

PID és ON-OFF szabályozású hűtéstechnikai rendszer termikus szimulációs modellezése

Dr. Kassai Miklós Ph.D.¹, Simon Richárd²

Abstract

In a previous research project the energy consumption of a newly developed DC inverter refrigerant, used in the commercial sector, were optimized, which included speed regulator compressor, electronic expansion valve and PID regulator. In order to achieve the test goals, an experimental test facility was built in the introduction room of a national company. The main part of the measuring system was a cooling chamber containing two identical evaporators; one is powered by the DC inverter refrigerator, and the other one is traditional refrigeration system, operated by a conventional piston compressor, mechanical expansion valve and ON-OFF control technology. Due to incomplete data supplied by the manufacturer, the PID controller of the DC refrigerator had to be optimized by setting the appropriate proportional, integrating and differential parameter values to ensure energy-efficient operation.

As a continuation of the research, the aim is to develop a thermal simulation model that can be used to investigate the thermal parameters of the different regulation (ON-OFF and PID) air-conditioning system used to cool the refrigeration chambers.

1. Bevezetés

Egy korábbi kutatási munkánkban a kereskedelmi szektorban elterjedőben lévő, új fejlesztésű DC inverteres hűtőaggregát energiafogyasztásának optimalizálására került sor, amely fordulatszám szabályozású kompresszort, elektronikus expanziós szelepet és PID szabályozót tartalmazott [1]. A vizsgálati célok megvalósítása érdekében egy kísérleti mérőállás épült egy hazai piacvezető hűtéstechnikai rendszereket forgalmazó cég bemutatótermében.

A mérőrendszer fő része egy hűtőkamra, amely belül két azonos elpárologatatót tartalmazott; az egyiket a DC inverteres hűtő aggregáttal üzemeltetik, a másik számára pedig a hazai piacon nagyon széles körben elterjedt, hagyományos hűtőberendezés biztosítja a hűtési energiát, amelyet egy hagyományos dugattyús kompresszor, a mechanikus expanziós szelep és az On-Off (kétállású) szabályozó technika működtet [2]-[10]. A gyártó által szolgáltatott hiányos adatok miatt a DC hűtőberendezés PID szabályozóját optimalizálni kellett a megfelelő arányos, integráló és differenciáló paraméterértékek be-

állításával az energiatakarékos üzemeltetés biztosítása érdekében. A kísérleti vizsgálatok eredményeiből tudományos folyóiratcikk jelent meg a Magyar Épületgépészet, LXVIII. évfolyam, 2019/11. számában [11].

A kutatás folytatása gyanánt a cél olyan termikus szimulációs modell kidolgozása, mely alkalmas a hűtőkamrák hűtésére alkalmazott különböző szabályozású (On-Off és PID) klímatechnikai rendszer termikus paramétereinek vizsgálatára. További cél a kidolgozott szimulációs modell validálása a kutatási munka korábbi szakaszában végzett kísérletek során született mért eredményekkel. A kutatómunkában aszisztált *Simon Richárd* MSc. hallgató, munkájából egy kiváló minőségű TDK dolgozat [12] és diplomamunka született [13].

2. A szimulációs modell felépítése

A kutatási munka folytatása gyanánt, annak korábbi szakaszában a kísérletek során alkalmazott hűtéstechnikai rendszerek [11] energetikai jellemzőinek részletesebb vizsgálat érdekében, egy termál szimulációs modellek kidolgozása került sor. Amennyiben a kidolgozott szimulációs modell által meghatározott eredmények megfelelő pontossággal megközelítik a kísérleti eredményeket, akkor a rendszerre jellemző paramétereket változtatva még több következtetést vonhatunk le annak működéséről, elkerülve a magas beruházási költségekkel járó újabb kísérleti mérőberendezés építését vagy a meglévő átalakítását.

A kutatási munka jelen szakaszában, első körben a kísérletek során vizsgált különböző típusú szabályozó rendszereknek (PID és On-Off) a hűtőberendezés energiafelhasználására gyakorolt hatásának szimulációs vizsgálatára került sor.

A szimuláció elkészítéséhez a MatLab R2016a programot és annak Simulink modulját használtam SimScape elemekkel. Az általánosított rendszerfelépítést a következő oldalon látható **1. ábra** mutatja.

