

Analiza zajetih vhodnih in izhodnih parametrov hladilne tehnike za potrebe optimizacije stroškov in porabe hladilne tehnike nakupovalnih centrov

Špela Vidrih¹, Mark Umberger^{1,2}, Iztok Humar¹

¹ Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

² ENTIA d.o.o., Zavrh pod Šmarno Goro 13E, 1211 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: iztok.humar@fe.uni-lj.si

Optimization of the captured data for the purpose of optimizing costs and consumption in refrigeration technique of shopping centers

Large shopping centres consume a significant share of electric energy produced within which the biggest part is consumed by their refrigeration systems. This paper provides analysis of the data captured inside refrigeration systems of four large shopping centres in Ljubljana. The data consists of influential parameters as well as of various modes of consumption measurements, which altogether provides a detailed look into refrigeration system as a whole and finally, offers great potential in optimization of electric energy consumption and the associated costs. The paper exposes the parameters that have a major impact on system performance and suggests improvements.

1 Uvod

Nagel vzpon porabe električne energije ima negativne ekonomske in ekološke posledice. Povečani izpusti toplogrednih plinov ter trend rasti cen energentov zaradi omejene razpoložljivosti tako narekujejo znižanje porabe energije na vseh segmentih. Učinkovita raba električne energije predstavlja zato predvsem večjim porabnikom pomemben strateški cilj. Nakupovalni centri porabijo kar 3 % celotne proizvedene električne energije, znotraj njih največji del, med 50 % in 80 % odpade na hladilno tehniko [1]. Optimizacija slednje zato ponuja visoke prihranke in je v zadnjem času močno aktualna.

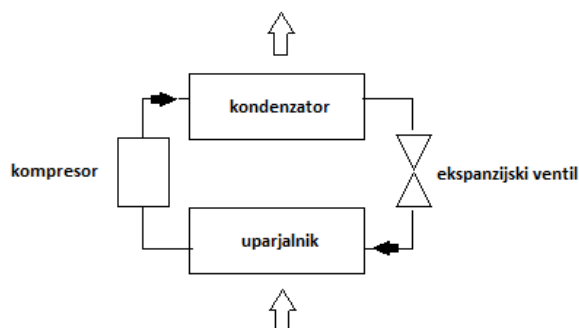
Pristopov k učinkoviti rabi električne energije v hladilni tehniki je več. Želja po zagotavljanju najvišje učinkovitosti pri tem zahteva celosten vpogled v optimiziran sistem, kakovost optimizacije je tako močno odvisna od njenih začetnih faz, ki vključujejo razumevanje sistema, načrtovanje in izvedbe merjenja sistemskih parametrov ter analizo njihovega doprinosa k sistemu. Poleg strokovnega poznavanja ozadja delovanja sistema igra pomembno vlogo moderna informacijska tehnologija, omogoča namreč kvaliteten zajem, varno hrambo in nenazadnje uspešno in hitro obdelavo ter analizo podatkov [2]. Predvsem slednja narekuje razvoj merilnega sistema z omogočenim oddaljenim centralnim vpogledom v vhodne in izhodne merjene količine. Centralni vpogled v parametre

oddaljenih enot omogoča visoko sistematičnost pri vseh fazah optimizacije in zahteva vgradnjo telekomunikacijskih standardov, vmesnikov in protokolov, ki omogočajo medsebojno povezovanje sistemov, njihovo analizo in primerjavo. Nadgrajena komunikacijska vodila s pripadajočimi prehodni nadalje omogočajo integracijo množice samostojnih sistemov v heterogeno celoto, njihovo primerjavo ter končno prinaša nove izboljšane možnosti analize.

Prispevek se osredotoča na opis obstoječega sistema za merjenje, zbiranje ter analizo vhodnih in izhodnih parametrov v hladilni tehniki štirih nakupovalnih centrov s končnim namenom optimizacije stroškov porabe električne energije.

2 Hladilni sistemi nakupovalnih centrov in način zajemanja vhodnih in izhodnih parametrov

Namen hladilnih sistemov nakupovalnih centrov je shramba in razstava hitro pokvarljive hrane s ciljem čim višje prodaje. Sistem sestavlja več hladilnih elementov, ki so lahko vitrine, ki omogočajo doseganje živil s prednje strani, ali krste, v katere potrošniki segajo z zgornje strani. Osnovo hladilnega sistema predstavlja parno-kompresijski proces, za katerega velja, da hladilno sredstvo kroži znotraj zaključene zanke, sestavljene iz kompresorja, ekspanzijskega ventila, uparjalnika in kondenzatorja in je prikazan na sliki 1, kjer predstavljajo puščice smer prehajanja toplote.



