



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Termikus napenergia-hasznosító rendszerek
modellalapú szabályozása

DOI: 10.54598/000250

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Tóth János

Gödöllő
2020

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki tudományok

vezetője:

Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

Témavezető:

Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

.....
a témavezető jóváhagyása

.....
az iskolavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	4
1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége	4
1.2. Célkitűzések	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	6
2.1. Blokkorientált modellezés	6
2.2. Kisminta modell	6
2.3. Modell identifikáció és validáció	7
3. EREDMÉNYEK	8
3.1. SimSolar szimulációs keretrendszer	8
3.2. Online adatbázis kezelő blokkok	9
3.3. Kisminta modell HIL implementációja	10
3.4. HIL modell állásos és PID szabályozása	11
3.5. Napenergia-hasznosító rendszer modell alapú szabályozása	12
3.6. Modell alapú szabályozó optimalizálása	13
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	15
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	18
6. ÖSSZEFOGLALÁS	19
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	20

JELÖLÉSJEGYZÉK

a	alapjel	[-]
n_c	irányítási végérték	[-]
n_p	predikciós végérték	[-]
y	rendszer kimenete	[-]
\hat{y}	szimulált folyamat kimenete	[-]
Δ	maximális eltérés	[°C]
ε'	eltérésvektor	[°C]
$\bar{\varepsilon}$	átlagos eltérés	[°C]
ε_s	eltérés szórása	[°C]
τ	idő	[-]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Dolgozatom ezen fejezetében a téma jelentőségét és aktualitását fogalmazom meg, illetve a munkám célkitűzéseit mutatom be.

1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége

Az utóbbi évtizedekben jelentősen megnőtt a megújuló erőforrások kiaknázásának lehetőségeit vizsgáló kutatók száma, ami köszönhető a növekvő energiaigénynek, a fosszilis energiahordozók véges mennyiségének, illetve a környezettudatos gondolkodás módjának. A megújuló erőforrások – köztük a napenergia – minél gazdaságosabb és jobb felhasználása áll ezen kutatások középpontjában, amihez a technika és a szemlélet fejlődése is szükséges.

A szoláris rendszerek általános követelményeinek biztosításához eltérő megközelítéseket alkalmaztak, hogy kezelni lehessen a nem-lineáris és változó időállandójú eseteket is, ami nagy, robusztus rendszerek esetében elengedhetetlen. Az irányító rendszerek számos lehetőségére világított rá, például: az előreccatolt szabályozók, a PID sémák, az adaptív szabályozók, a modell alapú prediktív rendszerek, a frekvenciatartománybeli megközelítés, a robusztus optimális szabályozók, valamint a fuzzy logikai rendszerek alkalmazhatósági lehetőségeinek vizsgálatára.

Az energialapú szabályozás elve abból a megközelítésből adódik, hogy a rendszer belső energiaeloszlásának ismeretét használja fel irányítási feladat célfüggvényeként. Ebben az esetben, az irányító rendszerbe integrálható, a teljes napenergiás rendszer (energiabegyűjtő, tároló és energiafelhasználó) viselkedését leíró, elosztott paraméterű modellt kell kidolgozni.

A szoláris rendszerek modellezéseinek és irányítási problémáinak vizsgálata a Szent István Egyetem Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén nemzetközi együttműködés keretében több éve folyik.

A hazai és a nemzetközi szakirodalom is részletesen foglalkozik a szabályozástechnika azon részterületével, amely a megújuló erőforrások és azon belül a szoláris rendszerek optimális kihasználását célozza. Napjainkban ez egy rendkívül időszerű és fejlődő kutatási ágazat.

A kutatás során olyan szabályozási algoritmusok vizsgálata a cél, amik képesek kezelni mind a háztartási, mind a nagyipari szoláris rendszereket is egy meghatározott jósági fokkal. Továbbá az erre a területre vonatkozó módszerek továbbfejlesztése és az alkalmazhatóság korlátainak megállapítása. Ehhez a témakörhöz kapcsolódó speciális szakirodalmi ismeretanyag összegyűjtésére és kritikai feldolgozására is sor fog kerülni.

1.2. Célkitűzések

A kutatási feladat elvégzése során célom, hogy kidolgozzak szabályozási módszereket, amelyek alkalmasak a napenergia-hasznosító rendszerek optimális működtetésére.

Ennek eléréséhez a következő célfeladatokat tűzöm ki:

- napenergiás rendszer időben változó hő- és anyagáram folyamatainak leírására alkalmas modellek kidolgozása;
- termikus napenergia-hasznosító rendszerek energetikai mérésére alkalmas számítógépes mérő-, adatgyűjtő-, monitorozó eljárások kidolgozása; és azok megvalósítása;
- energetikai mérések elvégzése a kidolgozott modellek ellenőrzésére;
- szabályozási algoritmusok kidolgozása;
- ellenőrzött modell alapján különböző szabályozási stratégiák értékelése;
- a kidolgozott szabályozási módszerek fizikai realizációja.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben a kutatási céljaim elérése érdekében alkalmazott modellezési eljárásokat és kísérleti módszereket mutatom be.

2.1. Blokkorientált modellezés

A munkám során a termikus napenergia-hasznosító rendszerek matematikai modellezésével és szimulációjával foglalkoztam, amihez elengedhetetlen kellék egy szimulációs programcsomag. A piacon található megoldások közül azokra koncentráltam, amik támogatják a blokkorientált modellezési megközelítést és rendelkeznek funkcióbővítési lehetőséggel is, hiszen a kutatásom során szükséges az újonnan létrehozott modulok rendszerbe kapcsolása. Ezen kritériumok alapján a MATLAB+Simulink programcsomagot 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 megoldásához elterjedten alkalmazott algoritmusokat, mint például a Runge–Kutta vagy a Dormand–Prince, vagyis tökéletes választás a dolgozatban kitűzött célok megvalósításához.

