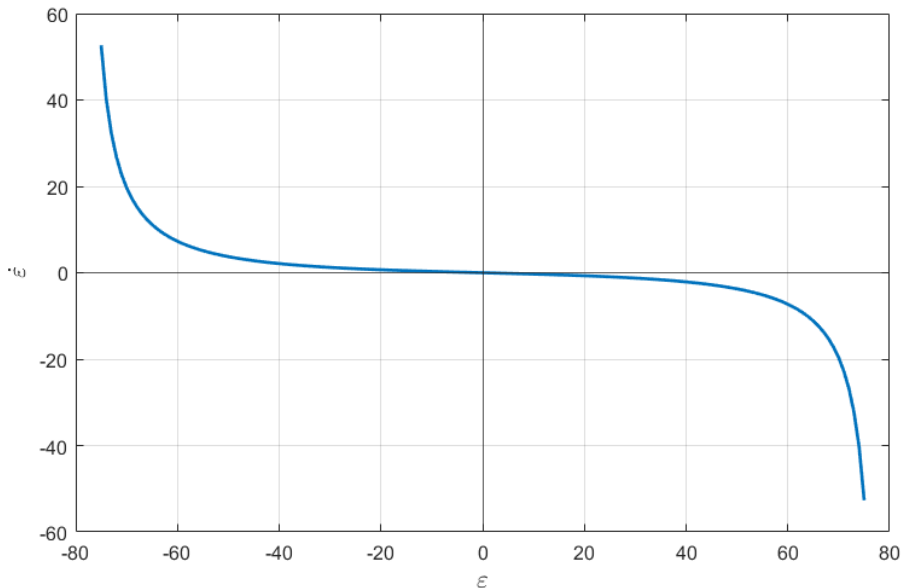
Ha összevetjük a napenergiával támogatott rendszer által alkalmazott kombinált szabályozót és az elterjedt, kétállású szabályozót, melynek a hibája $e_{max} = \pm 1,59 \text{ } ^\circ\text{C}$, láthatjuk, hogy szignifikáns különbség van a két szabályozó minősége közt, energiafelhasználás tekintetében 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 2300 átlagos háztartás éves villamosenergia-szükségletével, illetve 1'782'720 kg kibocsátott széndioxiddal.

3.4. 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 módosított csúszófüggvényt alkalmazó szabályozó, mely, habár diszkrét megoldás, de a hiba megváltozásának sebessége a célérték környezetében alacsony (8. ábra).



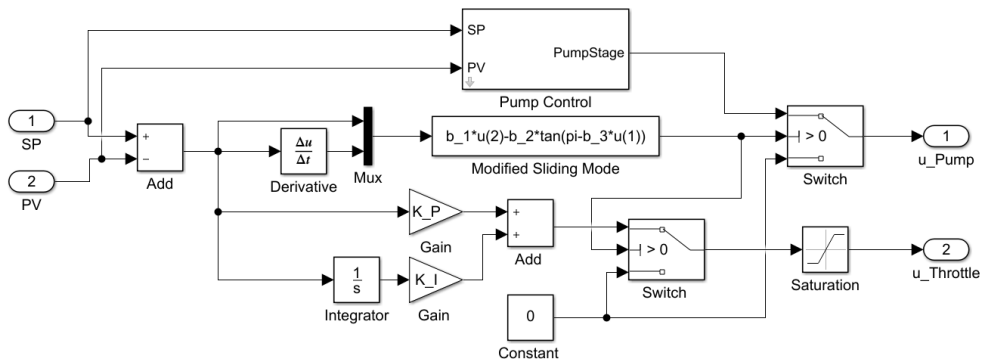
8. ábra A módosított csúszómód-szabályozó csúszófüggvénye

A csúszófelületet leíró egyenlet a következő:

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

3.5. Kombinált szabályozási algoritmus

A felállított cél elérése érdekében több kombinált szabályozási algoritmust vizsgáltam, így alkottam meg a módosított csúszómódszabályozó alapú, de a csattogástól mentes és energiahatékony szabályozási eljárást. A szabályozó egy módosított csúszómód – PI kaszkád megoldás, mely nem csak az egyes fűtőlapokhoz tartozó szelep állását, de ezzel egyidőben a keringtetőszivattyú teljesítményfokozatát is aktívan befolyásolja. A szabályozó felépítését a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra A kombinált módosított csúszómód szabályozó felépítése

4. 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 golyóscsap záróelem szögelfordulása, $^\circ$,
- r : golyóscsap golyófuratának sugara, m,
- R : golyóscsap golyójának sugara, m.

3. *Célérték függvény az energiahatékonyság és minőségi jellemzők figyelembevételével*

Kidolgoztam a folyadék munkaközegű fűtőlápok 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 a csúszófelületeként 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, °C,
- b_1 : módosított csúszófelület 1. paramétere, $\frac{s}{s}$,
- b_2 : módosított csúszófelület 2. paramétere, -,
- b_3 : módosított csúszófelület 3. paramétere, $\frac{1}{s}$.

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 energiahatékonyságát és szabályozásának minőségét javítja. A kidolgozott módszer a módosított csúszómód-szabályozó robusztusságát egy arányos-integráló és egy kiegészítő szivattyúteljesítmény-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 fűtőtéljesítmény: 1,8 kW, 12 kW, 24 kW,
 - Hőtároló térfogata: 120 l, 1200 l, 2000 l,
 - Napkollektorok száma: 4 db, 10 db, 50 db.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Munkám során a termikus napenergiahasznosítással kiegészített sertéstartásban alkalmazott folyadékmunkaközegű fűtőlápok 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 nyomáscsökkenését leíró függvényekkel.

Kidolgoztam egy fizikai alapon nyugvó fojtómodellt, mely alkalmas a hagyományos fűtési rendszerekben elzárószerelvényként 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. 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 előlétem 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 modellcsomagot, 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 elzáróselepként 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 vettem össze, vagyis a kibővített, validált szimulációs keretrendszeren modellkísérleteket 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

6. Összefoglalás

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.

.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT 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 Polytechnika 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.