

# Simulacija temperature v hladilnih aparatih

Gregor Papa<sup>1</sup>, Peter Mrak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Odsek za računalniške sisteme, Institut "Jožef Stefan", Jamova c. 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>Razvojni laboratorij Programa HZA, Gorenje, d. d., Partizanska c. 12, 3503 Velenje, Slovenija

E-pošta: gregor.papa@ijs.si, peter.mrak@gorenje.si

**Povzetek.** V razvojnem oddelku podjetja Gorenje, d. d., poteka razvoj zelo kompleksnega hladilnega aparata. Pri razvoju sodelujejo tudi strokovnjaki z drugih področij z namenom, da razvijemo aparat, ki bo v vsej svoji funkcionalnosti deloval optimalno. Za lažji in hitrejši potek razvoja smo se odločili, da bi z uporabo matematičnih orodij simulirali in optimirali delovanje hladilnega aparata. Optimalno delovanje hladilnega aparata pomeni, da le-ta pri najnižji možni porabi električne energije ohlaja prostore aparata na želeno temperaturo. V ta namen smo razvili simulator, ki omogoča simulacijo gibanja temperatur v notranjosti hladilnega aparata ob različnih parametrih regulacije. Z njim nadomestimo del meritev, ki so zaradi počasnih toplotnih procesov problem preizkušanja različnih načinov vodenja. Z zmanjšanjem časa meritev zmanjšamo tudi stroške razvoja aparata.

**Ključne besede:** simulacija, hladilni aparat

## Temperature Simulations in Cooling Appliances

The R&D laboratory of Gorenje d. d. develops complex cooling appliances. In their developing process there are also engineers from other areas participating. Their task is to develop optimal-performance appliances, regarding all functionalities. To allow for an easier and faster development, we used mathematically-based simulation and optimization tools. A cooling appliance operates optimally when it is able to cool to the desired temperature at the lowest possible power consumption. For the purpose of our investigation we developed a simulator for simulating temperatures inside the appliance cabinets at different control parameters. By using simulations a considerable part of measurements was replaced, and as they are much time consuming due to the slow thermal processes, a lot of time was saved which in the end also minimized the development manufacture cost of the appliance.

## 1 UVOD

Zaostrene razmere na trgu zahtevajo gospodinjske aparate z veliko dodano vrednostjo. Poleg vgrajenih raznovrstnih funkcionalnosti morajo aparati delovati z najmanjšo možno močjo oziroma imeti nizko porabo električne energije. Hladilno-zamrzovalni aparati so med gospodinjskimi aparati največji porabniki električne energije. Vodilni slovenski proizvajalec velikih gospodinjskih aparatov si zato prizadeva izdelati energijsko učinkovite aparate z optimalnim delovanjem. Optimalno delovanje pomeni, da aparat pri najnižji možni porabi električne energije ohlaja prostore aparata na želeno temperaturo. Takšna optimizacija navadno zahteva veliko dolgotrajnih razvojnih meritev ali temeljito teoretično analizo hladilnega sistema in izdelavo zapletenega mate-