Slika 1: Shema kompresijskega cikla, s puščicami je označena smer prehajanja toplote

Uparjalnik je nameščen v hladilnih elementih in okoliškemu mediju odvzema toploto, kondenzator, nameščen zunaj, pa toploto okoliškemu mediju oddaja. Ekspanzijski ventil in kompresor v nasprotju skrbita za

pretok hladilnega sredstva ter zagotavljanje potrebne tlačne razlike. Hladilni sistem vsebuje več hladilnih elementov, en nakupovalni center pa več sistemov. Posamezni hladilni elementi so v sistem povezani s cevmi, po katerih se pretaka hladilna tekočina, ki s tlačnimi razlikami prenaša toploto med uparjalnikom in kondenzatorjem. Večji nakupovalni centri uporabljajo centraliziran hladilni sistem, za katerega velja, da imajo hladilni elementi vgrajen uparjalnik ter ekspanzijski ventil, medtem ko so kondenzacijske enote nameščene na strehi zgradbe, kompresorji pa v strojnici.

V splošnem vsebujejo živilski nakupovalni centri dva temperaturna nivoja: plus nivo za ohranjanje ohlajenih izdelkov in minus nivo za shrambo zamrznjenih živil. Prvi izdelki so po standardu vzdrževani med 1 °C in 14 °C, slednji pa imajo zgornjo predpisano temperaturno mejo -18 °C, pri čemer je potrebnih več temperaturnih senzorjev znotraj enega elementa.

Celovita rešitev nadzora hladilne tehnike med drugim zajema krmilnike za nadzor temperatur, ekspanzijskih ventilov ter kompresorjev. Krmilnik za nadzor kompresorja vklaplja in izklaplja ali zvezno regulira posamezne kompresorje ter tako skrbi za možnost dinamičnega prilagajanja moči glede na trenutni tlak. Velja, da vsakemu hladilnemu elementu pripada svoj krmilnik za izvajanje kroženja ohlajenega zraka, za delovanje ventilatorjev ter nadzor odprtosti ekspanzijskega ventila glede na merjeno temperaturo. Krmilniki so z namenom možnosti sinhronizacije medsebojno povezani s protokolom (npr. DanBuss), ki nadalje omogoča dostop in nadzor s centralnega računalnika. Upravnik hladilnih sistemov lahko tako iz enega mesta spremlja vse temperature in stanja krmilnikov ter v primeru napak beleži morebitne alarme. Ponudnik tovrstnih rešitev nadzora hladilne tehnike je tudi Danfoss, ki ponuja rešitev, s katero lahko s pomočjo spletnega vmesnika nadzorujemo celotno delovanje hladilnega sistema. Vmesnik beleži in shranjuje vse parametre hladilnega sistema in omogoča njihov tabelarični ali grafični prikaz ter inteligentno analizo, ki omogoča nadzor nad nedelujočimi sistemi, časovno predvidevanje nedelovanja, identifikacijo prekomerne porabe električne energije. Poleg naštetega je možna tudi kontrola kvalitete hrane, upoštevajoč HACCP standarde ter na tem temelječa izboljšava, beleženje uporabnikove aktivnosti znotraj vmesnika in podobno.

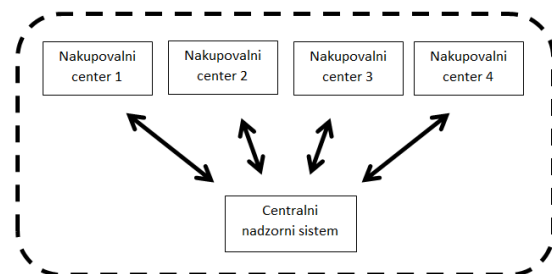
Izbrana nakupovalna središča vsebujejo omenjeno Danfossovo rešitev, ki zajema podatke iz krmilnikov, ki nadzirajo posamezne vitrine in parno-kompresijski cikel. Dostop omogoča spletni sistem, s pomočjo katerega smo zajeli in analizirali vhodne in izhodne parametre.

