

Nadogradnja geotermalne dizalice topline na FSB-u frekvencijskim sustavom regulacije

Autor:
Stjepan Herceg

Mentori:
prof.dr.sc. Vladimir Soldo
dr.sc. Luka Boban



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Zagreb, 2020.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB) pod vodstvom mentora, prof. dr. sc. Vladimira Solde i komentora, dr. sc. Luke Bobana na Zavodu za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2019./2020.

Stjepan Herceg

Sadržaj

Popis slika	iv
Popis tablica	v
Popis oznaka	vi
1 Motivacija	1
2 Pregled literature	3
3 Ciljevi i hipoteza rada	5
4 Tehnologije dizalica topline	6
4.1 Teorijske osnove dizalica topline	6
4.2 Osnove regulacije	11
5 Opis mjerne linije i uređaja	15
5.1 Sustav geotermalne dizalice topline	15
5.2 Komponente mjerne linije	16
5.2.1 Isparivač i kondenzator	16
5.2.2 Kompresor	17
5.2.3 Frekvencijski pretvarač	18
5.2.4 Elektronički ekspanzijski ventil	19
5.2.5 Ostale komponente sustava	19
5.3 Mjerna oprema	20
5.3.1 Mjerenje temperature	20
5.3.2 Mjerenje tlaka	20
5.3.3 Mjerenje toplinske energije	20
5.3.4 Mjerenje električne snage	21
5.3.5 Akvizicijski sustav	21
5.4 Metodologija mjerenja	21
6 Pregled prikupljenih podataka i njihova analiza	22
6.1 „on/off“ regulacija	22
6.2 Frekvencijska regulacija	26
6.3 Proračun godišnjih ušteda	29
7 Rasprava	34

8	Zaključak	36
9	Zahvale	37
10	Sažetak	41
11	Summary	42

Popis slika

1	Ljevokretni proces	6
2	Karakterističan proces u T-s (lijevo) i logp-h (desno) dijagramu	7
3	Shema geotermalne dizalice topline s vertikalnim izmjenjivačem u tlu [1]	9
4	Ovisnost temperature tla o dubini uspoređena sa zrakom	10
5	Izvedbe izmjenjivača u tlu [1]	10
6	Rad uređaja u „on/off“ režimu [2]	12
7	Usporedba frekventnog reguliranog i „on-off“ reguliranog uređaja	13
8	Shematski prikaz sustava geotermalne dizalice topline na FSB-u	15
9	Kompresor Dorin	17
10	Ugrađeni frekvencijski pretvarač ABB ACH580-01	18
11	Mjerna oprema u tehničkoj sobi	20
12	Ciklusi paljenja i gašenja kompresora	23
13	Ovisnost temperature kondenzacije o temperaturi spremnika	24
14	„on/off“ regulacija usporedba snage kompresora i učina kondenzatora	25
15	Ovisnost histereze spremnika i vremena rada	25
16	Vrijednosti COP za „on/off“ regulaciju za različite histerze	26
17	Usporedba paljenja kompresora s i bez frekvencijske regulacije	27
18	Usporedba temperatura isparavanja s i bez frekvencijske regulacije	27
19	Usporedba COP-a s i bez frekvencijske regulacije	28
20	Godišnje simulirane vrijednosti COP-a bez frekvencijske regulacije	29
21	Godišnje simulirane vrijednosti COP-a s frekvencijskom regulacijom	30
22	Godišnje simulirane vrijednosti korigiranog COP-a bez frekvencijskom regulacijom	32
23	Godišnje simulirane vrijednosti korigiranog COP-a s frekvencijskom regulacijom	32

Popis tablica

1	Izračunate vrijednosti COP-a prije i nakon ugradnje frekventijskog pretvarača	28
2	Utjecaj promjene frekvencije na uštedu sustava	33

Popis oznaka

f	Frekvencija, Hz
m_{RT}	Maseni protok radne tvari, kg/s
m_w	Maseni protok vode, kg/s
n	Brzina vrtnje elektromotora, min^{-1}
P	Snaga potrebna za rad kompresora, W
p	Broj pari polova asinkronog elektromotora, -
p_i	Tlak isparavanja, Pa
p_k	Tlak kondenzacije, Pa
$Q_{h,nd}$	Toplinski gubici prostora, Wh
q_i	Specifični toplinski tok na isparivaču, J/kg
q_k	Specifični toplinski tok na kondenzatoru, J/kg
$q_{m,RT}$	Maseni protok radne tvari, m^3/s
s	Klizanje rotora asinkronog motora, -
ΔT	Razlika između temperature kondenzacije i isparavanja, °C
T_i	Temperatura isparavanja, °C
T_k	Temperatura kondenzacije, °C
T_{tlo}	Temperatura tla, °C
T_z	Temperatura zraka, °C
t	Vrijeme, s
w_k	Specifična snaga kompresora, J/kg
ϕ_{gr}	Toplinski tok potreban za grijanje, W
ϕ_{hl}	Toplinski tok potreban za hlađenje, W
ϕ_i	Toplinski tok preuzet na isparivaču, W

- ϕ_k Toplinski tok predan na kondenzatoru, W
 ϕ_N Nazivni učin geotermalne dizalice topline, W

KRATICE

- BIT Bušotinski izmjenjivač topline
COP Faktor grijanja (eng. *Coefficient of performance*)
COP_{1,f} Faktor grijanja za frekvencijski reguliran sustav u jednom satu
COP_{1,on/off} Faktor grijanja u jednom satu za sustav u "on/off" načinu rada
COP_{PL,on/off} Faktor grijanja s uračunatim cikličkim gubitcima
CR Omjer djelomičnog opterećenja (eng. *Capacity ratio*)
DMT Donja mrtva točka
DT Dizalica topline
EER Faktor hlađenja (eng. *Energy efficiency ratio*)
EEV Elektronički ekspanzijski ventil (eng. *Electronic expansion valve*)
FSB Fakultet strojarstva i brodogradnje
GMT Gornja mrtva točka
GSHP Dizalica topline s tлом kao toplinskim izvorom,(eng. *Ground source heat pump*)
HVAC Grijanje, ventilacija i klimatizacija (eng. *Heating, ventilation, and air conditioning*)
PID Proporcionalno-integralno-derivativni regulator
PLF Faktor djelomičnog opterećenja (eng. *Particle load factor*)
PLR Omjer djelomičnog opterećenja (eng. *Particle load ratio*)
RT Radna tvar
SCOP Sezonski faktor grijanja (eng. *Seasonal Coefficient Of*