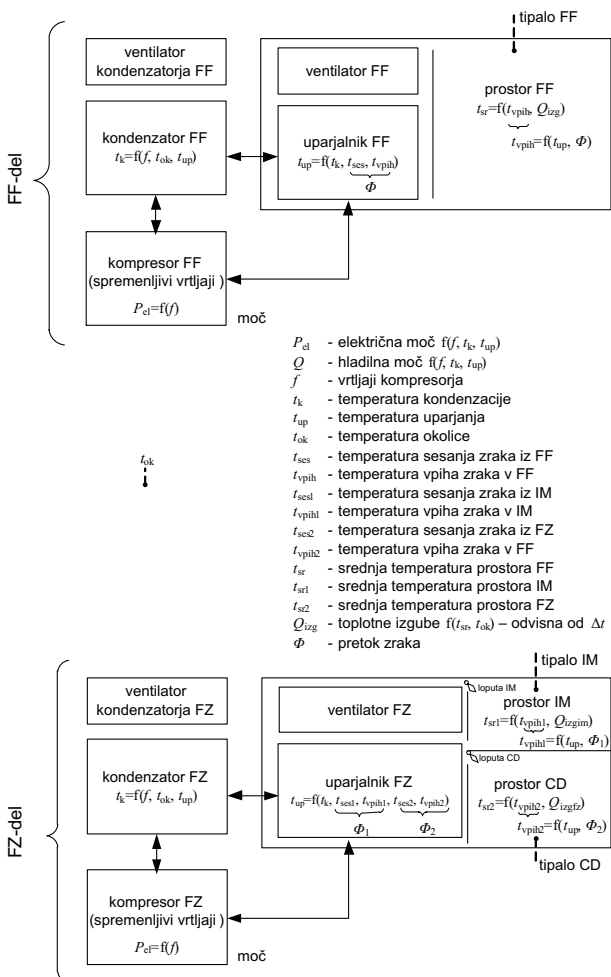
matičnega modela za simulacijo [1], [2], [3], [4], [5]. Zanj navedeni način zahteva veliko časa in specifičnega znanja uporabe, po navadi dragih, orodij (Gambit, Fluent, Matlab). Ob morebitni spremembi geometrijskih lastnosti pa je treba postopek ponoviti skoraj od začetka.

V razvoju hladilnih aparatov je za vsak nov tip aparata potrebno opraviti vrsto meritev, da določimo optimalno delovanje. Toplotni procesi v hladilnih sistemih so po svoji naravi zelo počasni. Ena meritev za določitev porabe energije lahko po standardnih predpisih traja več dni. V članku predstavljamo simulator, ki deluje na podlagi minimalnega seta različnih kratkih meritev. Te meritve vnesemo v program Microsoft Excel, v katerem je narejen simulator. Simuliranje na podlagi vnesenih podatkov v program Excel zahteva od uporabnika minimalno računalniško znanje. V primeru spremembe hladilnega aparata (geometrijskih mer, vgrajenih komponent, načina regulacije) ponovimo del meritev, ki se nanašajo na spremembo, in jih ponovno vnesemo. To pomeni, da na enostaven način prilagajamo simulator. V primeru izdelave popolnoma novega aparata pa lahko po ustaljeni rutini (avtomatiziranih meritvah) v zelo kratkem času priredimo simulator za uporabo z novim aparatom. Zaradi teh prednosti je program Excel orodje, ki zmore simulirati različne kompleksne sisteme [6], [7]. Primerjava izmerjenih vrednosti in rezultatov simulacije kaže na natančnost simuliranja hladilnega aparata, brez poznanja posebnih programskih jezikov in uporabe dragih programskih orodij.

## 2 DELOVANJE APARATA

Aparat je sestavljen iz treh prostorov; zgornji prostor ima funkcijo hladilnika in se imenuje FF (Fresh Food) pro-

stor. Srednji prostor je namenjen napravi za pridobivanje ledu in se imenuje IM (Ice Maker). Spodnji prostor pa lahko deluje v več različnih načinih in se zato imenuje CD (Convertible Drawer). Spodnja dva prostora tvorita FZ (Freezer). Regulacija temperature je izvedena s hladilnim sistemom, ki vsebuje kompresor s spremenljivimi vrtljaji, ki poganja plin, ta v uparjalniku ekspandira in odvzema toploto uparjalniku. Uparjalnik hladi zrak, ki ga potem z ventilatorji in prezračevalnim sistemom vpihujemo v posamezen prostor. Srednji prostor (IM) in spodnji prostor (CD) imata skupen hladilni sistem (kompresor, uparjalnik in ventilator), kar pomeni, da je regulacija teh prostorov soodvisna. Zaradi tega imata prostora IM in CD še loputi, s katerima reguliramo dotok hladnega zraka v posamezen prostor. Slika 1 predstavlja koncept aparata in njegove komponente.



Slika 1: Bločna shema hladilnega aparata

Kompresorjema lahko s spremembo frekvence vhodnega signala spreminjamo število vrtljajev motorja na minuto (v nadaljevanju: frekvenca kompresorja), s čimer spreminjamo tudi njuno moč. Hitrost vrtenja ventilatorja lahko preklapljammo med maksimalnimi, srednjimi in minimalni vrtljaji. S spreminjanjem hitrosti vrtenja ventilatorja vplivamo na količino vpihanega ohlajenega

zraka v prostor.