Izbrani krmilniki lahko krmilijo eno dve ali tri hladilne elemente hkrati. Sistem spremlja več vhodnih in izhodnih v naslednjem razdelku opisanih parametrov. Po vsakem intervalu petnajstih minut se v bazo shranjujejo parametri vseh krmilnikov, ki so nato

dostopni preko spletnega uporabniškega vmesnika. Podatki so nadalje lahko analizirani s pomočjo izrisa na grafu ali s predhodnim prenosom na lokalni računalnik v zapisu CSV, ki je primerna za enostavno nadaljnjo primerjavo in analizo. Za vsak krmilnik smo z namenom kasnejše analize shranili datoteke s podatki o omenjenih 15 minutnih zapisih vhodnih in izhodnih kazalcev stanj hladilnih sistemov.

3 Zajeti podatki

Zajeti podatki opisujejo stanje hladilne tehnike štirih nakupovalnih centrov v Ljubljani, kjer, kot opisano v prejšnjem razdelku, centralni nadzorni sistem, kamor so vsi povezani, vsakih 15 minut beleži vrednosti izbranih vhodnih in izhodnih parametrov s krmilnikov. Shema tovrstnega nadzornega sistema za upravljanje hladilne tehnike prikazuje Slika 2.



Slika 2: Shema sistema za upravljanje hladilne tehnike nakupovalnih centrov, puščice predstavljajo podatkovna vodila - dvosmerna komunikacija med vsakim nakupovalnim centrom in centralnim nadzornim sistemom

Časovna obdobja merjenja izhodnih in vhodnih parametrov opisuje Tabela 1, nameščene vrednosti zmogljivosti hlajenja posameznih sistemov nakupovalnih centrov pa Tabela 2.

Tabela 1: časovna obdobja merjenja izhodnih in vhodnih parametrov

	<i>Začetek merjenja</i>	<i>Konec merjenja</i>
Nak. Center 1	julij 2012	marec 2013
Nak. Center 2	oktober 2012	marec 2013
Nak. Center 3	oktober 2012	marec 2013
Nak. Center 4	april 2012	marec 2013

Tabela 2: inštalirane vrednosti zmogljivosti hlajenja posameznih nakupovalnih centrov

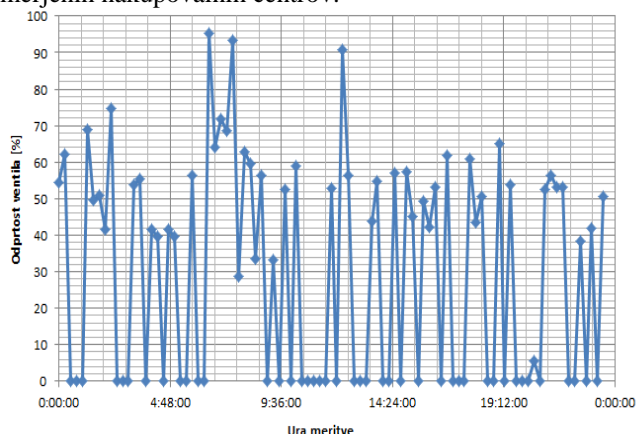
	<i>Plus nivo [kW]</i>	<i>Minus nivo [kW]</i>	<i>Skupno [kW]</i>
Nak. center 1	318	69	387
Nak. center 2	74	17	91
Nak. center 3	65	18	83
Nak. center 4	103	14	117

Merjene vhodne parametre vsakega hladilnega elementa so predstavljene v Tabeli 3.