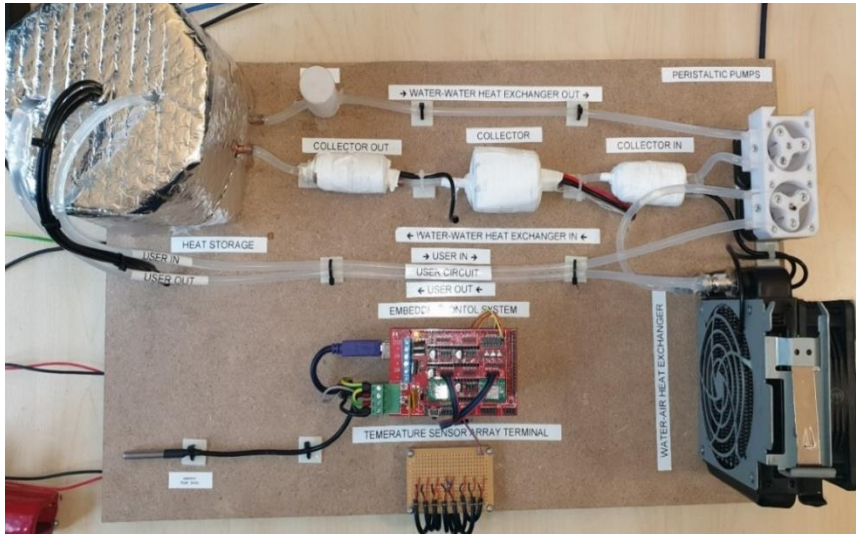
2.2. Kisminta modell

A kisminta modell egy HIL szimulációra alkalmas kétkörös termikus napenergia-hasznosító rendszer, amely a matematikai modellek validálásának és a szabályozások realizálásának céljából készült.

A napkollektor modellezésére egy villamos fűtőegységet alkalmaztunk azért, hogy a napkollektor hőenergia-bevitelét képviselő energiamennyiséget pontosan szabályozni tudjunk. A modellt úgy alakítottuk ki, hogy teret adjon további fejlesztéseknek, amelyek vagy tervezettek, vagy a tesztek adatai alapján szükségesek lehetnek.

A kisminta modell nyolc darab DS18B20 digitális hőmérséklet-érzékelőt használ, három a hőtároló egységben, az egyik a kollektoregységben, egyet-egyét mind a kollektor be-, mind a kimeneti pontokon, egyet a felhasználó kimenetén, ami a víz-levegő hőcserélő és egy szenzort környezeti hőmérséklet mérésére. Az 1. ábrán látható a megvalósított kisminta modell.

A mérések során a fűtési ciklus hőmérsékletfelfutását vizsgáltuk. Átlagosan 51,15 W-ot használtunk a kollektorkör felmelegítésére, és a kollektorkör szivattyújának fordulatszáma 316 min^{-1} , mely tömegáramban kifejezve $0,0059 \text{ kg s}^{-1}$.



1. ábra Megvalósított kisminta modell

2.3. Modell identifikáció és validáció

Az identifikációs feladat során a cél a modell ismeretlen paramétereinek meghatározása a mérési eredmények alapján, úgy, hogy a meghatározott paraméterekkel végzett szimuláció minél jobban közelítsen a mérési eredményekhez. A feladat elvégzéséhez definiálom az eltérést, mint egy célfüggvényt a vizsgált $[\tau_0; \tau_1]$ intervallumon:

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

Az identifikációs feladat célja a célfüggvény minimalizálása, vagyis azon p_1, p_2, \dots, p_j paraméterek megkeresése, amelyeknél a J függvény értéke minimális:

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

Az identifikáció minőségét kifejező mérőszámokat, amik a maximális eltérés, az átlagos eltérés és a hiba szórása, a szakirodalomnak megfelelő módon állapítottam meg és alkalmaztam a vizsgálatok során.

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetem a kutatásom során elért eredményeket, amelyek egy termikus napenergia-hasznosító rendszer identifikációjához, szabályozási stratégiájának kiválasztásához és annak realizálásához nyújtanak segítséget.

3.1. SimSolar szimulációs keretrendszer

A SimSolar blokkorientált szimulációs keretrendszer kifejezetten napenergia-hasznosító 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 kidolgozott rendszer nyílt, vagyis a modellek utólag módosíthatók, tanulmányozhatók, így alkalmas kutatási és oktatási célokra is. A rendszer blokkorientált mivolta okán alkalmas a rugalmas szimulációk elkészítésére. Fontos tervezési szempont volt a rendszer bővíthetősége, vagyis az új modellek hozzáadásának lehetősége, illetve a funkcionális bővíthetőség lehetősége, ami más programnyelvek alkalmazásával valósul meg.

A SimSolar rendszer lehetőséget biztosít a napenergia-hasznosító rendszerek szimulációs vizsgálatára, a szabályozási stratégiák értékelésére és a szabályozás HIL alapú realizálására is.

Egy termikus napenergia-hasznosító rendszer felépítéséhez szükséges egységek külön alcsoportokban találhatóak. Nemzetközi felhasználás miatt a keretrendszer kommunikációs nyelve angol. A 2. ábrán a SimSolar rendszer struktúrája látható.