### 3 MERITVE IN ANALIZA

Na podlagi analize meritev temperature v različnih delih aparata je bilo ugotovljeno, da je za zadovoljivo napovedovanje poteka temperature na tipalu in v prostoru dovolj upoštevati samo meritve temperature tipal v odvisnosti od delovanja kompresorja. Meritve vseh drugih temperatur bistveno ne prispevajo k natančnosti napovedovanja temperature na tipalu, saj je v aparatu preveč medsebojnih odvisnosti različnih merjenih temperatur. Obenem je pri meritvah, izvedenih pod enakimi pogoji, precej razlik, ki so posledica dodatnih vplivov (izolacijski material, postavitev tipal ...), kar vnaša v natančnost meritev določeno stopnjo nedoločljivega šuma. Tako smo za obdelavo meritev FZ-dela merili samo temperaturi na tipalih IM in CD, srednji temperaturi IM in CD ter moč kompresorja. Za obdelavo meritev FF-dela pa temperaturo na tipalu FF, srednjo temperaturo v FF ter moč kompresorja.

V FZ-delu deluje aparat v štirih značilnih načinih, ki v grobem določajo štiri različne odzive v prostorih; odprti loputi IM in CD (označeno kot delovanje 1-1), odprta loputa IM in zaprta loputa CD (1-0), zaprta loputa IM in odprta loputa CD (0-1), zaprti loputi IM in CD (0-0). V FF-delu deluje v dveh načinih; vklopljen kompresor in izklopljen kompresor.

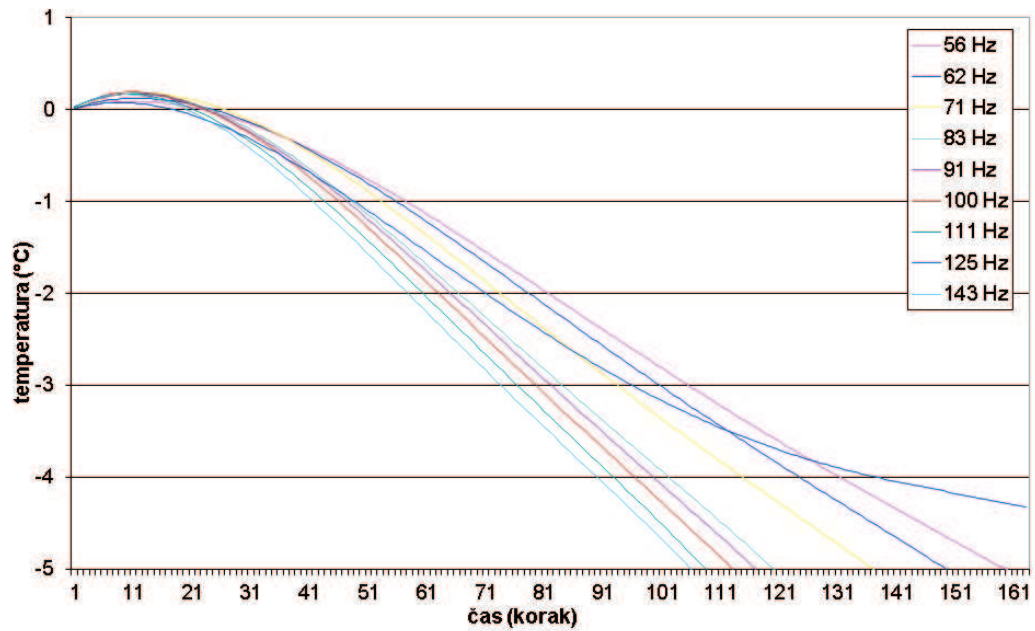
#### 3.1 Obdelava meritev

Za obdelavo meritev smo v programu Excel uporabili delovne liste s podatki in makro programe. V ustrezni delovni list, glede na frekvenco kompresorja in vrtljaje ventilatorja, se vnese meritve temperatur in moči. Nato je treba iz tabelaričnega ali pa grafičnega pregleda določiti (časovna) območja, ko se je aparat nahajal v enem izmed omenjenih načinov delovanja. Da bi zmanjšali naključne motnje, lahko vnesemo do pet podobnih meritev, iz katerih izračunamo povprečje. V praksi se izkaže, da je dovolj vzeti povprečje treh meritev, da izničimo vpliv naključnih motenj. Makro program nato avtomatsko izračuna povprečne vrednosti poteka krivulj na posameznem območju (1-1, 1-0, 0-1 in 0-0) in določi koeficiente ( $a, b, c, d$ ) polinomov četrtega reda, ki aproksimirajo podane izmerjene krivulje.

