

# Optimizacija operativnih stroškov porabe električne energije v hladilni tehniki s centralnim nadzornim sistemom

Špela Vidrih<sup>1</sup>, Mark Umberger<sup>1,2</sup>, Iztok Humar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup> ENTIA d.o.o., Zavrh pod Šmarno Goro 13E, 1211 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: iztok.humar@fe.uni-lj.si

## Optimization of electric energy consumption operation costs in cooling technique by a central management system

*It is confirmed that electric energy consumption of cooling systems in large shopping centers represents a significant share, regarding the energy consumption of the entire shopping centers. The objective of this paper is to investigate and optimize the economic saving potential for refrigeration systems by time shifting the operation of numerous cooling elements according to daily electric energy price fluctuations. The paper offers a solution for a substantial decrease of the operating costs by exploiting thermal capacity of the goods and the electric energy price daily fluctuations. The idea is based on the fact the refrigerated goods may be used as thermal capacitors, which means they are able to store the energy and reactivate it when most appropriate in terms of costs. The optimization algorithm is running on a central power management system which is collecting the parameters from the individual cooling systems in shopping centers. The scheme of such system is provided as well as the optimization algorithm for the proposed power management system is proposed. The simulation results show that such optimization approach would decrease the energy consumption costs around 5,6 %.*

## 1 Uvod

Povečevanje izpustov toplogrednih plinov in s tem povezana skrb za dobrobit narave ter ohranjanje življenjskega okolja, pa tudi potreba po splošnem zmanjševanju porabe energije zaradi omejene razpoložljivosti energijskih virov in vztrajnega trenda rasti cen energentov narekujejo zmanjševanje porabe električne energije pri vseh segmentih družbe. Učinkovita poraba je zaradi visokih stroškov predvsem grosističnim podjetjem eden najpomembnejših strateških ciljev. Nakupovalni centri porabijo kar 3% celotne električne energije, pri čemer največji del odpade na hladilne sisteme. Slednji zato ponujajo velike možnosti za znižanje in optimizacijo stroškov porabe.

Navedeno prilagajanje temelji na uporabi tehnologij za vodenje sistemov, s katerimi v odvisnosti od različnih merjenih notranjih in zunanjih veličin prilagajamo delovanje izbranih komponent hladilnih sistemov, s čimer posledično optimiziramo njihovo delovanje. Večjo učinkovitost je mogoče doseči z uporabo ustreznih optimizacijskih algoritmov, s

katerimi prilagajamo delovanje sistemov glede na vplivne parametre. Potreba po centralnem nadzoru nad napravami ter vpogled v parametre oddaljenih enot zahteva vključitev telekomunikacijskih standardov, vmesnikov in protokolov, ki omogočajo medsebojno povezovanje posameznih sistemov. Nadgradnja komunikacijskih vodil s pripadajočimi prehodi omogoča globalno povezljivost preko omrežij z IP, kar omogoča integracijo množice samostojnih sistemov in prinaša nove možnosti za upravljanje heterogene celote: časovno razporejanje električnih bremen za doseganje ustrežnejših obremenitev, prediktivno razporejanje električne porabe ipd. Poleg široke palete možnosti prinaša tudi nove izzive skupnega upravljanja razpršenih sistemov s ciljem optimizacije stroškov in porabe električne energije za doseganje optimalnega izkoristka sistema v celoti.

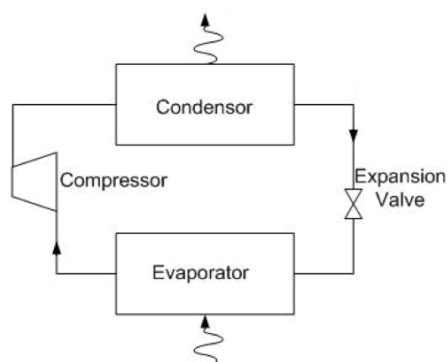
Upoštevanje težnje po povečevanju izkoriščanja električne energije, pridobljene iz obnovljivih virov (npr. sončna in vetrna energija), je potrebno poleg proizvodnje električne energije na fleksibilen, učinkovit in proaktiven način upoštevati tudi njeno porabo. Na podlagi ustreznega razporejanja porabe električne energije se zmanjšuje obremenjenost elektroenergetskega omrežja, posledično pa tudi potreba po investicijah v njegovo dograjevanje, kar v končnem smislu pomeni možnost koriščenja električne energije po nižjih stroških v času nižjih obremenitev omrežja. Intervale nižjih obremenitev je torej smiselno izkoristiti za izvajanje energetske potratnih funkcij v hladilnih sistemih nakupovalnih centrov, kot je npr. izvajanje oddaljevanja, hlajenje izdelkov »na zalogo« do maksimalne dopustne meje (izkoriščanje toplotne kapacitete) in podobno.