Performance)

SEER Sezonski faktor hlađenja (eng. *Seasonal Energy Efficiency Ratio*)

1 | Motivacija

Negativne posljedice korištenja fosilnih goriva, kao što su globalno zagrijavanje i povećanje zagađenja zraka, natjerale su Europu (EU) da svojim članicama tijekom godina uvede niz mjera koje za cilj imaju smanjenje ispuštanja stakleničkih plinova, širu uporabu obnovljivih izvora energije i bolje iskorištenje postojećih energetske sustava. Kao dio EU, Hrvatska je prihvatila Strategiju 2030. kojom se želi osigurati cjenovno dostupna i ekološki prihvatljiva energija [3].

Područje zgradarstva obuhvaća gotovo 40% ukupno potrošene energije EU i 36% emisije CO₂. Navedeni sektor predstavlja veliki potencijal za smanjenje štetnih utjecaja na okoliš stoga se postavljaju novi kriteriji za izgradnju i obnovu objekata. EU, EBPD direktivom 2010/31/EU obavezuje članice na prijelaz na zgrade gotovo nulte energije (eng NZEB – nearly zero-energy building) za nove i obnovljene objekte od 2021 [4]. Krajnji cilj Europske Unije je klimatski neutralna Europa do 2050. godine.

Zgrade gotovo nulte energije (NZEB) su zgrade visokih energetske svojstava koje koriste nisku količinu energije. Energija koja se koristi u značajnoj mjeri dolazi iz obnovljivih izvora uključujući onu koja se proizvodi na samoj zgradi ili u njezinoj blizini [4]. Korištenjem tehnologija dizalica toplina uvelike se smanjuje potrošnja energije u odnosu na tradicionalne sustave grijanja/hlađenja.

Iako same nisu izvor, dizalice topline prema direktivi 2009/28/EZ spadaju u obnovljive izvore energije [5]. Definiraju se kao obnovljivi izvor energije jer korištenjem parnog kompresijskog ciklusa, na čijem principu većina današnjih sustava radi, toplinskom spremniku predaju ili oduzimaju energiju nekoliko puta veću od utrošene električne energije potrebne za pogon kompresora [6]. Sve većom uporabom dizalica toplina potrebno je istražiti mogućnosti za unaprjeđenje takvih sustava.

Unaprjeđenje sustava tj. povećanje efikasnosti može se ostvariti korištenjem boljih (efikasnijih) komponenti kao i pravilnom regulacijom procesa. Dizalice topline projektiraju se da zadovolje potrebe zgrade za kritične radne uvjete (najhladniji dan u godini). Rad punim kapacitetom potreban je za manje od 10% ukupnog broja radnih sati sustava godišnje [7]. Stoga je poboljšanje energetske učinkovitosti sustava izvan sezone najvećeg opterećenja iznimno važno.

Kao komponentu u dizalici topline kompresor je najlakše regulirati stoga se većina regulacijskih rješenja odnosi upravo na kompresor. Većina starijih ugrađenih sustava dizalice topline kao regulaciju kapaciteta koristi intermitirajući pogon („on/off“ regulacija). Posljednjih godina sve češće dizalice topline dolaze standardno opremljene s kompresorom s promjenjivom brzinom vrtnje (frekvencijska regulacija).

Brojna provedena istraživanja dokazala su da korištenjem frekvencijske regulacije dolazi do smanjenja potrošnje energije na kompresoru. Većina istraživanja koristi računalne simulacije ili analizira rezultate dobivene promjenom kompresora. Malo istraživanja je napravljeno s ciljem istraživanja mogućnosti zamjene postojećih sustava regulacije s frekvencijskom regulacijom. Cilj ovog rada je istražiti mogućnost ugradnje frekvencijske regulacije na postojeće sustave dizalice topline te isplativost prelaska na frekvencijsku regulaciju na postojećim sustavima.

U prvom dijelu rada dane su teorijske osnove dizalica topline i osnove regulacije. Nakon toga prikazani su izmjereni rezultati s i bez frekvencijske regulacije kompresora. Na temelju izmjerenih rezultata napravljena je kvazistacionarna simulacija kako bi se pokušalo ustanoviti mogućnost uštede te isplativost prelaska na frekvencijsku regulaciju.

2 | Pregled literature

Posljednjih godina visoko učinkovite, frekvencijski regulirane dizalice topline opremljene kompresorima promjenjive brzine vrtnje široko su se rasprostranile na tržištu. Zato je potrebno razmotriti nekoliko pitanja koja se postavljaju pri usporedbi dizalice topline s fiksnom brzinom vrtnje s dizalicama topline promjenjive brzine vrtnje (frekvencijski reguliranim). Grijanje zgrade vršno opterećuje dizalicu topline samo pri projektnoj, niskoj, temperaturi okoliša (npr. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ta je temperatura prisutna nekoliko desetaka sati godišnje. Ako se odabir kapaciteta dizalice topline temelji na vršnom opterećenju, većinu vremena njen kapacitet premašuje zahtjeve za grijanjem te je njen rad potrebno regulirati. U svojoj je studiji Bagarela [8] je iznio da smanjenje kapaciteta dizalice topline smanjuje zahtjeve za upravljanjem, ali ih ne uklanja u potpunosti. Naravno, smanjenje kapaciteta vodi do povećanja broja radnih sati kada sama dizalica neće moći isporučiti dovoljno topline pa će pomoćni sustav biti dulje u pogonu [9]. To smanjuje cjelogodišnju učinkovitost grijanja. Kao što je spomenuto, kontrola toplinskog učina dizalice topline s fiksnom brzinom vrtnje dovodi do niza ciklusa uključivanja i isključivanja koji smanjuju učinkovitost jedinice. S druge strane, jedinica s naprednom, kontinuiranom regulacijom brojem okretaja radi neprekidno ili sa smanjenim brojem gašenja, umanjujući tako broj isključivanja i fenomen cikličkih gubitaka [10] koji će kasnije biti detaljnije objašnjen.