$$T = at^4 + bt^3 + ct^2 + dt + e \quad (1)$$

Konstanta  $e$  ni podana, saj se preračuna sproti (ob vsaki spremembi koeficientov, zaradi spremembe načina delovanja; spremembe frekvence kompresorja ali vrtljajev ventilatorja), in sicer tako, da ostane krivulja zvezna (po potrebi se pomakne navzgor ali navzdol). Za omenjena območja dobimo tudi koeficiente ( $a, b$ ) eksponentne funkcije, ki pomeni aproksimacijo porabe moči na kompresorju.

$$P = at^b \quad (2)$$



Slika 2: Gibanje temperatur pri različnih frekvencah

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	SIMULATOR delovanja IM in CD prostorov v hladilnem aparatu											
2												
3	srednja temp.	histereza	vklop	izklop	srednja temp.	histereza	vklop	izklop	nivo	vklop*	vklop*	
4	IM	10.2 °F	4. °F	14 °F	6 °F	-12.11 °C	2.22 °C	-9.89 °C	-14.33 °C	96	13.9 °F	-10.07 °C
5	CD	16.1 °F	4. °F	20 °F	12 °F	-8.83 °C	2.22 °C	-6.61 °C	-11.06 °C	92	19.5 °F	-6.97 °C
6									[0 - 100]			
7												
8			interval 1	interval 2	interval 3	interval 4	interval 5					
9		meja intervala	3	47	60	1	28	[1 - 1000]				
10		frekvenca kompresorja	71	71	71	71	71	[56, 62, ..., 143]				
11		vrtljaji ventilatorja	max	mid	min	mid	mid	(max, mid, min)				
12												
13												
14		naklon	100	[30 - 100]								
15		simulirani interval	5000	[100-20160]								
16		interval za izračune	2880	[100-5760]								
17												
18												
19		SIMULIRAJ						poraba:	0.665 kWh/dan			
20		(Ctrl+Shift+S)						srednja IM:	-14.9 °C			
21								srednja CD:	-15.1 °C			
22								RVČ:	44 %			

Slika 3: Nastavljanje parametrov simulacije

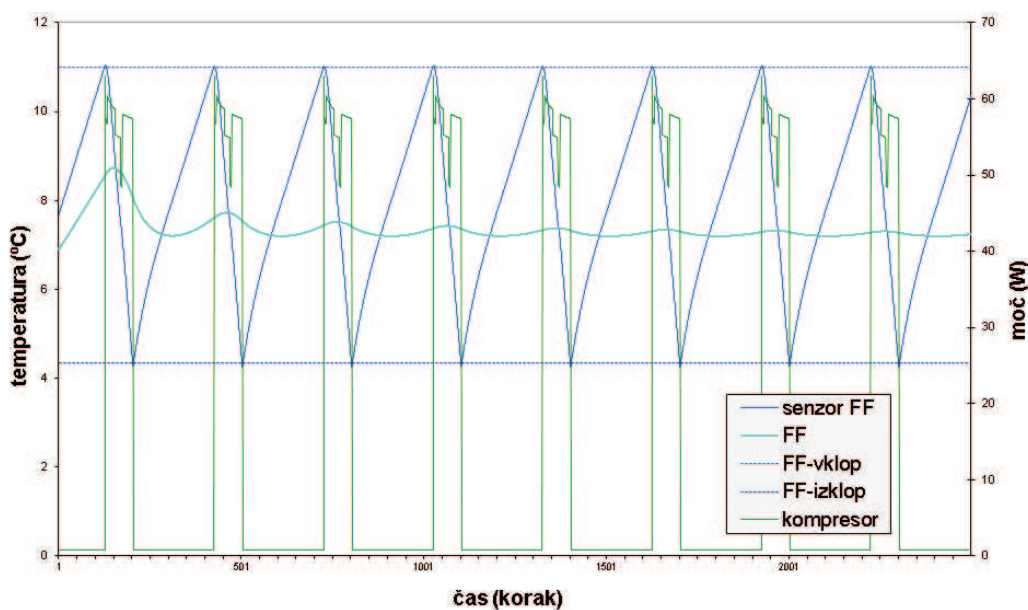
Stranski produkt obdelave meritev je primerjava potekov temperature v posameznem prostoru in v posameznih delovnih območjih v odvisnosti od frekvence kompresorja in/ali vrtljajev ventilatorja. Na ustreznem delovnem listu je mogoče določiti, pri katerih frekvencah kompresorja in pri kakšnih vrtljajih ventilatorja želimo primerjati krivulje odzivov. To je posebej pomembno pri analizi aparata, saj lahko tako ugotovimo, v katerih načinih aparat deluje dobro in v katerih nezadovoljivo. Na podlagi tega lažje določimo vzrok morebitnih odmikov krivulj (na primer: hladilni sistem ni primeren za visoke frekvence kompresorja, ventilator ne vpahuje dovolj zraka, napaka pri meritvi itd.). Primer