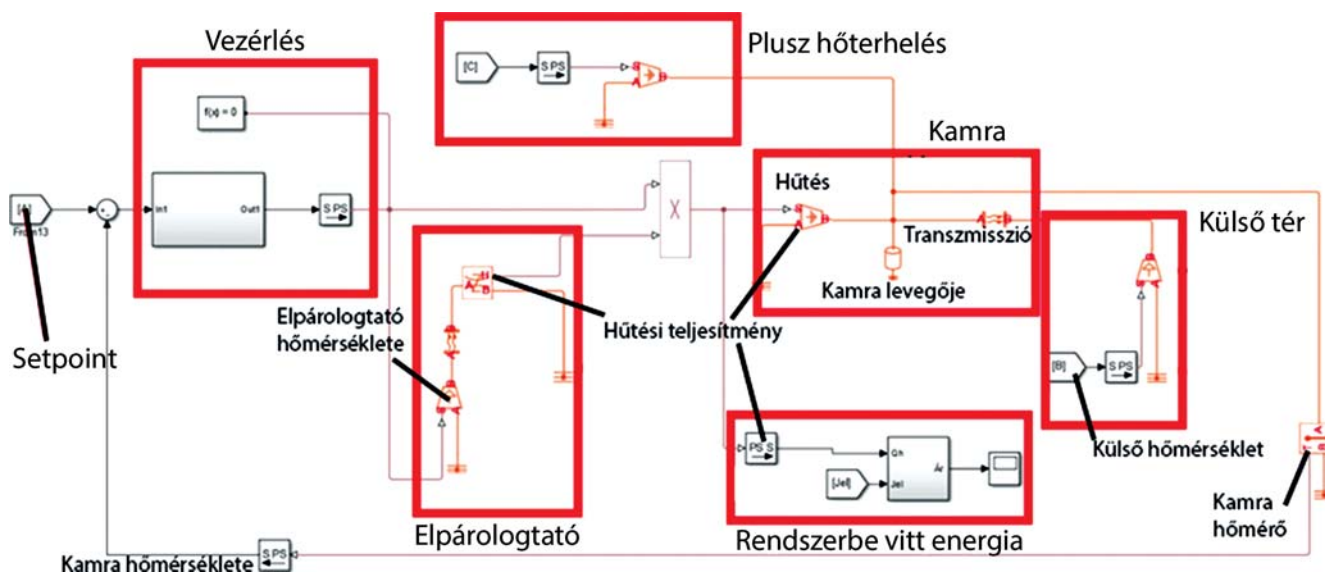
Mivel a kutatási munka jelen szakaszában az On-Off illetve PID szabályozott rendszerek összehasonlítása a cél, ezért majd a későbbiekben bemutatott szimulációs modellek között csak a vezérlésben lesz eltérés. Az ábráról leolvasható, hogy a rendszer összehasonlítja a setpointot (a tartani kívánt, beállított léghőmérséklet) a kamrában mért tényleges léghőmérséklettel és ennek megfelelően szabályozza a hűtési teljesítményt.

A Matlab Simulink modulban használhatók úgynevezett SimScape elemek, ezen belül a Thermal Elements (termikus elemek), amelyek kiválóan alkalmasak a kutatási munkában vizsgált hűtéstechnikai rendszer energetikai modellezésére. Egy-egy felhasznált elemnél meg kellett adni a rá jellemző

¹ egyetemi docens, BME Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás Technika Tanszék

² végzett MSc hallgató





1. ábra. A hűtőrendszer Simulink modelljének vázlata

mennyiségeket (pl. a kamrában lévő anyag (levegő) tömegét és hőkapacitását, az elpárolgató hőátadási tényezőjét stb.).

Az elpárolgatóra illetve a kamrára jellemző műszaki adatokat (hőátadó felület, hőátbocsátási tényező) a gyártó által megadott értékekkel vettem számításba a szimulációs modell kidolgozása során, illetve a kísérletekhez hasonlóan 500 W belső hőterheléssel („plusz hőterhelés”) számoltam.