Obstoječi pristopi že ponujajo rešitve na področju izboljšav hladilne tehnike. V [1] in [2] so predstavljene začetne raziskave in v [3] nadaljnji pristopi k učinkovitejši rabi električne energije. Ideja časovnega zamika bremen z izkoriščanjem energije, shranjene v termičnih kapacitetah hlajenih izdelkov, je opisana v [4] in [5]. [6] opisuje znatno znižanje stroškov električne energije z uporabo prilagodljivega prediktivnega upravljanja (angl. Adaptive Control Management) hladilnih sistemov v realnem času. V [7] je upoštevanje dinamiko dnevni cen električne energije z uporabo optimizacijskih algoritmov podan opis in predlog časovnega zamika električnih bremen z namenom znižanja operativnih stroškov. Tak sistem je smiselno nadgraditi za potrebe nadaljnje optimizacije v smislu integracije več sistemov, ki z vidika energetskega

omrežja predstavljajo breme kot zaključeno celoto. Rešitev je celostna, če je vsak od podsistemov nadzorovan in voden iz oddaljenega nadzornega centra, ki upoštevajoč optimizacijski algoritem skrbi za učinkovito upravljanje med seboj neodvisnih podsistemov na podlagi sproti zbranih podatkov.

## 2 Hladilna tehnika nakupovalnih centrov in izkoriščanje termične kapacitete hrane

Hladilni sistemi nakupovalnih centrov so najpogosteje zasnovani na kompresijskem ciklu. Hladilno sredstvo kroži v zaključeni zanki, ki jo sestavljajo kompresor, ekspanzijski ventil ter evaporator in kondenzator. Ob evaporaciji iz hladilne komore prehaja na hladilno sredstvo toplota, ki nato prihaja v vroči rezervoar. Sistem navadno vsebuje več hladilnih enot.

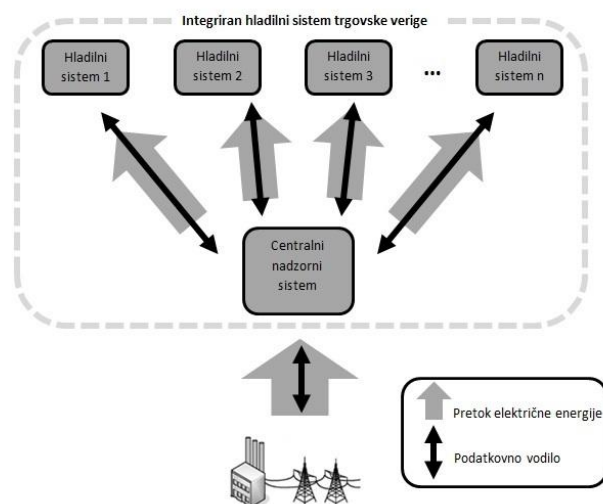


Slika 1. Principelna shema kompresijskega cikla, s puščicami je označena smer prehajanja toplote.

Ustrezno razporejanje delovanja posameznih hladilnih enot je ključno pri zagotavljanju ekonomičnosti, sinhronizirano vklapljanje in izklapljanje posameznih elementov lahko namreč zvišuje sistemsko obrabo in porabo. Potrebna je torej desinhronizacija delovanja hladilnih vitrin z nadzorom vklapljanja in izklapljanja posameznih elementov. Strategijo časovnega razporejanja ohlajevanja omogoča termična kapacitivnost ohlajenih živil, ki jo lahko analiziramo in modeliramo, ter ji s pomočjo optimizacijskega algoritma prilagajamo delovanje hladilnega sistema glede na predvideno ceno električne energije in seveda želene vrednosti temperature živil v hladilnih komorah.

Pretežni del hladilnih komor v nakupovalnih centrih je danes upravljan individualno in nadzorovan preko histereze. Maksimalno ohlajanje se tako uporablja, ko temperatura komore doseže zgornjo temperaturno mejo in obratno, ohlajanje se izklopi, ko temperatura doseže minimalno mejno temperaturo. Pri tem je smiselno časovno zamikanje delovanja posameznih hladilnih elementov glede na vnaprej določeno dnevno nihanje cene električne energije. Skupek vseh hladilnih

elementov sistema elektroenergetskemu omrežju predstavlja zaključeno celoto. Z ustreznimi informacijsko-komunikacijskimi orodji je moč spremljati, beležiti in kontrolirati porabo, temperaturo, vlago, tlak hladilne tekočine in druge parametre posameznega hladilnega elementa, ki je del omenjene celote.