poteka temperature pri različnih frekvencah kompresorja in maksimalnih vrtljajih ventilatorja v prostoru IM pri odprtih loputih IM in CD je prikazan na sliki 2.

#### 4 SIMULATOR DELOVANJA APARATA

Simulator je izdelan v programu Excel. Sestavljen je iz štirih delovnih listov ter makro programov (v obsegu 600 vrstic) za simulacijo delovanja.

V simulator (slika 3) vpišemo zeleno temperaturo IM in CD ter vrednost histereze za IM in CD. Vpišemo tudi nivo temperature v prostoru, ko se loputa odpre, čeprav še ni dosežena vklopna temperatura, vendar je zaradi odprtosti druge lopute (in delovanja kompresorja)



Slika 4: Rezultat simulacije - grafični prikaz

smotno ohlajati tudi ta prostor. Zaradi preglednosti se avtomatsko izpišejo tudi preračunane temperature vklopov in izklopov, v stopinjah Fahrenheita in v stopinjah Celzija. Cikel delovanja kompresorja je razdeljen na pet intervalov. Posameznemu intervalu vpišemo trajanje in način, kako naj deluje. Prvi interval traja od vsakega vklopa kompresorja naprej, drugi interval se začne po zaključku prvega itd. Če je delovanje kompresorja daljše, kot je vsota trajanj petih intervalov, veljajo nastavitve zadnjega intervala. Vsakemu intervalu določimo, s katero frekvenco naj deluje kompresor (pri tem uporabljamo frekvence, ki jih je določila razvojna skupina, saj mora biti regulacija izvedljiva tudi v praksi), in s kakšnimi vrtljaji (maksimalnimi, srednjimi ali minimalnimi) naj se vrti ventilator, ki vpihuje ohlajen zrak v prostor. Določiti je treba še čas simuliranega delovanja in kolikšen zadnji del celotnega simuliranega časa delovanja naj se upošteva pri izračunih porabe energije. Tako zagotovimo, da izzvenijo prehodni pojavi in da preide delovanje aparata v ustaljeno stanje (delovno območje).

Simulacija traja približno 10 sekund pri simuliranju delovanja 48 ur (5760 korakov) na računalniku z 2GHz procesorjem. Po zaključku simulacije se izpišejo rezultati: dnevna poraba v kilowatt-urah, srednji temperaturi v prostorih IM in CD, relativni vklopni čas (RVČ) kompresorja. Pri izračunu porabe se poišče največji možni interval znotraj intervala za izračune, ki vsebuje cele cikle (interval se začne z začetkom enega cikla in konča tik pred začetkom cikla, ki ga ne uporabimo več za izračun). Z upoštevanjem samo celih ciklov (enako izračunava porabo merilni sistem v laboratoriju HZA, kakor je definirano s standardom [8]) je izračun porabe,

v kilowatt-urah na dan, (enačba 3) in drugih vrednosti natančnejši.