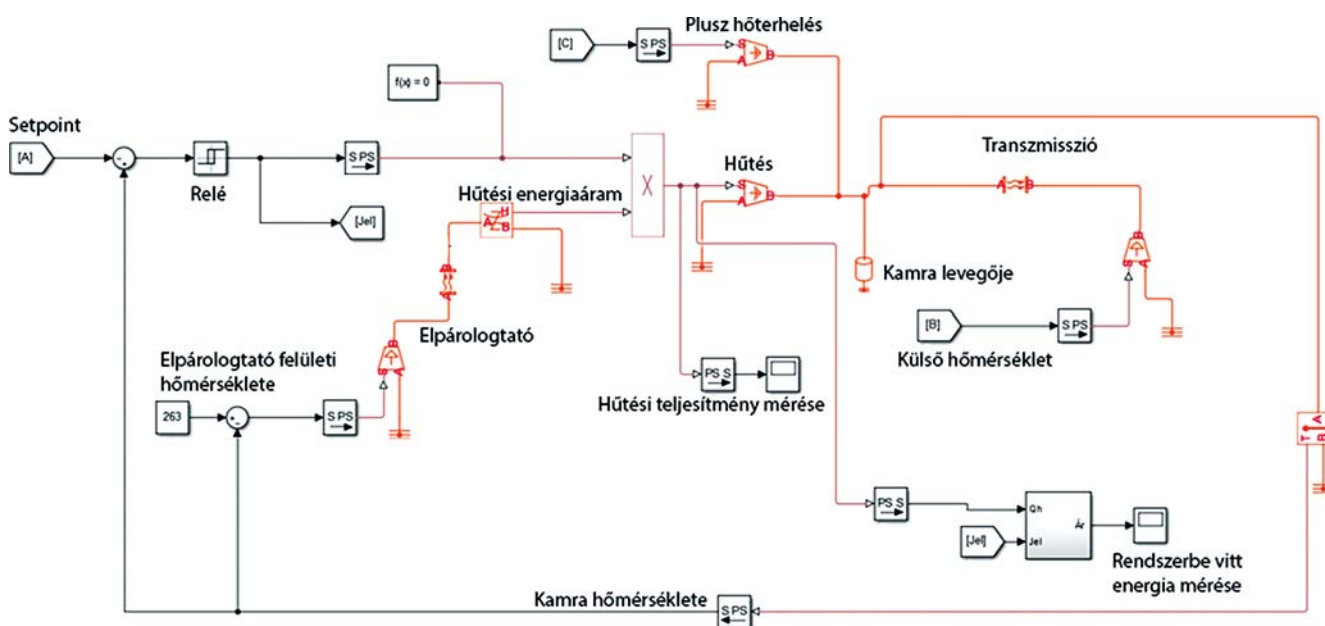
A szimulációs modell kifejlesztése során termálmodellezés készült, felépítésüket tekintve nem tartalmaznak mechanika elemeket, tehát a hűtési körfolyamatot nem modelleztem le, de tervbe vettem a kutatás folytatása gyanánt.

Az összehasonlításhoz a már ismertett Simulink modult használtam. Az On-Off szabályozású hűtőtechnikai rendszer termikus szimulációs modell felépítését a 2. ábra mutatja.