Slika 2. Shema predlaganega hladilnega sistema

Na hladilni sistem nakupovalnih centrov neprestano vplivajo številne motnje, ki so do neke mere z določeno verjetnostjo lahko vnaprej predvidene. Kontrolni del sistema mora skrbeti za čim ugodnejše prilagajanje motnjam in spremembam v omrežju. Eden od pristopov k učinkovitejši porabi je uporaba modela MPC (model predictive controller) [6], ki se izkazuje kot ena najuspešnejših metodologij za nadzor industrijskih procesov. MPC model ponuja možnost prilagoditve profila porabe moči proizvodnji električne energije. Pri tem se izkorišča termična kapaciteta shranjenih živil, ki upoštevajoč dovoljene omejitve temperature omogoča časovno prerazporejanje vključenih bremen. Temperaturne meje so določene tako, da na kvaliteto hlajene hrane ne vplivajo.

## 3 Optimizacijski algoritem

Osrednji namen procesa optimizacije je čim bolj povečati rabo električne energije v času zakupljene periode z manjšo tarifo, ter ob tem izkoristiti akumulacijo ledu v hladilnih napravah centrov, ki so povezani v centralni nadzorni sistem.

Za potrebe predstavitve procesa optimizacije vpeljemo naslednje parametre:

- toplotna kapaciteta izdelkov v posamezni hladilni napravi je  $c_i m_i$ ,
- temperaturno področje delovanja naprave, določeno s standardi, je  $[T_{i\min}, T_{i\max}]$ ,

- trenutna temperatura hlajenega prostora hladilne naprave je  $T_i$ ,
- iz posameznega hladilnega sistema je mogoče odvesti še  $Q_{iodv} = c_i \cdot m_i (T_i - T_{imin})$ , za kar je potrebno dovesti  $W_{iodv} = k \cdot Q_{iodv}$  električne energije,
- razmerje med je

$$\eta_i = \frac{Q_{iodv}}{Q_{icel}} = \frac{W_{iodv}}{W_{icel}} = \frac{T_i - T_{imin}}{T_{imax} - T_{imin}}$$

- predpostavimo, da so konstante odvajanja toplote v okolico sorazmerne toplotni kapaciteti izdelkov v hladilni napravi,
- centralni nadzorni sistem pozna trenutno porabo vseh hladilnih enot,
- centralni nadzorni sistem pozna zakupljeno moč za prihajajoče časovne intervale,
- centralni nadzorni sistem pozna ceno električne energije za manjšo in večjo tarifo.

Na podlagi tega sistem izvaja optimizacijo upoštevajoč naslednje pogoje:

$$\sum_i \dot{W}_{iodv} = P_{preostala},$$

kjer je  $\dot{W}_{iodv}$  moč odvajanja toplote za zagotavljanje akumulacije posamezne hladilne enote, preostala moč  $P_{preostala}$  pa je razlika med zakupljeno močjo in trenutno rabljeno močjo.

Optimizacijo izvajamo na podlagi naslednjega kriterija:

$$\min_{\eta} \sum_i \eta_i \cdot W_{icel},$$

ki zagotavlja maksimalno akumulacijo hlada v celotnem hladilnem sistemu.

Z vidika celotnega sistema ter izgub energije v prostor je najbolje, če so vsi hladilni sistemi v isti delovni točki, torej  $\eta = \eta_i$ , saj to zagotavlja najdaljše delovanje sistema na podlagi akumulacije, hkrati pa se vsebina hladilnih sistemov najmanj intenzivno ohlajuje proti najnižji dovoljeni vrednosti  $T_{imin}$ .

Vsota  $\sum_i \eta \cdot W_{icel}$  predstavlja skupno električno

energijo za potrebe odvajanje toplote, ki jo časovno prerazporedimo iz intervala z večjo tarifo v interval z manjšo tarifo. Upoštevajoč razliko v ceni med tema dvema intervaloma zmnožek predstavlja neposredni prihranek stroškov energije.