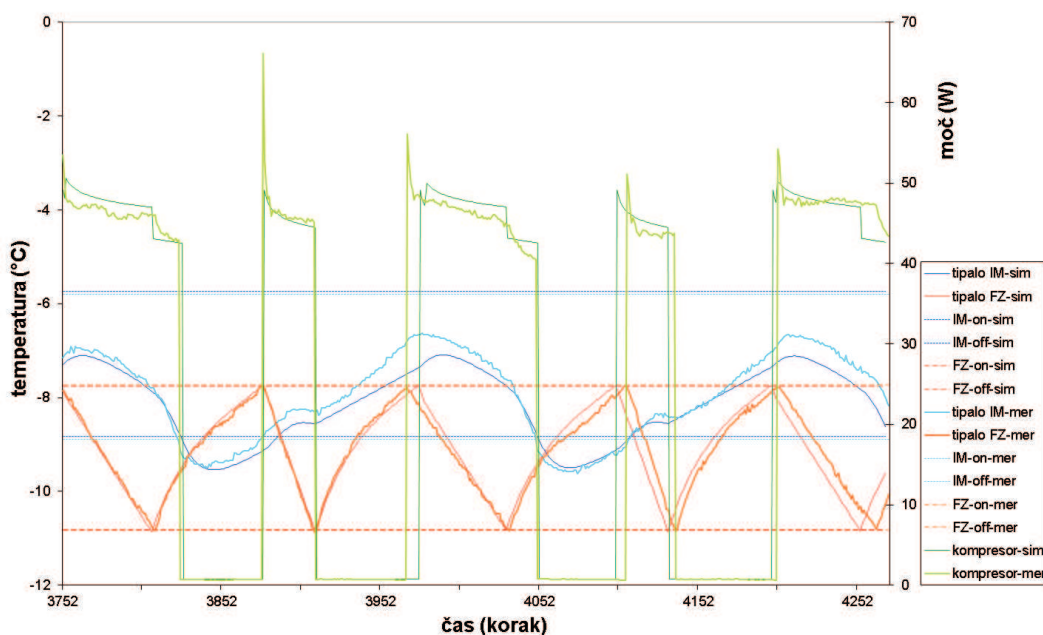
$$poraba = \frac{poraba_{interval} \times 2880}{dolžina_{interval} \times 12000} \quad (3)$$

Srednji temperaturi sta povprečni temperaturi v posameznem prostoru v celem intervalu. RVČ pa je delež časa znotraj intervala, ko kompresor deluje.

Glavni rezultat simulacije je dosežena poraba energije in dosežene temperature pri določenih nastavitvah parametrov regulacije. Dobljene rešitve pa morajo biti tudi izvedljive na realnem aparatu, zato nam simulator tudi izriše časovni potek gibanja simuliranih temperatur (slika 4). Potek prikazuje delovanje v ustaljenem stanju, to je v delovni točki aparata. S spremembo parametrov regulacije lahko simuliramo tudi delovanje aparata pri različnih delovnih točkah. Simulator nam izriše delovanje kompresorja in moči, ki jo pri tem troši, gibanje temperatur tipal ter srednje temperature v posameznih prostorih. Na podlagi teh podatkov lahko izračunamo energetska učinkovitost aparata pri normalni uporabi. Normalna uporaba pomeni, da simuliramo delovanje naloženega aparata z merilnimi paketi (predstavljajo hrano) pri zaprtih vratih kot to veleva standard [8].

Z večkratno uporabo simulatorja in različnih nastavitvev lahko hitro dobimo najprimernejše parametre regulacije. Te nato vnesemo tudi v aparat in izmerimo dejanske rezultate. S tem je čas iskanja primernih nastavitvev mnogo krajši, kakor če bi jih iskali samo preko meritev.

Simulator za FF del simulira temperaturo samo v enem prostoru, zato je potrebnih manj vhodnih podatkov, ustrezno pa je spremenjen tudi izpis na grafu.