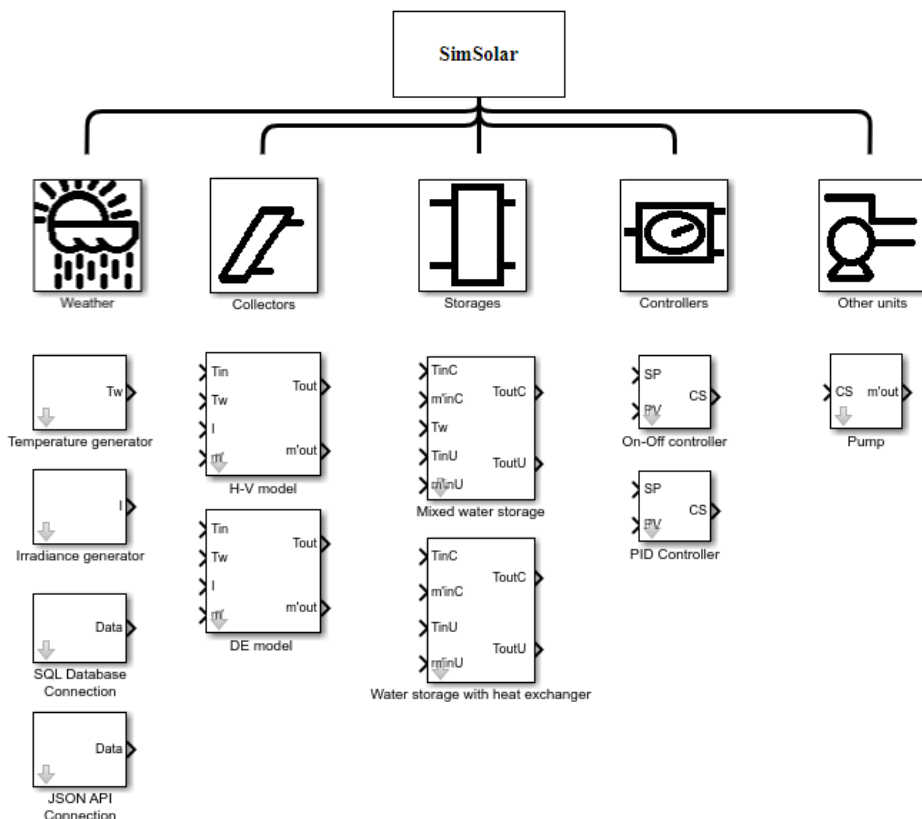
Az *Időjárás* blokkok tartalmazzák azon modulokat, amelyek a szimuláció bemeneti adatainak szolgáltatásáért felelősek. Ez az adatszolgáltatás lehet matematikai modell alapú generálás vagy egy meglévő adatbázisból való adatkinyerés.

A *Napkollektorok* csoportban találhatóak azok a matematikai modellek, amik a napkollektorok működését írják le.

A *Hőtárolók* csoportban a szoláris hőtárolók szimulációjához használható matematikai modellek találhatóak.

A *Szabályozók* csoport tartalmazza a termikus napenergia-hasznosító rendszer optimális működéséhez elengedhetetlen szabályozókat. A szabályozók úgy lettek kialakítva, hogy más típusú rendszerekhez is könnyen illeszthetők.

Az *Egyéb* csoportban azok az egységek találhatóak, amik, a felsoroltakon kívül, még részét képezik egy termikus napenergia-hasznosító rendszernek.



2. ábra SimSolar rendszer struktúrája

3.2. Online adatbázis kezelő blokkok

Egy szimulációhoz a mért adatok a leghasznosabbak, hiszen ezek tükrözik kellőképpen a valóságot. Ezen mérések eredményeit, a modern megközelítés szerint, adatbázisokban tároljuk, hiszen így szélesebb körben hozzáférhetők. Ezek az adatbázisok döntő többségében úgynevezett relációs adatbázisok, vagyis a bennük tárolt bejegyzések (sorok) egyediek. A relációs adatbázisok használatára jött létre az SQL (Structured Query Language), ami egy szabványos nyelv, így a használata független az adatbázis technikai megvalósításától. Az Online adatbázis (SQL) kezelő blokk egy adatbázissal, ami egy MySQL nevű virtuális szerver, lép kapcsolatba és onnan kéri le a mérési adatokat, amiket aztán a szimuláció számára is értelmezhetővé tesz.

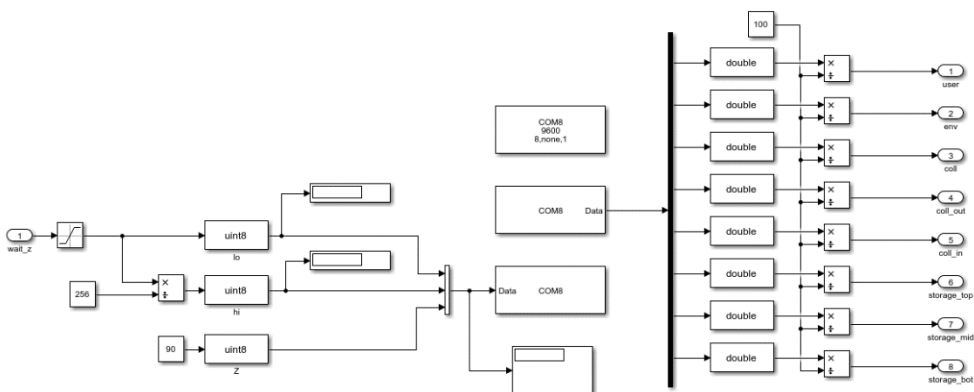
Az adatok online elérésének leggyakoribb formája egy adatbázis-kapcsolat, azonban ez a megoldás, egy publikus adatbázis esetében, jelentős biztonsági kockázattal jár, hiszen a közvetlen adatbázis-elérés során a kliens a hálózat része. Ennek a kiküszöbölésére használják a TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) alapú API-kat (Application Programming