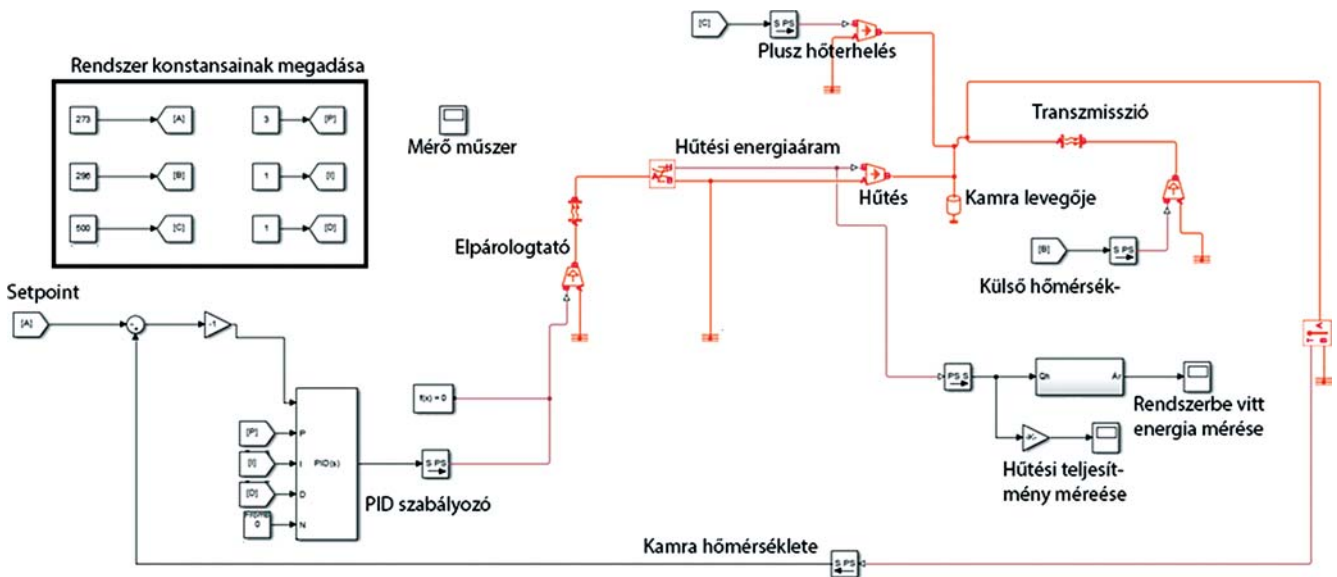
A PID szabályozott hűtőtechnikai rendszer termikus szimulációs felépítése a következő oldalon bemutatott 3. ábrán látható.

3. A mért és a szimulált eredmények összevetése, a szimulációs modell elemzése

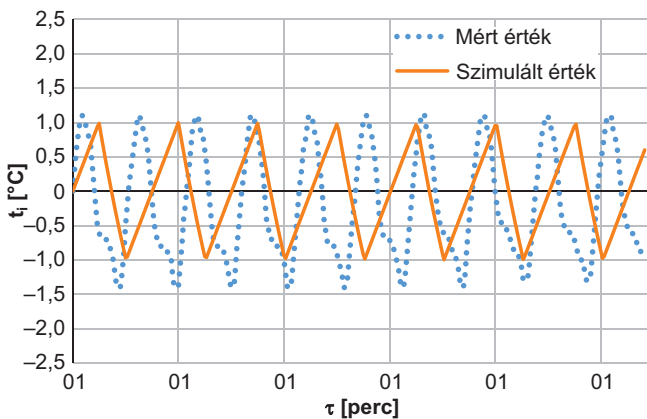
Ahhoz, hogy a szimulációs eredmények jól összehasonlíthatók legyenek a kísérletek során eredményül kapott mért értékekkel, a PID beállításoknak is azonosnak kell lennie. Ennek megfelelően a már ismertett túlszabályozott rendszert vettem össze a harmadik mérési sorozattal [1], állandósult állapotban. Az On-Off szabályozású berendezés összehasonlítását a következő oldalon bemutatott 4. ábrán, a PID szabályozott rendszerét pedig az 5. ábrán láthatjuk.



2. ábra. Az ON-OFF szabályozott rendszer szimulációs modelljének vázlata



3. ábra. A PID szabályozott rendszer szimulációs modelljének vázlata

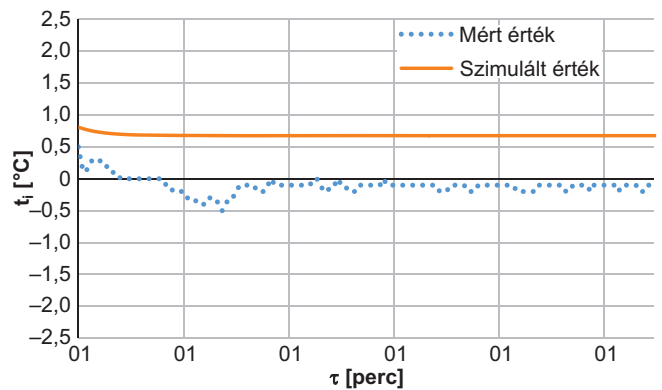


4. ábra. Az ON-OFF szabályozott berendezés mért és szimulált eredményeinek összehasonlítása