Slika 5: Primerjava izmerjenih in simuliranih krivulj

#### 4.1 Validacija simulatorja

V laboratoriju HZA v Gorenju je bila izvedena validacija simulatorja. Primerjali so rezultat simulacije in meritve pri enakih nastavitvah regulacije. Razlike med simuliranimi in dejanskimi (izmerjenimi) vrednostmi so bile zanemarljivo majhne oziroma sprejemljive glede na število dejavnikov, ki vplivajo na delovanje aparata. Primerjava simuliranih in merjenih vrednosti, pri enakih nastavitvah, je bila izvedena s primerjalnim grafom (slika 5).

Odmiki med primerjanimi krivuljami so posledica vpliva naključnih motenj, ki jih ne moremo izničiti. Podobne razlike dobimo tudi, če primerjamo dve meritvi na realnem aparatu. Očitno na stabilnost delovanja aparata vpliva precej dejavnikov, ki niso identificirani. Zato mora biti regulacija aparata dovolj robustna, da zagotovimo zanesljivo delovanje.

## 5 REZULTATI

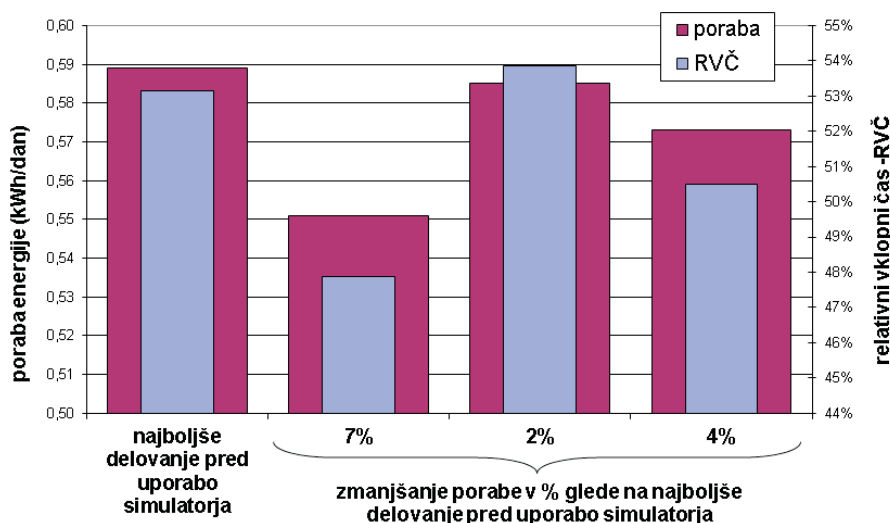
Za zadovoljivo natančnost simulacije delovanja hladilnega aparata je dovolj meriti samo odzive temperatur na tipalih aparata in povprečne temperature v aparatu. Pri tem je pomembno, da zajamemo vse možne načine delovanja - posneti moramo odzive pri vseh primerjanih frekvencah. Med obdelavo podatkov zlahka ugotovimo, ali je smiselno obdelovanje naprej vseh mogočih kombinacij, oziroma katere lahko izpustimo (zaradi prevelike moči - poraba energije in nedoseganje zelenih temperatur). Število teh začetnih meritev se množi z vplevanjem več neodvisnih elementov. V našem primeru

imamo deset načinov delovanja kompresorja (pri desetih frekvencah) in tri načine delovanja ventilatorja. V okviru analize je imelo velik pomen minimiziranje teh začetnih meritev in njihova avtomatizacija. Pravilno izmerjeni odzivi pa so ključnega pomena za pravilno in zanesljivo delovanje simulatorja. S sprotnim pregledovanjem ugotovimo, koliko lahko zmanjšamo čas meritve enega načina in njegovega odziva.

Potrjeno je bilo, da rezultati simulacije, dobljeni pri enem prototipu, ne veljajo za drugega. Spremenijo se namreč karakteristike aparata, njegovi odzivi, kar posledično pomeni, da so optimalne nastavitve drugačne. Dodana vrednost izdelanih aplikacij je, da lahko dobljene rezultate vseeno uporabimo pri izdelavi novega prototipa. Če ugotovimo, da nekatere nastavitve ali komponente ne prispevajo k izboljšanju aparata, le-teh ne uporabimo, kar posledično pomeni znižanje stroškov, oziroma uporabimo tiste komponente, ki najbolje delujejo in tako zagotovimo zanesljivost in robustnost delovanja.