Tijekom rada s djelomičnim opterećenjem i dizalica topline s naprednom i jednostavnom regulacijom isporučuju istu energiju grijanja. Glavna je razlika u tome da kvalitetnija regulacija produžuje vrijeme kontinuiranog rada uređaja što dovodi do smanjena prosječne temperature sekundarne tekućine tijekom uključenog razdoblja. Aprea et al. [11] usporedili su dizalicu topline zrak-voda s "on-off" regulacijom frekvencijski reguliranom jedinicom. Rezultati pokazuju smanjenje potrošnje električne energije od 20%. Uštede energije uglavnom se pripisuju smanjenju omjera kompresije tijekom faze modulacije [9]. Međutim, temeljita energetska analiza sustava treba razmotriti i potrebe za električnom energijom frekvencijskog pretvarača koji omogućava promjenjivu brzinu vrtnje kompresora dizalice topline. Iako je u prošlosti provedeno nekoliko studija (npr. Aprea et al. [11], Shao et al. [12], Zhao et al. [13]), uspoređujući uključivanje i isključivanje i modulacijske strategije u pojedinačnim jedinicama dizalice topline, samo je nekoliko studija (Adhikari et al. [14]; Cheung i Braun [15]; Lee [7]) analiziralo cijeli sustav koji ne uključuje samo dizalicu, već i izvor topline, ponor topline, distribucijski sustav grijanja, termoakumulaciju, pumpe, pomoćne grijače itd. Lee [7], Adhikari et al. [14] i Cheung i Braun [15] simulirali su godišnje performanse "on-off" sustava

kao i napredno reguliranog u različitim klimatskim uvjetima i zaključili da sustav kontroliranog kapaciteta može postići značajne uštede energije u usporedbi s "on-off" sustavom, posebno u blagim klimama.

Madani et al. [16] pokrenuli su pitanje dimenzioniranja dizalice topline simulirajući godišnji rad "on-off" sustava i napredno reguliranog s tipičnim toplinskim opterećenjem jedne kuće smještene u Stockholmu (Švedska). Pretpostavivši kao pomoćni sustav električni grijač, zaključili su da napredno regulirani uređaj dovodi do boljih performansi samo kada dizalica topline koja se isključuje i uključuje pokriva manje od 65% godišnje toplinske potrebe. S druge strane, kada je "on-off" dizalica topline imala veći kapacitet, nisu pronađene uštede energije jer su koristi proizašle iz nižeg omjera kompresije dopuštene frekvencijskom regulacijom dizalice topline u potpunosti kompenzirane energetske zahtjevima invertera i crpki.

Ipak, točna procjena energetske performansi ove vrste sustava općenito je izazovan zadatak za dizajnere HVAC-a. U stvari, potrošnja dizalice topline ovisi o nekoliko čimbenika (npr. klima, termičko opterećenje zgrade i strategija upravljanja sustavom), koje je teško realno simulirati [6]. Na primjer, Junghans [17] je pokazao značajan utjecaj izolacije zidova kuće na sezonski faktor učinkovitosti sustava: neznatno povećanje izolacije ima veliki utjecaj na energetske učinkovitost dizalice topline i posljedično na studije ekonomske i ekološke izvodljivosti. Hesaraki et al. [18] i Huchtemann et al. [19] proučavali su utjecaj temperature dovodne vode na sezonsku učinkovitost voda - voda i zrak - voda dizalice topline. Rezultati ovih radova pokazali su da prihvaćanje niskotemperaturnih jedinica i adaptivnog regulacijskog algoritma koji smanjuje temperaturu opskrbe vode prema efektivnoj potrošnji grijanja dovodi do godišnje uštede primarne energije između 7% i 14%. Konačno, vjerojatno zbog nedostatka znanja o fenomenu cikličkih gubitaka, većina usporedbi između "on-off" i frekvencijski reguliranih uređaja pronađenih u literaturi ne uzima u obzir učinke smanjenog COP-a sustava uslijed cikličkih gubitaka. Upravo je to, uz ranije spomenut nedostatak eksperimentalnih primjera iz prakse gdje je postojeći sustav s jednostavnom "on-off" regulacijom izmijenjen naprednom, doprinos ovoga rada.

3 | Ciljevi i hipoteza rada

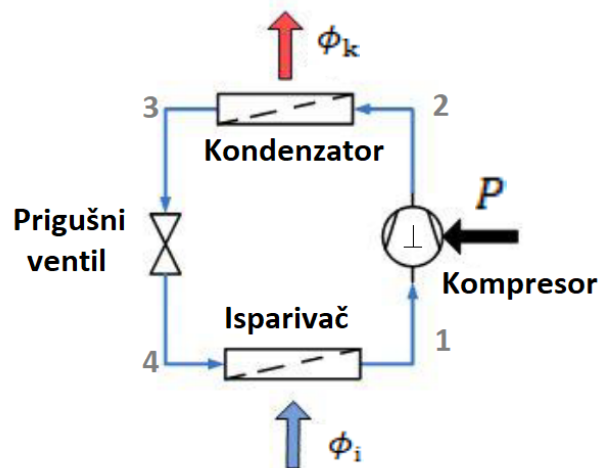
Cilj ovoga rada je istražiti utjecaj ugradnje naprednog sustava regulacije dizalice topline na njenu učinkovitost, odnosno smanjenje potrošnje električne energije potrebne za pogon u odnosu na osnovni slučaj s jednostavnim upravljanjem. Pregledom literature uočen je nedostatak podataka o poboljšanju učinkovitosti stvarnih, izvedenih jedinica u koje je naknadno ugrađen napredni sustav regulacije te su se postavila sljedeća istraživačka pitanja:

1. Koliki će utjecaj napredna regulacija imati na učinkovitost sustava?
2. Mogu li se razlike između napredne i osnovne regulacije dodatno smanjiti pravilnim postavkama parametara jednostavne regulacije?
3. Jesu li postojeći sustavi svojom konstrukcijom pogodni za sustav napredne regulacije?
4. Povećava li se naprednim sustavom trajnost proizvoda?
5. Isplati li se investirati u sustav napredne regulacije postojećih dizalica topline?