A 4. ábrán jól látható, hogy kisebb mértékű eltérés van a két értéksorozat között. Az egyik, hogy a szimuláció során a kamra felmelegedése időben később következett be. Ez annak tudható be, hogy a szimulációs modell kidolgozása során a hűtőkamrára a gyártó által megadott hőátbocsátási tényezőt vettem alapul. Ez természetesen a beépítés során változhat, általában rosszabb irányba. Ennek következtében a valós transzmissziós hőáramnál kevesebb jutott a rendszerbe.

Az eltérés másik lehetséges oka, hogy habár a lehülés meredeksége közel azonos a mért értékével, valós esetben nem $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál van az inflexió („irányváltási”) pont. Ez annak tudható be, hogy az elpárologtatónak van egy tehetetlensége. A hűtés során az elpárologtató, ami egy nagyobb fémtömeg és $-10\dots-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra hűl le. Habár a hűtés leáll, az elpárologtató ventilátora ezzel a lehűlt levegő tömegárammal tovább hűti a kamra belső levegőjét.

A kidolgozott szimulációs modell és a mért értékek közötti eltérés mértéke maximum $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt, amely eltérés oka lehet még a mérés során használt berendezések, mérőeszközök fizikai mivolta és azok korlátai. Például a hőmérőnek is van



5. ábra. Az ON-OFF szabályozott berendezés mért és szimulált eredményeinek összehasonlítása

mérési bizonytalansága, valamint nem az elpárologtatóra van szerelve a már említett túlhűlés miatt. Emellett a hőmérőnek is lehet tehetetlensége, ami gyártmánytól függő paraméter. A szimulációs modell kidolgozása során viszont minden elem definiálása során ideális műszaki paramétereket feltételeztem.

A PID esetében láthatjuk (5. ábra), hogy a rendszer hasonlóan viselkedik. Az egyedüli különbség a szembetűnő beállt értékek közti különbség. Ennek oka lehet a már az On-Off-os berendezésnél is ismertett hőmérő elhelyezés és annak tehetetlensége. A kamra levegőjének nagy része már lehűlt, mire a hőmérő is felveszi az ehhez tartozó hőmérsékletet. Másik oka lehet, hogy a szimulációs modell egy ideális, folytonos időben üzemelő PID szabályozót tartalmaz, ellentétben a mérés során felhasznált diszkrét (adott időnként értéket adó) időben üzemelő szabályozóval. Emellett nem ismerjük a valóságban használt szabályozó pontos felépítését és annak hibáját, ami szintén eltérést okozhat.

A mért és a szimulált eredmények közötti eltérést okozó egyéb tényezők az alábbiak lehetnek még:

- a termikus szimulációs modell nem tartalmazza a hűtőkör többi tagját (kompresszor, kondenzátor, expanziós szelep és a csövezetékek),
- a hűtőkörfolyamat elhagyása miatt a PID közvetlenül az elpárologtatót szabályozza,
- a mérőműszerek elhelyezése, felbontása és mérési bizonytalansága is okozhat eltérést a szimuláció ideális értékeivel szemben,
- a modellben a gyártók által megadott névleges értékeket használtam, amelyek a valóságostól eltérőek lehetnek.

Amennyiben a fent említett tényeket elfogadjuk, akkor mondható, hogy a kidolgozott termikus szimulációs modell közel megfelelő pontossággal írja le a rendszer működését, és annak hőtechnikai viselkedését, a görbék alakja azonos, azaz a szimulációs modell a valós folyamatokat jól leírja, azonban a különböző szabályozású hűtőtechnikai rendszerek energetikai összehasonlító vizsgálatához a kidolgozott modell továbbfejlesztése szükséges, mely a kutatási munka további célja.

Támogatás

Ez a kutatási munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFI Alapból [azonosítószám: NKFIH PD_18 127907] valósult meg, valamint a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja támogatásával készült, Budapest, Magyarország.