Interface). Az API lehetőséget biztosít a fejlesztőnek, hogy használja az alkalmazás funkcióit, ez esetben ez azt jelenti, hogy egy kliens kapcsolódása után előre meghatározott kérés-válasz kommunikációval lehet az adatbázisból adatokat lekérni. A gyakorlatban legelterjedtebb formátuma ezen üzeneteknek a JSON és az XML. Ezen megközelítés előnye, hogy az adatkapcsolat nem közvetlen, illetve az üzenetek könnyen értelmezhetők egy webböngésző segítségével is.

A szimuláció lefuttatása nagyságrendekkel kevesebb időt vesz igénybe, mint az adatbázissal való kommunikáció, és ezen szimulációk többször is lefutnak ugyanazon adatsorral, például egy szabályozó beállítása esetén. Ezen probléma kiküszöbölésének érdekében a blokk készít egy egyedi fájlt a beállított paraméterek alapján, ahova elmenti a lekért értékeket, természetesen csak akkor, ha ez a fájl még nem létezik. A szimuláció kezdetén a blokk ellenőrzi ennek a fájlnak a létét, amennyiben megtalálja, akkor a fájlból olvassa vissza az adatokat, ami lényegesen kevesebb időt vesz igénybe.

3.3. Kisminta modell HIL implementációja

A kisminta modell tanulmányozása érdekében létrehoztam a modell HIL implementációját Simulink környezetben (3. ábra). A rendszer bemenete a szivattyú kívánt fordulatszáma, a kimenetei pedig a hőmérsékletérzékelők értékeivel arányos értékek.



3. ábra Kisminta modell HIL implementációja Simulink környezetben

A kisminta modell két Arduino Mega 2560-t tartalmaz, az egyik végzi a szivattyú fordulatszám tartását, a másik pedig az érzékelők jeleit olvassa be, konvertálja és kezeli a számítógéppel való kommunikációt. A számítógép oldalon a HIL implementáció kommunikál az Arduinoval soros porton keresztül.

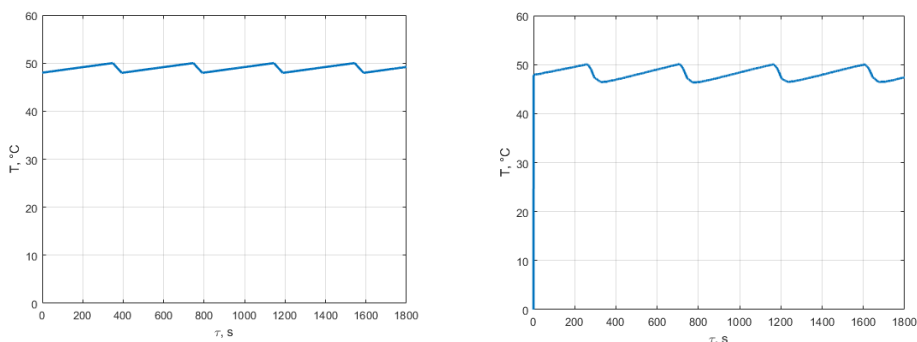
A kommunikáció sebessége 9600 b s^{-1} , ami megfelelőnek bizonyult, hisz a hőmérséklet érzékelők értékei 16 biten (2 bájt) kerülnek kiküldésre, így a 8 hőmérséklet érzékelő összesen 128 bitnyi információt küld, ami ezen sebességnél 75 Hz-es elméleti mintavételezési maximumot jelent.

A SimSolar rendszer felhasználásával identifikáltam a kisminta modellt. Az identifikáció minőségét mérésekkel igazoltam, amelyeknél a determinációs együttható $\geq 0,97$ és a eltérés maximális szórása megközelítőleg $1 \text{ }^\circ\text{C}$ volt.

A kisminta rendszer HIL szimulációjára kialakított megoldás univerzális, tehát bármely soros porton érkező, a fent részletezett konverziót támogató, rendszerrel képes együttműködni. Ez a szempont fontos volt a tervezésénél, hisz így független a mérő-beavatkozó rendszer implementációjától és a jövőben felhasználható további rendszerek HIL alapú vizsgálatára.

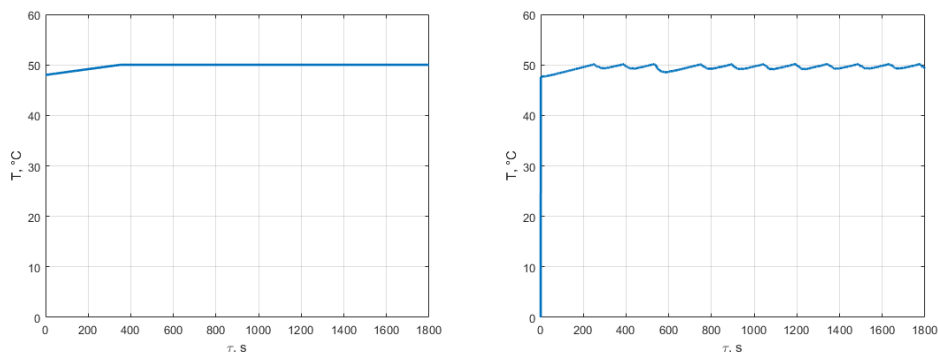
3.4. HIL modell állásos és PID szabályozása

A korábban identifikált kisminta modell segítségével elkészítettem egy szimulációs összeállítást, ahol a szimuláció segítségével beállítottam az állásos szabályozót, majd ezt a HIL modell segítségével alkalmaztam a valós rendszerre $0\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ -os működési tartományon, ezeknek az eredményét a 4. ábra mutatja.