Tabela 3: Merjeni vhodni parametri vsakega hladilnega elementa

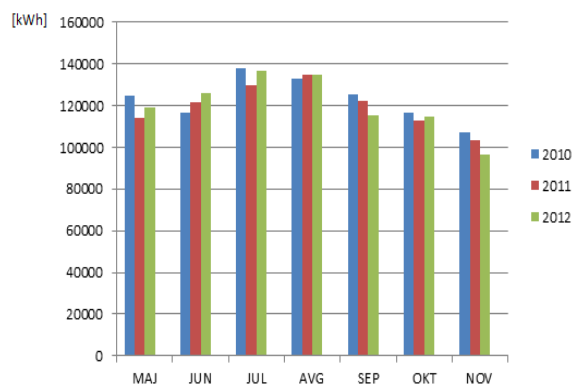
Vhodni parameter	Opis
Temperatura zraka znotraj posameznega hladilnika v °C	Temperatura zraka v vsakem od hladilnih elementov se s časom zaradi neenakomernega delovanja kompresorjev in vplivov iz okolice spreminja, vedno pa mora ustrezati HACPP standardu, ki vsaki vrsti izdelka definira spodnjo in zgornjo dovoljeno mejo.
Temperatura zraka na vhodu ter plina in zraka na izhodu uparjalnika v °C	Senzorji, ki spremljajo temperaturo zraka ob vhodu in izhodu uparjalnika, pomagata pri določanju delovne točke in zagotavljanju vrednosti znotraj predpisanih.
Stopnja odprtosti elektromagnetnih ventilov v %	Stopnja odprtosti elektromagnetnih ventilov določa pretok hladilne tekočine, ki vstopa v uparjalnik in ustreza povprečni moči posamezne hladilne vitrine.
Stanje obratovanja krmilnika	Krmilnik ima več obratovalnih stanj, ki opisujejo trenutno aktivnost hladilnega elementa, npr stanje brez hlajenja, zagon elementa, fazo odtajevanja in morebitne nepredvidene dogodke, kot sta npr prisilno zapiranje ventila in napaka na senzorju. Trenutno stanje krmilnika se označuje z zaporedno številko med 0 in 9.
Temperatura uparjanja in kondenziranja v °C	Temperaturi uparjanja in kondenziranja imata na učinkovitost sistema najvišji vpliv. Med drugim po enačbi $COP = T_e / (T_e - T_c)$, kjer sta T_e temperatura uparjanja in T_c temperatura kondenziranja, opisujeta teoretični koeficient učinkovitosti delovanja (COP), ki predstavlja standardno merilo za učinkovitost hladilnega sistema. Višja temperatura uparjanja in nižja temperatura kondenziranja pomenita torej višji koeficient učinkovitosti.
Izstopni tlak in pripadajoča temperatura plina ter njuni referenčni vrednosti v °C	Tlak in temperatura na izhodu uparjalnika se primerjata z njunimi referenčnimi vrednostmi.
Stopnji zmogljivosti kompresorja in kondenzatorja v %	Zmogljivost kompresorja je dejanska količina stisnjene in posredovane tekočine in se navadno izraža s kubičnimi metri na minuto. Shranjeni podatki opisujejo stopnjo zmogljivosti, torej trenutno stanje zmogljivosti glede na maksimalno. Zmogljivost kompresorja je mogoče povečati s povišanjem temperature hladilnega sredstva, zmogljivost kondenzatorja pa z njenim znižanjem.
Sesalni tlak in temperatura plina ob sesanju ter njuni referenčni vrednosti v °C	Sesalni tlak je vstopni tlak, ki ga generira kompresor in s temperaturo plina ob sesanju pomaga pri določanju količine hladilnega sredstva.

Slika 3 predstavlja primer izrisa enega od parametrov, in sicer stopnje odprtosti elektromagnetnega ventila na enem od hladilnih elementov plus nivoja enega od štirih merjenih nakupovalnih centrov.



Slika 3: Primer grafičnega prikaza vrednosti beleženih parametrov – stopnja odprtosti elektromagnetnega ventila v naključno izbranem dnevu (17.9.2012)

Na celotno porabo sistema ima močan vpliv tudi zunanja temperatura. Slednje empirično dokazuje slika 4, kjer je za sedem mesecev prikazana poraba v minulih letih. Razvidno je, da je poraba v toplejših poletnih mesecih znatno višja od porabe v hladnejših jesenskih.



Slika 4: Skupna poraba hladilne tehnike nakupovalnega centra za sedem mesecev minulih treh let

Izhodni parametri vsakega hladilnega elementa se nanašajo na vrednosti meritev moči in porabljene energije posameznega nakupovalnega centra in so predstavljeni znotraj Tabele 4.

Tabela 4: Merjeni izhodni parametri hladilnih sistemov

Izhodni parameter	Opis
Celotna energija hlajenja v kWh	Celotna energija hlajenja ustreza celotni energiji posameznega nakupovalnega centra, potrebni za ustrezno vzdrževanje hladilne tehnike.
Energija plus nivoja v kWh	Energija plus nivoja ustreza energiji vseh hladilnih elementov enega nakupovalnega centra, ki so del plus nivoja.
Energija minus nivoja v kWh	Energija minus nivoja ustreza energiji vseh hladilnih elementov

	enega nakupovalnega centra, ki so del minus nivoja.
Moč plus nivoja v kW	Moč plus nivoja v ustreza skupni inštalirani moči vseh hladilnih elementov nakupovalnega centra, ki sestavljajo plus nivo.
Moč minus nivoja v kW	Moč minus nivoja ustreza skupni inštalirani moči vseh hladilnih elementov nakupovalnega centra, ki sestavljajo minus nivo.
Poraba energije minulega tedna v kWh	Sistem sprotno samodejno beleži celotno porabo hladilne tehnike enega nakupovalnega centra za minuli teden.
Poraba energije minulega dne v kWh	Sistem sprotno samodejno beleži tudi vsakodnevno celotno porabljeno hladilne tehnike enega nakupovalnega centra.