Felhasznált irodalom

- [1] Miklos Kassai, Laszlo Kajtar, Jozsef Nyers: *Experimental optimization of energy consumption for DC refrigerator by PID controller tuning and comparison with On-Off refrigerator*. Thermal Science. DOI: 10.2298_TSCI170504188K. (2017) (Közlésre elfogadott!)
- [2] Ekren, O., et al., *Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve*, Int. Journal of Refrigeration, 33 (2010), pp. 1161-1168.
- [3] Matysko, R., *Theoretical model of the operation parameters regulated by the MIMO and SISO system in a cooling chamber* International Journal of Refrigeration, 58 (2015) pp. 53-57.
- [4] Ekren, O., et al., *Performance evaluation of a variable speed DC compressor*, International Journal of Refrigeration, 36 (2013), pp. 745-757.
- [5] Buzelin, L.O.S, et al., *Experimental development of an intelligent refrigeration system*, International Journal of Refrigeration, 28, (2005), pp. 165-175.
- [6] Hamid, N.H.A., et al., *Application of PID Controller in Controlling Refrigerator Temperature*. The 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.
- [7] Aström, K.J.; Häggglund T., *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, second ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park, USA, N.C., 1995
- [8] Ziegler, J.G., Nichols, N.B., *Optimum Settings for Automatic Controllers*. Trans. ASME, 64 (1942), pp. 759-768.
- [9] Nyers J., et al., *Modern and traditional regulation of the evaporation process in the heat pump*, 24rd International Conference "Vyukovanie 2016", Stara Lubovnja, Slovakia, 2016, pp. 265-270.
- [10] Anantachaisilp, P., Lin, Z., *An experimental study on PID tuning methods for active magnetic bearing systems*, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 5 (2013), pp. 146-154.
- [11] Kassai Miklós, Simon Richárd, *Hűtőkamra fogyasztásának kísérleti vizsgálata PID szabályozású DC inverteres hűtő-aggregátok alkalmazásával*, Magyar Épületgépészet, LXVIII. évfolyam, 2019/11. szám, HU ISSN 1215-9913, pp. 3-8. (2019)
- [12] Simon Richárd, *Hűtőkamra energiafelhasználásának vizsgálata újonnan kifejlesztett DC inverteres vezérlő segítségével*. TDK szekció: BME Gépészmérnöki Kar, Gépészeti Eljárás-technika szekció, 2016
- [13] Simon Richárd, *Hűtőkamra energiafogyasztásának vizsgálata DC inverter vezérlővel*. MSc diplomamunka, 2017

35. HKVSZ Szervizkonferencia – kiváló program ideális helyszínen!

Kettős jubileum

2019. november 20-22. között a patinás balatonfüredi Anna Grand Hotel töltötte be a nemes házigazda szerepét a hazai hűtő- és klimatechnikai szakma legrangosabb eseményén. Az elegáns helyszín kínálta lehetőségek, a környezet, és a kiszolgálási színvonal maximális volt, a szakmai program a jelenlévők véleménye szerint sok-sok korábbi évek programját múlta felül.

A konferencia során kettős jubileum töltötte be szerepét: a Szervizkonferenciák sorában idén volt a 35. állomása a rendezvénynek, továbbá az immáron 11. alkalommal megrendezésre kerülő Járműklíma Szakértői Tanácskozás szakmai társ-szervező Autószerelők Országos Egyesülete alapításának 20. évfordulóját ünnepelte! Ennek a kettős ünnepélyes alkalomnak szenteltetett a konferencia megnyitója: a két egyesület elnöke Várkonyi Nándor (HKVSZ) és Spindler Tibor (AOE) közös megnyitó köszöntővel üdvözölték a megjelenteket. Így a konferencia első napjának délelőtti közös plenáris jellegű



volt, ahol bevezetésképpen szó esett az F-gáz rendelet 2020-tól bekövetkező szigorításairól és az erre adható alternatív megoldásokról, majd a Nemzeti Klímavédelmi Hatóság tartotta meg előadását az ide vonatkozó törvényi rendelkezések gyakorlati alkalmazásáról, és a Klímagáz Adatbázissal kapcsolatos felhasználói kérdésekről fórum-lehetőséget biztosítottak.