4. ábra Szimulált (jobb oldali) és realizált (bal oldali) állásos szabályozás eredménye

A PID szabályozó esetében jobban szemléltethető a HIL megközelítés előnye, hiszen szükséges a szabályozó optimalizálása, vagyis a feladatnak legjobban megfelelő K_p , K_I és K_D értékek megkeresése. A vizsgálatok eredményei az 5. ábrán láthatók.



5. ábra Szimulált (jobb oldali) és realizált (bal oldali) PID szabályozás eredménye

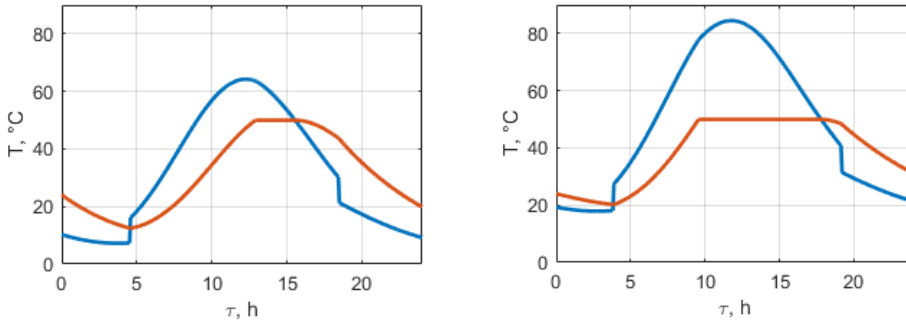
A mérési eredmények alapján megállapítható (eltérés maximális szórása $\leq 1,2\text{ }^\circ\text{C}$), hogy a HIL blokk lehetőséget biztosít egy komplex szabályozási feladat elvégzésére, ami magában foglalja a folyamatot leíró modell identifikálását, az identifikált modellre egy szabályozó optimalizálását és az optimalizált szabályozó folyamatra történő alkalmazását.

3.5. Napenergia-hasznosító rendszer modell alapú szabályozása

A modell alapú szabályozás kialakításának vizsgálata a dolgozatom egyik fő célja. Ezen a feladaton keresztül bizonyítható, hogy a felépített SimSolar validált modelljei és a Simulink többi toolbox-a hiba nélkül működik együtt, hiszen a felhasznált szabályozó a Model Predictive Control Toolbox része.

A vizsgálathoz elkészítettem egy általános napenergia-hasznosító rendszer matematikai modelljét, ami egy napkollektorból, egy hőcserélővel ellátott hőtárolóból és két szivattyúból áll, amelyek közül a hőtároló-köri fordulatszám kerül szabályozásra. A szimulált rendszer egy technológiai folyamat számára állítja elő a melegvizet, ami $50\text{ }^\circ\text{C}$ -ot kíván, így vizsgálatokat a $0\text{-}100\text{ }^\circ\text{C}$ -os működési tartományban végeztem el. A szoláris rendszer szabályozásának szimulációját két adatsorral végeztem el: az első egy átlagos tavaszi nap (100. nap) a második pedig egy átlagos nyári nap (180. nap) környezeti hőmérsékleti és globálsugárzási adataival.

A napkollektor és a hőtároló felhasználói kimenetének hőmérséklete a 6. ábrán látható. Az ábrából leolvasható, hogy a hőtároló kimeneti hőmérséklete tartotta a beállított értéket ($50\text{ }^\circ\text{C}$), ahol ez lehetséges volt. Az eredményekből megállapítható, hogy modell alapú szabályozó a jelentősen eltérő bementi jellemzők esetén is képes tartani elvárt pontosságot. A vizsgált szakaszon, vagyis a szabályozott szakaszon, mindkét esetben, a legnagyobb eltérés $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ volt.



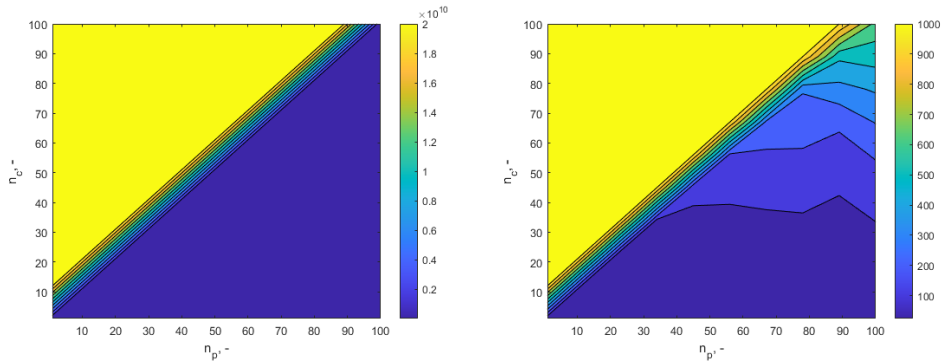
6. ábra Termikus napenergia-hasznosító rendszer kilépő hőmérsékletei (napkollektor - kék, hőtároló - narancssárga) egy tavaszi (bal oldali) és egy nyári (jobb oldali) napon