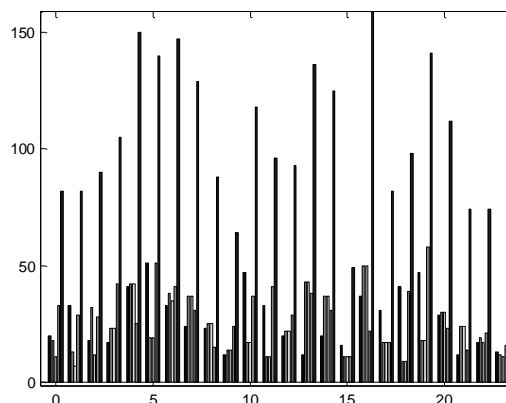
Optimizacijski algoritem je izdelan v programu Matlab in predpostavlja, da se vsi optimizacijski parametri zbirajo na centralnem nadzornem sistemu. V prvih časovnih intervalih izvaja intenzivnejše hlajenje pri tistih hladilnih enotah, ki so s trenutno temperaturo najbolj oddaljene od najmanjše dovoljene temperature. S tem skušamo doseči sinhronizacijo delovne točke teh hladilnih enot s preostalimi enotami v sistemu. Po doseženi sinhronizaciji pa se toplota iz sistemov odvaja proporcionalno s kapaciteto hladilne enote.

Preizkus delovanja algoritma smo izvedli s simulacijo sistema na podlagi realnih podatkov 24-urne porabe štirih hladilnih sistemov nakupovalnih centrov, ter predpostavk kapacitete hladilnih enot in zakupljene porabe.

## 4 Rezultati

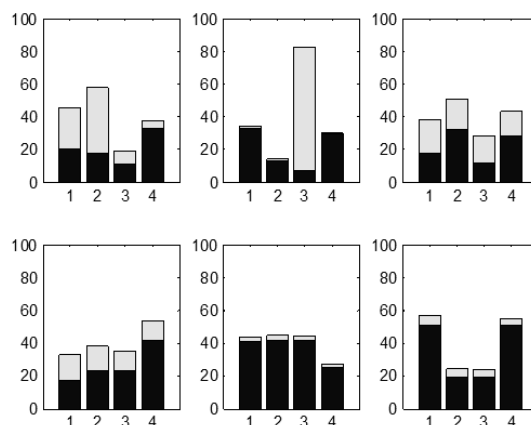
V okviru simulacije smo uporabili optimizacijski algoritem za primer štirih nakupovalnih centrov (torej štirih hladilnih enot), ki so med seboj povezane v centralni nadzorni sistem.

Na grafu 1 je prikazana trenutna (urna) poraba posamezne enote ter skupna poraba (vsota) vseh štirih enot.



Graf 1. Dnevna porazdelitev trenutne (urne) porabe energije [kWh] posamezne enote ter skupna poraba vseh štirih enot

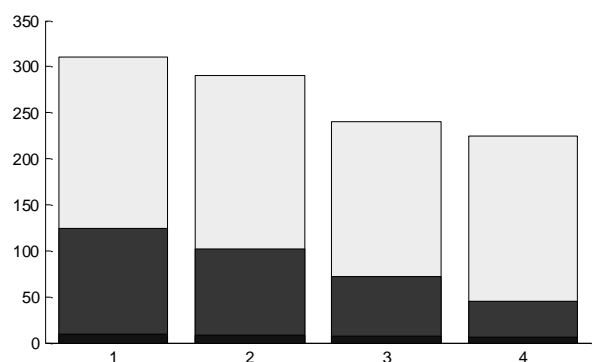
V simulaciji privzemimo, da obdobje manjše tarife traja 6 ur (med 0:00 - 6:00), ko je cena električne energije za tretjino nižja kot cena v obdobju večje tarife. Priključna moč je 160 kWh za celoten sistem.



Graf 2. Poraba energije [kWh] v obdobju šestih ur z manjšo tarifo za posamezne hladilne enote: kritje sprotnih potreb (v stolpcih spodaj) in akumulacija hlada (v stolpcih zgoraj)

Rezultati optimizacije so prikazani na grafu 2, ločeno za vsako od šesti ur (od 0:00 - 6:00). Zgornji del stolpca prikazuje dodatno energijo, ki jo zavoljo optimizacije v času z manjšo tarifo porabi posamezna izmed hladilnih enot in jo akumulira v obliki hlada v termično kapaciteto živil. Kot smo povedali, se cikli delovanja posameznih naprav prilagajajo tako, da se shrani čim več energije v obliki termične kapacitete, ter da vsi hladilni sistemi shranjujejo hlad sorazmerno s kapaciteto hladilne enote.