4 | Tehnologije dizalica topline

4.1 | Teorijske osnove dizalica topline

Dizalica topline koristi ljevokretni procesa za prijenos topline iz spremnika niže u spremnik više temperature [20]. Osnovni dijelovi dizalice topline su isparivač, kompresor, kondenzator, prigušni ventil i radna tvar prikazani su na slici 1.



Slika 1: Ljevokretni proces

Radna tvar (RT) u parovitom agregatnom stanju (1) ulazi u kompresor koji ju komprimira na viši tlak (2). Komprimirana RT ulazi u kondenzator gdje predaje toplinu toplinskom spremniku niže temperature te mijenja agregatno stanje iz parovitog u kapljevito (3). Kapljevita radna tvar iz kondenzatora dolazi do ekspanzijskog ventila na kojem ekspandira na niži tlak (4). Nakon ekspanzije, mješavina kapljevite i plinovite RT, struji prema isparivaču u kojem uslijed dovođenja topline s toplinskog spremnika isparava. Nakon isparivača parovita RT ponovno struji u kompresor te se proces ponavlja. U modernim izvedbama već je standardno ugrađen i prekretni ventil koji mijenja tok radne tvari kako bi sustav mogao raditi u režimu grijanja i hlađenja. Na taj način jedna dizalica topline može osigurati toplinsku ugodnost tijekom cijele godine [21, 22]. Za ocjenu efikasnosti rada dizalice topline koriste se faktori grijanja i hlađenja. Faktori grijanja i hlađenja definiraju se omjer korisnih toplinskih tokova i snage

potrebne za pogon kompresora. Toplinski tokovi i snaga kompresora povezani su prvim zakonom termodinamike:

$$\phi_k = \phi_i + P, \quad (1)$$

gdje je ϕ_k toplinski tok predan na kondenzatoru jednak zbroju ϕ_i toplinskog toka preuzetog na isparivaču i P snage potrebne za pogon kompresora. Ova je jednadžba grafički prikazana u logp – h dijagramu na slici 2 pomoću specifičnih veličina koje se dobiju dijeljenjem jednadžbe (1) s masenim protokom radne tvari $q_{m,RT}$:

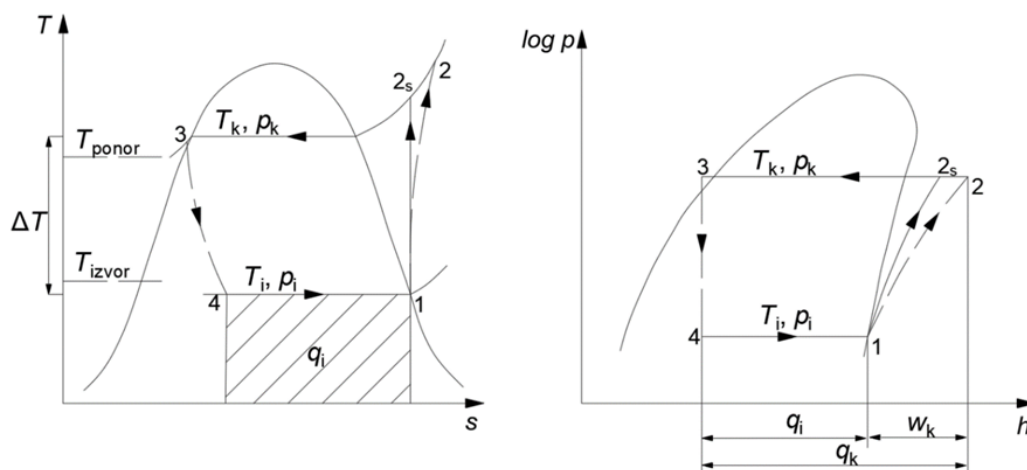
$$q_k = q_i + w_k. \quad (2)$$

Faktor grijanja COP definiran je kao omjer toplinskog toka predanog na kondenzatoru agrijevnom mediju i snage kompresora:

$$\text{COP} = \frac{\phi_k}{P}, \quad (3)$$

a faktor hladenja definira se kao omjer toplinskog toka na isparivaču i snage kompresora:

$$\text{EER} = \frac{\phi_i}{P}. \quad (4)$$



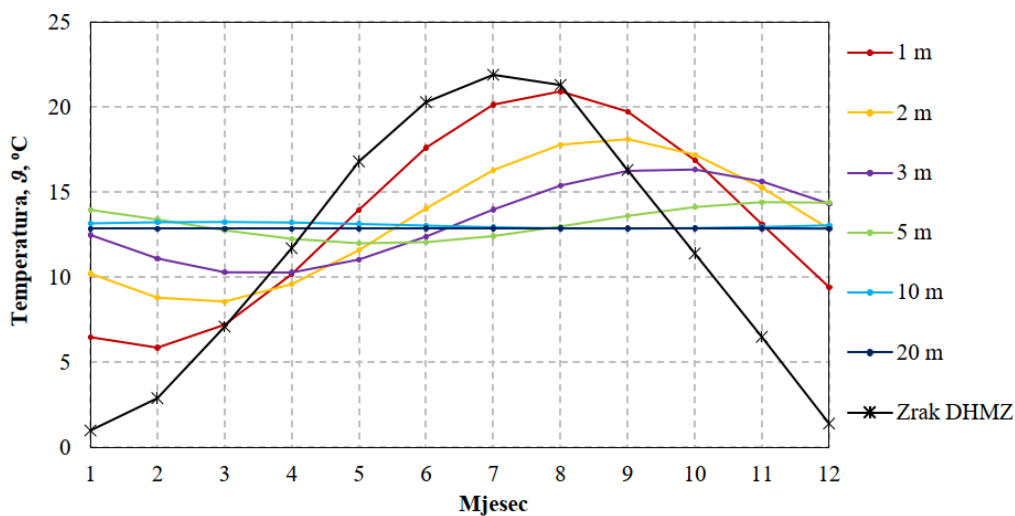
Slika 2: Karakterističan proces u T-s (lijevo) i logp-h (desno) dijagramu