3.6. Modell alapú szabályozó optimalizálása

A szabályozók optimalizálása fontos feladat a szabályozás megtervezésénél, hiszen mind a pontosságra, mind a rendszer dinamikájára hatással vannak a szabályozási paraméterek. A modell alapú szabályozás esetén, a szabályozási paraméterek, amelyek a predikciós végérték (n_p) és az irányítási végérték (n_c) jelentősen befolyásolják a szabályozó teljesítményét, viszont beállításukra csupán empirikus megoldások léteznek. Ennek a problémának a megoldására kidolgoztam egy módszert, ami alkalmas egy modell alapú szabályozó optimalizálására a szabályozási hiba és a lefutási idő alapján termikus napenergia-hasznosító rendszerek esetében. A módszer lényeges eleme a célfüggvény, aminek értéke egy számpár.

A célfüggvény értékei, a prediktív szabályozás hibája ($\epsilon(J_{MPC})$) és a, szabályozási körben lévő modell, szimulációjának lefutási ideje ($\tau(J_{MPC})$), amik az $1 \leq n_p, n_c \leq 100$ intervallumon lettek vizsgálva, a 7. ábrán láthatók. A szabályozás hibáját csak az $n_p \geq n_c$ intervallumon tudjuk értelmezni, ami a 7. ábrán kék színnel van jelezve. Látható, hogy a paraméterek növelése egy ponton túl nem javítja a szabályozás pontosságát, mivel a függvény értéke nem változik.

A prediktív szabályozási feladat megoldásnál az irányítási végérték nem lehet nagyobb, mint a predikciós végérték, ebben az esetben a célfüggvény értéke $(2 \cdot 2^{-52}) \cdot 2^{1023}$, ami a legnagyobb dupla pontosságú lebegőpontos szám, ami 64 biten ábrázolható. Az ábrákon a $(2 \cdot 2^{-52}) \cdot 2^{1023}$ értéket, rendre $2 \cdot 10^{10}$ -re és 1000-re cseréltem a vizualizáció megkönnyítésének céljából.



7. ábra Prediktív szabályozás hibája (jobb oldali) és a szimuláció lefutásának ideje (bal oldali)

A szabályozó optimalizálására a bevezetett célfüggvény alapján kidolgoztam egy algoritmust, amely két lépésben alkalmas a szabályozási paraméterek beállítására:

1. Azon (n_p, n_c) számpárok megkeresése, ahol $n_p \geq n_c$ és $\varepsilon\langle J_{MPC} \rangle$ minimális.
2. A megtalált (n_p, n_c) párok közül megkeresni azt, ahol $\tau\langle J_{MPC} \rangle$ minimális.

Az algoritmussal lehetőség nyílik a szabályozó szabályozási hiba és lefutási idő szerinti optimalizációjára termikus napenergia-hasznosító rendszerek szimulációs vizsgálatához.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. SimSolar blokkorientált keretrendszer

Elkészítettem egy blokkorientált modellezési keretrendszert napenergia-hasznosító rendszerek vizsgálatára Simulink környezetben. Ebbe a rendszerbe implementáltam a szakirodalomban található matematikai modelljeit a napenergia-hasznosító rendszerek részegységeinek, amik a napkollektor, a szoláris hőtároló, a szabályozó és a szivattyú.

A keretrendszeren belül kidolgoztam az egyes modulok szimulációjára és identifikációjára alkalmas eljárásokat, amelyeket próbafuttatások segítségével igazoltam.

A létrehozott keretrendszer lényeges tulajdonsága, hogy bővíthető, így további modellek is létrehozhatók és összekapcsolhatók a meglévőkkel.

2. Online adatbázis kezelő modulok

Kidolgoztam két online adatbázis-kezelő algoritmust Simulink rendszerben, amik a SimSolar keretrendszer részei, a benne található modulokkal kompatibilisek.

Az általam létrehozott Online adatbázis (SQL) blokk képes kezelni egy MySQL szerverrel való kapcsolatot, a szerverhez kéréseket intézni, értelmezni a kapott adatokat és a szimuláció számára is értelmezhető adatokat előállítani.

Az általam megvalósított Online adatbázis (JSON) blokk képes kezelni egy TCP/IP alapú szerver-API-val való kapcsolatot, ami JSON formátumú üzenetekkel kommunikál, és a szimuláció futtatásához szükséges adatformátumot létrehozni.

A modulok létrehozásához kidolgoztam egy eljárást, ami egy C programnyelvben íródott függvény könyvtárat kapcsol a Simulink rendszeréhez, ami lehetőséget nyit egyéb adatstruktúrák szimulációba való importálására is.

A kidolgozott modulok fontos tulajdonsága, hogy univerzálisak, vagyis bármely adatbázist, TCP/IP API-t képesek kezelni, amik kielégítik a formai követelményeket.

3. Napenergia-hasznosító rendszer HIL implementációja

A megvalósított kisminta modell alapján kidolgoztam a rendszert kezelni képes hardware-in-the-loop (HIL) modellt, ami képes kiolvasni az érzékelők adatait és irányítani a rendszerben keringő folyadék tömegáramát.

A SimSolar rendszer felhasználásával identifikáltam a kisminta modellt HIL megközelítésben. Az identifikáció jóságát mérésekkel igazoltam

(determinációs együttható $\geq 0,97$, eltérés maximális szórása megközelítőleg $1\text{ }^\circ\text{C}$). Az identifikált matematikai modellre alkalmaztam az állásos a PID szabályozást, melyeknél az eltérés maximális szórása rendre kisebb, mint $0,6\text{ }^\circ\text{C}$ és $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ a $0\text{-}60\text{ }^\circ\text{C}$ -os működési tartományon.