Slika 6 prikazuje rezultate simulacije pri različnih nastavitvah. RVČ pomeni relativni vklopni čas kompresorja in je v korelaciji s porabo energije. Pri tem je treba povedati, da lahko izmerjena poraba niha za približno  $\pm 1\%$  zaradi motenj. Motnje, ki vplivajo na izmerjeno porabo energije, so nihanje temperature okolice, natančnost merilnega sistema, nihanje napetosti napajanja itd.

Zaradi manjše kompleksnosti FF dela je z uporabo simulatorja možno oceniti ali za regulacijo FF sploh potrebujemo toliko različnih možnosti za nastavljanje



Slika 6: Primerjava rezultatov pri različnih nastavitvah

(spremenljive frekvence kompresorja, spremenljivi vrtiljaji ventilatorja). Posledično to pomeni enostavnejši algoritem regulacije ter enostavnejšo in cenejšo krmilno elektroniko aparata.

## 6 SKLEP

Razvojni čas hladilnega aparata, posebej zelo kompleksnega, se meri v mesecih. Z uporabo simulatorja lahko nadomestimo velik del razvojnih meritev in tako zmanjšamo stroške razvoja. Groba ocena stroškov razvojnih meritev enega aparata v laboratoriju HZA je 50 eurov na dan. S pridobljenimi orodji lahko dejansko simuliramo delovanje aparata več dni v roku nekaj sekund in tako znatno zmanjšamo čas in stroške razvoja. Z uporabo simulacij smo dosegli želene cilje, ne samo energijsko varčen aparat, ampak tudi zanesljivo delovanje le-tega.

## ZAHVALA

Delo je bilo izvedeno v okviru industrijskega aplikativnega projekta, ki ga je sofinanciralo podjetje Gorenje, d. d.

## LITERATURA

- [1] G. Ding, C. Zhang, Z. Lu, "Dynamic simulation of natural convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application: Part I: Component models," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 10, pp. 1513–1524, 2004.
- [2] J.K. Gupta, M. Ram Gopal, S. Chakraborty, "Modeling of a domestic frost-free refrigerator," *International Journal of Refrigeration*, vol. 30, no. 2, pp. 311–322, 2007.
- [3] O. Laguerre, S. Ben Amara, J. Moureh, D. Flick, "Numerical simulation of air flow and heat transfer in domestic refrigerators," *Journal of Food Engineering*, vol. 81, no. 1, pp. 144–156, 2007.

- [4] Z. Lu, G. Ding, C. Zhang, "Dynamic simulation of natural convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application: Part II: System simulation and application," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 10, pp. 1525–1533, 2004.
- [5] M. Mraz, "The design of intelligent control of a kitchen refrigerator," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 56, no. 3, pp. 259–267, 2001.
- [6] A.M. Brown, "Simulation of axonal excitability using a Spreadsheet template created in Microsoft Excel," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 63, no. 1, pp. 47–54, 2000.
- [7] I. Meineke, J. Brockmoller, "Simulation of complex pharmacokinetic models in Microsoft EXCEL," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 88, no. 3, pp. 239–245, 2007.
- [8] ANSI/AHAM HRF-1/2004, *Energy, Performance and Capacity of Household Refrigerators, Refrigerator-Freezers and Freezers*, 2004.

**Gregor Papa** je raziskovalec na Institutu "Jožef Stefan". Raziskuje in deluje na področjih optimizacijskih tehnik, metahevrstičnih algoritmov, visokonivojske sinteze digitalnih vezij, strojnih implementacij kompleksnih algoritmov in izboljšav industrijskih izdelkov. Njegova znanstvena dela so objavljena v zbornikih mednarodnih konferenc, mednarodnih revijah in knjigah.

**Peter Mrak** je zaposlen v podjetju Gorenje, d. d., v razvojnem laboratoriju oddelka hladilno zamrzovalnih aparatov. Raziskuje in deluje na področjih preizkušanja elektronskih vezij, avtomatizacije merilnih postopkov, krmiljenja in regulacije hladilnih sistemov ter zagotavljanja kakovosti produktov.