Koeficijent sezonske učinkovitosti ili sezonski faktor grijanja (eng. *seasonal coefficient of performance* - SCOP) je ukupni koeficijent učinkovitosti jedinice, reprezentativan za cijelu utvrđenu sezonu grijanja (odnosi se na utvrđenu sezonu grijanja) koji se računa dijeljenjem referentne godišnje potrebe za grijanjem s

godišnjom potrošnjom električne energije za pogon sustava grijanja. Omjer sezonske energetske učinkovitosti ili sezonski faktor hlađenja (eng. *seasonal energy efficiency ratio* - SEER) je ukupni omjer energetske učinkovitosti jedinice, reprezentativan za cijelu sezonu hlađenja, koji se računa dijeljenjem referentne godišnje potrebe za hlađenjem godišnjom potrošnjom električne energije za hlađenje. Bolji uređaji imaju veću efikasnost procesa, što osim manjih pogonskih troškova znači veći udio obnovljive energije u ukupno potrošenoj energiji sustava [20].

Dizalice topline najčešće se klasificiraju prema njihovom toplinskom spremniku o kojemu izravno ovisi njihova učinkovitost. Tri vrste koje se najčešće koriste u kućnim i manjim komercijalnim sustavima grijanja/hlađenja su kompresijski uređaji sa zrakom, vodom i tлом kao toplinskim spremnikom. Prilikom projektiranja sustava grijanja/hlađenja važno je odabrati tip dizalice topline koji najbolje odgovara svrsi i lokaciji objekta.

Geotermalne dizalice topline zahtijevaju najveću investiciju od prethodno navedenih, ali troše manje energije za rad od izvedbi sa zrakom, najpouzdaniji su izvor, koriste manje radne tvari zbog čega su bolje za okoliš, iziskuju manje troškove održavanja jer dijelovi nisu izloženi utjecaju vremenskih uvjeta [23]. Sustavi grijanja i hlađenja s tлом kao toplinskim izvorom tijekom zime prenose toplinu iz zemlje u zatvoreni prostor, a tijekom ljeta višak topline iz prostorije odbacuju u tlo. Ovisno o veličini dostupne površine izmjenjivač topline u tlu položiti će se ili horizontalno ili vertikalno. Osnovna shema rada geotermalne dizalice topline s vertikalnim izmjenjivačem topline u tlu prikazana je na slici 3.



Slika 4: Ovisnost temperature tla o dubini uspoređena sa zrakom

Vertikalna izvedba bušotinskog izmjenjivača topline podrazumijeva izvedbu bušotine promjera 80 do 200 mm i dubine 50-200 metara. Unutar bušotine se ugrađuju polietilenske cijevi u obliku U cijevi ili cijevi u cijevi (koaksijalni izmjenjivač) te se nakon ugradnje cementiraju s ispunom odgovarajućih toplinskih i mehaničkih svojstava. Na slici 5 shematski su prikazane najčešće izvedbe vertikalnog bušotinskog izmjenjivača topline.



Slika 5: Izvedbe izmjenjivača u tlu [1]

Istraživanja su pokazala da je otprilike 70% energije koja se koristi u geotermalnim dizalicama topline obnovljiva toplinska energija iz tla [24]. Zbog manjeg broja mehaničkih komponenti koje su zaklonjene od vremenskih uvjeta pod zemljom, GSHP su izdržljive i zahtijevaju malo održavanja. Na podzemni dio sustava daju se garancije 25 do 50 godina što korisniku osigurava dugi period bezbrižnosti.

4.2 | Osnove regulacije

Cilj sustava regulacije u području grijanja, ventilacije i klimatizacije (HVAC) je održati udobnost ljudi u pogledu željene temperature, vlage, tlaka i kvalitete zraka unutar zatvorenog prostora [25, 26]. Za svaku jedinstvenu instalaciju potrebno je razviti odgovarajuću tehniku upravljanja kapacitetom i prilagoditi je danom sustavu. Dinamična interakcija komponenata sustava dizalice topline čini upravljanje sustavom kompliciranim i složenim. Nužno je uzeti u obzir sve komponente i njihovu interakciju kada se uspoređuju različite strategije upravljanja [16].

Bez obzira na kompleksnost izvedbe svaki od sustava regulacije sadrži četiri osnovna elementa [27]:

- Senzor - mjeri stvarnu vrijednost kontrolirane varijable poput temperature, vlažnosti
- Regulator - prima ulaz od senzora, obrađuje ga i potom proizvodi izlazni signal za upravljani uređaj.
- Upravljani uređaj - djeluje tako da mijenja upravljanu varijablu prema uputama regulatora.
- Izvor energije - potreban je za napajanje upravljačkog sustava. Upravljački sustavi koriste ili pneumatsko ili električno napajanje.

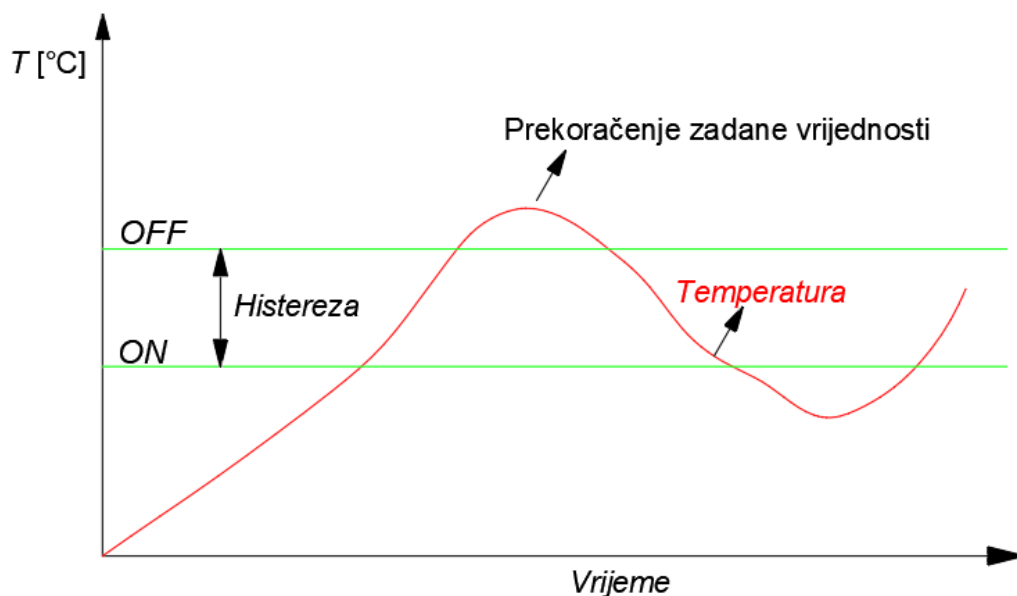
Dizalice topline reguliraju se unošenjem željene temperaturu prostorije u regulator. Ako senzor izmjeri temperaturu u prostoriji koja nije jednaka zadanoj, uz uneseno dozvoljeno odstupanje, dizalica topline se uključuje u rad pokretanjem upravljanog uređaja, kompresora. Kada senzor izmjeri vrijednost temperature u prostoriji unutar željenog intervala regulator gasi kompresor.