Primerjava stanj v primeru uporabe in ne-uporabe predlagane optimizacije je lepo razvidna iz grafa 3, na katerem je podan energijski razpon  $W_{iodv} = k \cdot Q_{iodv}$  za posamezne hladilne enote. Razpon do vrha svetlo obarvanega grafa predstavlja celoten energijski razpon toplotnega območja med  $T_{imax}$  in  $T_{imin}$ . Vrh srednje sivo obarvanega sredinskega dela grafa prikazuje energijo  $T_i$  hladilnega sistema brez akumulacije hladu na podlagi optimizacijskega algoritma. Vrh črno obarvanega spodnjega dela grafa pa prikazuje energijo  $T_i$  hladilnega sistema ob akumulaciji hladu na podlagi predlaganega optimizacijskega algoritma. Razvidno je, da smo v vseh hladilnih sistemih dosegli enako delovno točko in hkrati maksimirali akumuliran hlad celotnega hladilnega sistema.



Graf 3. Maksimalni razpon toplotnega območja (vrh svetlo sivega področja), stanje toplote brez akumulacije hladu – brez optimizacije (vrh temno sivega področje) ter stanje toplote ob akumulaciji hladu – z optimizacijo (črno področje) za posamezne hladilne sisteme [kWh]

V skladu z našim modelom, električna energija, ki smo jo porabili za prenos akumulirane toplote, predstavlja prerazporejeno energijo iz intervala z večjo tarifo v interval z manjšo tarifo. Ob upoštevanju, da je cena električne energije za tretjino nižja kot cena v obdobju večje tarife, obračun stroškov v obeh primerih (z in brez optimizacije) pokaže, da predlagani pristop optimizacije operativnih stroškov porabe električne energije v hladilni tehniki s centralnim nadzornim sistemom uspe znižati stroške porabe za 5,6 %.

## 5 Sklep

V prispevku smo predstavili algoritem za optimizacijo stroškov porabe električne energije nakupovalnih centrov s centralnim nadzornim sistemom in dokazali, da je njegova implementacija z vidika znižanja stroškov smiselna. Pri tem smo se osredotočili na izkoriščanje termične kapacitete živil, to je njihove sposobnosti shranjevanja hladu, ter na dnevno dinamiko cene električne energije, pri čemer smo predpostavili dvotarifni sistem.

Implementacija algoritma temelji na predpostavki, da so hladilne enote med seboj povezane s centralnim nadzornim sistemom, ki omogoča izmenjavo podatkov o parametrih hladilnih enot, upravljanje le-teh ter komunikacijo z dobaviteljem energije. Optimizacijski algoritem teži k enaki delovni točki pri vseh hladilnih enotah in s tem maksimira akumuliran hlad celotnega hladilnega sistema.

Rezultati simulacijske študije kažejo, da opisan pristop operativne stroške zniža za nezanemarljivih 5,6%. Ob tem se velja zavedati omejitvev, ki jih opisani sistem vsebuje. Ena teh je lahko nezadostna termična kapaciteta hladilnih enot v sistemu, kar pomeni, da lahko sistem akumulira le določeno količino hladu oz. shrani le omejeno količino energije. Te omejitve trenutni model ne jemlje v obzir. Višino prihranka tako v veliki meri omejuje termična kapaciteta sistema.

Z nadaljnjim raziskovalnim delom je prihranke mogoče še dodatno povečati s predpostavko, da v določenem času pred menjavo tarife iz nižje na višjo sistema ne bi bil hlajen (temperatura hlajenega prostora bi se približala  $T_{imax}$  in bi ga podhladili šele po nastopu nižje tarife). Prav tako je v prihodnosti sistem smiselno nadgraditi z razvojem zahtevnejših algoritmov, ki bodo upoštevali tudi ostale količine, ki dokazano sovplivajo na obnašanje sistema, kot sta npr zunanja temperatura in hitrost prehajanja toplote v okolico (izgube), s tem pa se izogniti nekaterim predpostavkam v modelu, ki lahko nezanemarljivo odstopajo od realnega stanja.

## 6 Literatura

- [1] L. F. S. Larsen, C. Thybo, H. Rasmussen: Potential energy savings optimizing the daily operation of refrigeration systems, Proc. European Control Conference, Kos, Greece, str. 4759-4764, 2007.
- [2] L.F.S. Larsen: Model based control of refrigeration systems, Ph.D dissertation, Aalborg University, Department of Control Engineering, 2005.
- [3] 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.
- [4] R. Bush, G. Wolf, Utilities load shift with thermal storage. Transmission & Distribution World, str. 12, 2009.
- [5] L. Chunchun, T. Wei: Study of optimization control strategy of ice storage system, Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference, str. 1699 - 1702
- [6] 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.
- [7] T. G. Hovgaard, L. F. S. Larsen, J. B. Jørgensen: Flexible and Cost Efficient Power Consumption using Economic MPC A Supermarker Refrigeration Benchmark, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, USA, December 12-15, 2011.