A HIL modell segítségével realizáltam az állásos és a PID szabályozást $1,2\text{ }^\circ\text{C}$ és $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ maximális hibaszórás mellett a $0\text{-}60\text{ }^\circ\text{C}$ -os működési tartományon.

Kidolgoztam továbbá egy eljárást, ami HIL alapon alkalmas egy termikus napenergia-hasznosító rendszer identifikációjára, szimulációjára, szabályozó optimalizálására és annak realizálására, amit mérésekkel igazoltam.

4. Napenergia-hasznosító rendszer modell alapú szabályozása

A SimSolar keretrendszer validált részmodelljeinek segítségével kidolgoztam egy általános termikus napenergia-hasznosító rendszer teljes modelljét.

Szimulációs futtatásokkal igazoltam, hogy a keretrendszer alkalmas termikus napenergia-hasznosító rendszerek irányítási feladatainak vizsgálatára, a szabályozási stratégiák összehasonlítására és azok optimalizációjára.

Bizonyítottam, hogy egy általános termikus napenergia-hasznosító rendszerre a modell alapú szabályozási stratégia alkalmazható a $0\text{-}100\text{ }^\circ\text{C}$ -os működési tartományon $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ maximális hibával.

5. Modell alapú szabályozó optimalizálása

Termikus napenergia-hasznosító rendszerek irányításakor modell alapú szabályozás esetére kidolgoztam egy célfüggvényt, amely segítségével megvalósítható a szabályozási hiba és lefutási idő szerinti optimalizálása a predikciós végérték (n_p) és az irányítási végérték (n_c) változtatásával. A számpár értéket tartalmazó célfüggvényt a következő egyenlettel definiáltam:

$$J_{MPC}(n_p, n_c) = \begin{cases} \left(\int_0^{\infty} (a - \hat{y}(\tau, n_p, n_c))^2 d\tau ; t\{\hat{y}(\tau, n_p, n_c)\} \right), & n_p \geq n_c \\ ((2 - 2^{-52}) \cdot 2^{1023}; (2 - 2^{-52}) \cdot 2^{1023}), & n_p < n_c \end{cases}.$$

A számpár első tagja a szabályozás pontosságát írja le, ha az n_p érték nagyobb, mint az n_c , ellenkező esetben pedig $(2 - 2^{-52}) \cdot 2^{1023}$, ami a legnagyobb dupla pontosságú lebegőpontos szám, ami 64 biten ábrázolható. Ez a tag egy hiba jellegű mennyiséget ír le, az algoritmus definíciójában $\varepsilon\langle J_{MPC} \rangle$ -ként hivatkozom rá.

A számpár második tagja a szimuláció lefuttatásához szükséges időt adja meg, ha az n_p érték nagyobb, mint az n_c , ellenkező esetben pedig $(2 - 2^{-52}) \cdot 2^{1023}$, ami

a legnagyobb dupla pontosságú lebegőpontos szám, ami 64 biten ábrázolható. A tag egy időintervallumot ír le és $\tau\langle J_{MPC} \rangle$ -ként hivatkozom rá.

A szabályozó optimalizálására a bevezetett célfüggvény alapján kidolgoztam egy algoritmust, amely két lépésben alkalmas a szabályozási paraméterek beállítására:

3. Azon (n_p, n_c) számpárok megkeresése, ahol $n_p \geq n_c$ és $\varepsilon\langle J_{MPC} \rangle$ minimális.
4. A megtalált (n_p, n_c) párok közül megkeresni azt, ahol $\tau\langle J_{MPC} \rangle$ minimális.

A kidolgozott algoritmus működését az $1 \leq n_p, n_c \leq 100$ intervallumon összehasonlító próbafuttatásokkal igazoltam.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutatómunkám során a termikus napenergia-hasznosító rendszerek vizsgálatával kapcsolatban olyan eredményekre jutottam, amelyek segítséget nyújtanak az ilyen rendszerek szabályozási stratégiájának kiválasztásának validálásában.

Megalkottam a SimSolar blokkorientált modellezési és szimulációs keretrendszert, amely tartalmazza egy termikus napenergia-hasznosító rendszert felépítő részegységek matematikai modelljeit. Ez a keretrendszer használható egyéb rendszerek szimulációjára is, így javaslom a bővítését például fotovillamos vagy kombinált rendszerelemek matematikai modelljeivel.

A SimSolar keretrendszer igazoltan kompatibilis a Simulink rendszer Model Predictive Control Toolbox-ával. Javaslom egyéb toolboxok kompatibilitásának vizsgálatát is, hisz így a keretrendszer használhatósági köre kibővíthető.

Kidolgoztam két modult, amelyek képesek külső forrásból származó adatok szimulációba való importálására C programnyelvben megírt eljárások segítségével. A létrehozott modulok alapján javaslom egyéb források importálásának lehetőségét is, például egyedi mérőrendszerek fájlformátumai.

Kísérleti eszközt állítottam össze, amely egy termikus napenergia-hasznosító rendszer kiegészítve szükséges mérő és beavatkozó egységekkel. Elkészítettem ezen rendszer HIL alapú modelljét, amely képes a SimSolarral való együttműködésre. A rendszerben található érzékelők kicserélésével a kisminta modell átalakítható más jelenségek vizsgálatára, így megfontolandó a vezérlőszoftverének oly kialakítása, amely moduláris felépítést tesz lehetővé. Ez előnyös lenne, hiszen a meglévő HIL modellben ez nem jelentene változást.