Postoje različite metode za regulaciju kapaciteta dizalice topline. Kao komponentu u dizalici topline, kompresor je najlakše regulirati, stoga se većina regulacijskih rješenja odnosi upravo na njega. Najčešće regulacije kompresora su: on/off regulacija, uključivanje/isključivanje dodatnih kompresora (multikompresorski setovi), izvršavanje iz pogona pojedinih cilindara kompresora, promjena štetnog prostora cilindra kompresora, prigušivanje usisnog voda te korištenje kompresora s promjenjivom brzinom vrtnje.

Osnovna „on-off“ regulacija paljenja i gašenja kompresora koristi se na jednostavnijim i manjim sustavima. Regulator je zapravo relej koji zatvara ili otvara svoje kontakte i time pali i gasi upravljani uređaj, kompresor. Regulirana varijabla, snaga kompresora, poprima maksimalnu ili minimalnu vrijednost, ovisno o tome je li senzorom mjerena varijabla, temperatura, veća ili manja od zadane [2]. Ako

je toplinsko opterećenje upola manje od projektnog, sustav će raditi određeno vrijeme, a zatim će isti period biti ugašen. Većina postojećih komercijalnih i privatnih rashladnih sustava u svijetu još uvijek se zasniva na ovom tradicionalnom diskontinuuiranom obliku regulacije. Rezultat je suvišna potrošnja energije, loša kontrola temperature i ograničenost upravljanja [28].

Dizalica topline koja radi u „on-off“ režimu mora isporučiti toplinu na višim temperaturama da osigura toplinsku energiju potrebnu tijekom čitavog ciklusa. Samim time u režimu grijanja raste temperatura kondenzacije i pada učinkovitost. Ako želimo smanjiti pregrijanje potrebno je postaviti kraće intervale paljenja i gašenja. U tom slučaju sustav radi u nestacionarnim uvjetima i dolazi do bržeg trošenja opreme. Potrebno je pronaći optimalnu temperaturnu histerezu sustava takvu da je vrijeme između uključivanja, kada je temperatura spremnika minimalna i isključivanja, kada je spremnik na gornjoj temperaturnoj granici, minimalno koje ne izaziva trošenje komponenti. Ciklus je prikazan na slici 6.



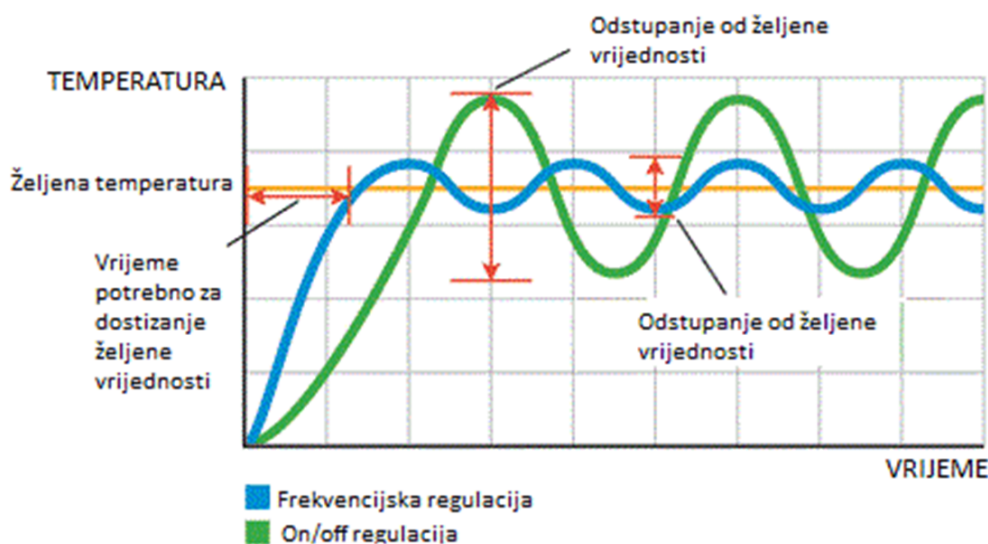
Slika 6: Rad uređaja u „on/off“ režimu [2]

Krivulja odziva uvijek se kreće između dvije granice "on" i "off", a prelaženje iznad i ispod linija se u praksi događa zbog toplinske inercije prostora i postrojenja. Razlika između temperatura pri kojima regulator uključuje ili isključuje sustav naziva se "histereza". Povećanjem histereze smanjuje se učinkovitost regulacije jer se predugo čeka na odaziv sustava. Postavljena je histereza razlika između postavljene "on" i "off" vrijednosti kontrolirane varijable.

Regulacija brzine vrtnje motora koji pokreće kompresor zahtijeva određenu vrstu

elektronike za upravljanje motorom. Ovaj postupak naziva se frekvencijska regulacija. Frekvencijski regulirani uređaji bazirani su na promjeni broja okretaja motora kompresora kako bi se maksimizirala učinkovitost uređaja. Za provedbu frekvencijske regulacije potrebno je u sustav ugraditi PID regulator i frekvencijski pretvarač. Frekvencijski pretvarač (inverter) kontrolira frekvenciju motora i time mijenja njegovu brzinu rada.