Slika 5 predstavlja primer izrisa porabljene energije minus nivoja enega od nakupovalnih centrov med septembrom in decembrom 2012 ter pripadajočo zunanjo temperaturo. Vrednosti zunanjih temperatur so javno dostopne znotraj Agencije RS za okolje. Tudi s te slike je razvidna močna odvisnost porabe energije od okoliške temperature.



Slika 5: poraba energije celotnega minus nivoja enega od nakupovalnih centrov ter pripadajoča zunanja temperatura med septembrom in decembrom 2012

4 Možnosti uporabe podatkov za optimizacijo porabe električne energije in z njo povezanimi stroški

Opisano operatersko izvajanje meritev vplivnih in izhodnih parametrov sistema omogoča sistematično hranjenje podatkov, nazoren prikaz, enostaven dostop in možnost izvoza ter prenašanja podatkov, kar pomeni enostavno operiranje s podatki in predstavlja dobro izhodišče za medsebojno primerjavo sistemov. Omogočen je napreden nadzor nad vsemi nakupovalnimi središči in integracija v enovito celoto, s čimer se odpirajo nove možnosti optimizacije.

Velja, da je sistemska poraba energije močno odvisna od izbora uparjalnega in kondenzacijskega tlaka, ki poteka upoštevajoč temperaturo okolice in

hlajenega prostora. Klasični hladilni sistemi imajo konstanten kondenzacijski tlak, napredni pa se z regulacijo prilagajajo temperaturi okolice ter potrebi po oddani toploti. Hladilni sistemi z boljšim nadzorom tlaka torej porabijo manj električne energije. Analiziran merilni sistem med drugim, kot opisano v prejšnjem razdelku, meri tudi kondenzacijski in uparjalni tlak in tako omogoča kvalitetnejšo regulacijo in posledično učinkovitejšo rabo električne energije.

Energetske prihranke je moč doseči tudi z upoštevanjem zunanje temperature, ki ima dokazano na porabo visok vpliv [3]. Tudi v [4] je opisano, da ima v nočnem času zaradi nižjega okoliškega zraka kondenzator večjo temperaturno prevodnost in lahko na ta račun tlak v kondenzacijskem sistemu ustrezno zmanjšamo, kar pomeni nižjo električno porabo za enako količino dela, ki ga potrebujemo za hlajenje. Smiselno je spremljanje vremenske napovedi oz. temperatur zunanjega zraka za prilagoditev učinkovitosti kondenzatorjev.

5 Zaključek

Prispevek opisuje operatersko izvajanje meritev vhodnih in izhodnih parametrov hladilne tehnike štirih nakupovalnih središč ter opisuje nekaj možnosti za optimizacijo porabe električne energije ter z njo povezanih stroškov.

Pregled merjenih vrednosti parametrov poteka preko uporabniškega vmesnika, ki ima možnost grafičnega in tabelarnega prikaza ter nadaljnega prenosa podatkov in operiranja z njimi. Ocena kaže, da imajo izmed izmerjenih vhodnih parametrov največji vpliv na električno porabo uparjalni in kondenzacijski tlak oz. z njim povezani temperaturi uparjanja in kondenziranja ter zunanja okoliška temperatura. Za natančnejše določanje vpliva vhodnih parametrov na porabo električne energije bi bilo smiselno obdobja iz Tabele 1 ustrezno podaljšati.

6 Literatura

- [1] T. G. Hovgaard, L. F. S. Larsen, M. J. Skovrup, and J. B. Jørgensen: Power Consumption in Refrigeration Systems - Modeling for Optimization, 4th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, str. 234–239, 2011.
- [2] M. Umberger, I. Humar, Energy savings of refrigerators in shopping centers with adaptive control and real-time energy management systems, Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review), R. 88 NR 6/2012.
- [3] R. Saidur, H.H. Masjuki, I.A Choudhury: Role of ambient temperature, door opening, thermostat setting position and their combined effect on refrigerator-freezer energy consumption, Energy conversion and management, Volume 43, Issue 6, April 2002, Pages 845–854
- [4] L. F. S. Larsen, C. Thybo, H. Rasmussen: Potential energy savings using dynamically optimizing control in refrigeration systems under daily variations in ambient temperature, Proc. Of the 22nd IIR Internagional Congress of Refrigeration, China, 2007