Elvégeztem egy termikus napenergia-hasznosító rendszer modell alapú szabályozását. A vizsgálatom során egy adott szabályozóbeállítást találtam optimálisnak, javaslom a szabályozási paraméterek alakulásának vizsgálatát egy nagyméretű, robusztus rendszer szabályozása esetén, ahol a matematikai modell összetettebb, mint az általam vizsgált rendszer.

Kidolgoztam egy célfüggvényt és egy hozzá tartozó algoritmust, amely alkalmas egy modell alapú szabályozó optimalizálására termikus napenergia-hasznosító rendszerek esetén. Javaslom a kidolgozott algoritmus vizsgálatát nagyméretű napkollektor-rendszerek esetén.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A termikus napenergia-hasznosító rendszerek több, mint 100 éve az emberiség használatában állnak. A megújuló energiaforrások ezen formája jelentős technológiai fejlődésen ment keresztül ezen időszak alatt, mind a részegységek mind a szabályozás tekintetében. Ezek a rendszerek, jellegükből adódóan, nagy válaszidővel rendelkeznek, ezért a konvencionális szabályozási stratégiák nem alkalmazhatók egy nagyobb rendszer esetén, hanem egy predikciós szabályozás kell. A rendszerek kutatottságának okán a szakirodalomban megtalálhatók a rendszereket leíró matematikai modellek, vagyis egy modell alapú szabályozási stratégia alkalmas a feladatra. Kutatómunkám célja egy olyan metódus kifejlesztése, ami egy termikus napenergia-hasznosító rendszer modell alapú szabályozásának tervezését segíti.

A feladat elvégzéséhez kidolgoztam a SimSolar blokkorientált szimulációs keretrendszert, amely tartalmazza a szakirodalomban megtalálható matematikai modelljeit a termikus napenergia-hasznosító rendszert felépítő részegységeknek. Ebben a keretrendszerben lehetőség nyílik termikus napenergia-hasznosító rendszerek szimulációs vizsgálatára.

A SimSolar rendszerhez létrehoztam két online adatbázis kezelő modult, így a mérési eredmények szimulációba való importálása lehetségessé vált. A két modul két különböző megközelítésben kapcsolódik az adatbázishoz, így széles körben alkalmazhatóak.

Kidolgoztam egy HIL alapú modellt, amely egy kísérleti kisminta modellel black-box implementációja. A kisminta modellt identifikáltam a SimSolar rendszerben megtalálható matematikai modellek alapján, majd szimulációs vizsgálatok segítségével optimalizáltam és realizáltam különböző szabályozási stratégiákat.

A SimSolar keretrendszer validált részmodelljeinek segítségével kidolgoztam egy általános termikus napenergia-hasznosító rendszer teljes modelljét, amire alkalmaztam az állásos, a PID és a modell alapú szabályozását. A szimulációs futtatásokkal igazoltam, hogy a keretrendszer alkalmas egy termikus napenergia-hasznosító rendszerek szabályozásának szimulációs vizsgálatára és optimalizálására. A modell alapú szabályozás vizsgálatával igazoltam, hogy ez a megközelítés alkalmazható egy termikus napenergia-hasznosító rendszerre.

Az általam kidolgozott módszer lehetőséget biztosít egy valós napenergia-hasznosító rendszer identifikálására, szimulációs vizsgálatára, szabályozó optimalizálására és a szabályozás realizálására, ami megkönnyítheti a gyakorló mérnökök munkáját ezen rendszerek tervezésében.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. **Tóth J.**, Farkas I. (2017): A Simulink library for solar energy applications, R&D in Mechanical Engineering Letters, Vol. 16, pp. 89-95., HU ISSN 2060-3789
2. **Tóth J.**, Farkas I. (2019): Mathematical modelling of solar thermal collectors and storages, Acta Technologica Agriculturae, Vol. 23, No. 4, pp. 128-133., ISSN 1338-5267
3. Erdélyi V., **Tóth J.**, Jánosi L., Farkas I. (2019): Experimental results of a small-scale thermal system, Mechanical Engineering Letters, Vol. 18, pp. 7-16., HU ISSN 2060-3789
4. Erdélyi V., **Tóth J.**, Jánosi 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., ISSN 1757-8981, doi:10.1088/1757-899X/749/1/012034
5. **Tóth J.**, Farkas I. (2020): Model predictive control of a solar thermal system via on-line communication with a meteorological database server, Időjárás, pp. 1-15, ISSN 0324-6329 (IF: 0,277*) (accepted on July 14, 2020)

Lektorált cikk magyar nyelven

6. **Tóth J.**, Farkas I. (2017): Napkollektoros rendszerek vizsgálata blokkorientált szimulációval, Mezőgazdasági technika, 58. évfolyam, 11. szám, 2-5. o., ISSN 0026-1890
7. **Tóth J.**, Farkas I. (2018): Blokkorientált szimulációs keretrendszer napkollektoros alkalmazások vizsgálatára, Energiagazdálkodás, 59. évf., 5. sz., 24-29. o., ISSN 0021-0757
8. **Tóth J.**, Erdélyi V., Jánosi L., Farkas I. (2019): Termikus napenergia hasznosító rendszer kismintamodelljének identifikációja, Magyar Energetika, XXVI. évf., 2019/4. sz., 18-23. o., ISSN 1216-8599