Za jednaku željenu vrijednost temperature u prostoriji (eng. set point) kompresor dizalice topline s ugrađenim frekvencijskim pretvaračem brže dostiže zadanu vrijednost. To je moguće jer povećanjem frekvencije (sukladno povećanje brzine vrtnje kompresora) u sustav ulazi veća količina radne tvari pa dizalica topline isporučuje veći učin te se brže dolazi do željene vrijednosti. Također ugradnjom frekvencijskog pretvarača omogućuje se i pogon kompresora pri nižim brzinama vrtnje (manje radne tvari u sustavu) što utječe na manja odstupanja od željene vrijednosti. Kada se približi željenoj vrijednosti temperature dizalica topline smanjuje svoj učin te predaje manje topline (manje odstupanje od zadane vrijednosti) za razliku od „on-off“ regulacije gdje se nastavlja rad s maksimalnim učinkom (veće odstupanje od zadane vrijednosti). Veće odstupanje od željene vrijednosti temperature zapravo predstavlja neefikasno utrošenu energiju te se narušava iskoristivost cjelokupnog procesa. Usporedba rada uređaja s „on-off“ regulacijom i frekvencijskom regulacijom prikazana je na slici 7. Ostale prednosti rada s frekvencijskim regulatorom očituju se u tišem radu uređaja, manjem broju ciklusa paljenja i gašenja te uštedi u potrošenoj energiji.



Slika 7: Usporedba frekventnog reguliranog i „on-off“ reguliranog uređaja

Frekvencijski pretvarači su uređaji za kontinuiranu promjenu brzine vrtnje elektromotora. Zasnivaju se na činjenici da je brzina vrtnje kaveznog asinkronog motora proporcionalna frekvenciji napona koji se dovodi na stezaljke motora, jednačba (5);

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s). \quad (5)$$

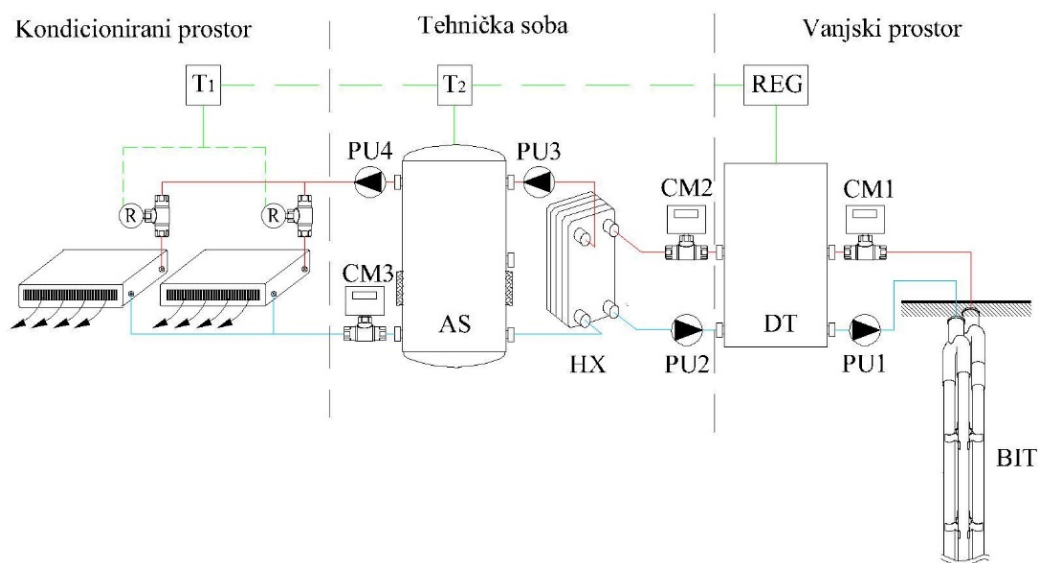
Brzina vrtnje motora n izražena je u min^{-1} , a frekvencija napona u Hz. Broj pari polova motora označen je slovom p , a klizanje motora slovom s . Bez frekvencijskog pretvarača asinkroni elektromotor bi uvijek radio s istim brojem okretaja koji određuje frekvencija napona mreže f . Učinkovitost pogona s promjenjivom frekvencijom je obično 92-98%. Gubici od 2-8% nastaju zbog dodatnog rasipanja topline uzrokovanog visokofrekventnim električnim prebacivanjem i dodatnom snagom koja je potrebna elektroničkim komponentama za regulaciju.

5 | Opis mjerne linije i uređaja

Mjerni sustav s geotermalnom dizalicom topline postavljen je u južnoj zgradi Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Najveća komponenta, bušotinski izmjenjivač topline, ukopana je u tlo ispred računalnih učionica S7 i S8. Zadaća dizalice topline je održavanje toplinske ugodnosti računalnih učionica tijekom cijele godine. Mjerni uređaji omogućuju praćenje parametara procesa te njihov utjecaj na efikasnost sustava kao cjeline.

5.1 | Sustav geotermalne dizalice topline

Sustav dizalice topline radi jednostavnosti podijeljen je u tri dijela: krug bušotinskog izmjenjivača topline, rashladni krug s propanom (R290) kao radnom tvari i krug razvoda vode s ventilokonvektorima. Sustav je prikaza shematski na sljedećoj slici.



Slika 8: Shematski prikaz sustava geotermalne dizalice topline na FSB-u

Krug razvoda vode s ventilokonvektorima prostire se kroz tehničku sobu i računalne učionice. U tehničkoj se sobi nalaze pločasti međuzmjenjivač (HX) kojim se razdvaja krug razvoda vode i krug glikolne smjese, akumulacijski spremnik (AS),

dvije cirkulacijske pumpe (PU3, PU4), ventilokonvektor te pripadajući cjevovod i armatura. Po dva stropna ventilokonvektora, proizvođača Sabiana, nalaze se u svakoj računalnoj učionici te su opremljeni termostatom za podešavanje željene temperature u prostoriji. Protokomjer (CM3) je spojen na povrat iz ventilokonvektora u spremnik, a postavljeno je i nekoliko termometara (T) za praćenje parametara procesa.

Krug bušotinskog izmjenjivača topline obuhvaća bušotinski izmjenjivač topline (BIT), cirkulacijsku pumpu (PU1) i pripadajuću armaturu. Bušotinski izmjenjivač topline dvostruka je U cijev ukopana u bušotinu promjera 152 mm i dubine 130 m. Materijal cijevi je polietilen visoke gustoće (PEHD 100) vanjskog promjera 32 mm i unutarnjeg 26,2 mm. Zbog što manje interakcije temperaturnih polja, razmak između cijevi se održava odstojećima koji su postavljeni na svaka 2 m. Kroz bušotinski izmjenjivač topline struji 30 postotna glikolna smjesa pogodna za primjenu zbog svoje niske temperature smrzavanja. Oko bušotinskog izmjenjivača topline nalazi se ispuna Fischer GeoSolid 235 koja pospješuje kontakt, a samim time i prijenos topline između cijevi i tla i sprječava urušavanje iste.

Centralni dio rashladnog kruga je dizalica topline tvrtke Frigo Plus d.o.o., nazivnog učin grijanja 11,94 kW i hlađenja 13,65 kW. Sastoji se od poluhermetičkog stapnog kompresora, pločastog kompaktnog isparivača i kondenzatora te elektroničkog ekspanzijskog ventila. Dodatni pločasti međuzmjenjivač koristi se za pothlađenje radne tvari na izlazu iz kondenzatora te pregrijanje radne tvari na ulazu u kompresor. Radna tvar je propan (R290). Prigušni ventil u sustavu dizalice topline radi jednosmjerno stoga je preokretanje sustava, iz grijanje u hlađenje i obrnuto, izvedeno pomoću troputnih ventila i dodatnog cjevovoda na strani izvora/ponora topline. U sezoni grijanja krug bušotinskog izmjenjivača topline povezan je s isparivačem dizalice topline, a krug razvoda vode povezan je s kondenzatorom. U sezoni hlađenja kondenzator se spaja s krugom bušotinskog izmjenjivača topline, a krug razvoda vode spaja se na isparivač dizalice topline.

5.2 | Komponente mjerne linije

5.2.1 Isparivač i kondenzator

Isparivač i kondenzator pripadaju skupini toplinskih aparata koji služe za izmjenu topline. Geotermalna dizalica topline koristi kompaktne pločaste izmjenjivače topline kao isparivač i kondenzator. Kompaktni pločasti izmjenjivači topline spadaju u rekuperativne izmjenjivače topline što znači da su dvije struje fluida fizički odvojene stijenkom. Preko stijenke se toplina prenosi s fluida više temperature na fluid niže temperature. Izmjenjivači se sastoje od većeg broja valovitih ploča

lima projektne veličine. Veličina i broj samih ploča ovisi o potrebnom kapacitetu i drugim potrebama sustava (pregrijavanje/pohlađivanje radne tvari). Dvije ploče zajedno tvore kanale koji mogu biti pod različitim kutevima i različitim veličinama. Odabir odgovarajućih parametara ovisi i o odnosu pada tlaka i željenog prijenosa topline [29]. Između pojedinih ploča nalaze se brtve, koje osim brtvljenja prema okolini, služe i za distribuciju tvari.

Također same ploče svojim oblikom povećavaju turbulenciju te se time povećava koeficijent prolaza topline. Radna tvar ulazi u svaki drugi međuprostor (prvi, treći, peti itd.), a hlađeni/grijani medij ulazi u ostale (drugi, četvrti, šesti, itd.) međuprostore.

5.2.2 Kompresor

Kompresori u sustavima dizalice topline koriste se za usisavanje i kompresiju parne faze radne tvari. Kompresijom radne tvari ostvaruje se razlika tlakova (kompresijski omjer) kojom se omogućava strujanje radne tvari s područja niskog na područje visokog tlaka tj. dovođenje radne tvari na viši energetska nivo (privođenjem kompenzacijske energije) [30]. U današnjim sustavima najčešće se koriste izvedbe kompresora volumetrijskog načela: kompresori s oscilirajućim stapom (stapni kompresori) te kompresori s rotirajućim stapovima (spiralni i vijčani kompresori). Također, ovisno o konstrukcijskoj izvedbi, kompresore dijelimo na hermetičke, poluhermetičke i otvorene kompresore. Kod hermetičke izvedbe kompresora, sami kompresor i pogonski motor su integrirani u sustav radne tvari. Pogonski motor zatvoren je u hermetičku posudu kroz koju struji radna tvar hladeći kompresor. Otvoreni kompresori imaju motor smješten izvan kruga strujanja radne tvari. Takvi kompresori najčešće su hlađeni zrakom i lako se održavaju u slučaju kvarova [31]. Poluhermetički kompresori konstrukcijski su slični hermetičkim kompresorima, ali imaju servisni otvor.

Mjerena dizalica topline koristi stapni kompresor u poluhermetičkoj izvedbi proizvođača Dorin (slika 9). Stapni kompresori kretanjem stapa unutar cilindra omogućuju kompresiju radne tvari. Stap je, stapnim mehanizmom, povezan na koljenasto vratilo koje je pogonjeno elektromotorom. Stap putuje od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT) pritom usisavajući radnu i povratno gdje tlači i istiskuje RT u tlačni vod. Na putu



Slika 9: Kompresor Dorin

između krajnjih položaja stap naizmjenice ubrzava i usporava, uslijed čega se javljaju vibracije. U odnosu na vijčane i spiralne kompresore stapni kompresor ima manju efikasnost oko zadanog kompresijskog omjera, ali im krivulja efikasnosti ne pada izražajno s promjenom kompresijskog omjera kao kod vijčanih i spiralnih kompresora.

5.2.3 Frekvencijski pretvarač

U sustav je ugrađen frekvencijski pretvarač ABB ACH580-01 napravljen za potrebe HVAC sustava (slika 10). Koristi se za dizalice topline nazivnog učina do 15 kW. Ulaznu trofaznu struju napona 380 do 480 V i frekvencije 50/60 Hz pretvara u izlaz promjenjive frekvencije i napona u rasponu od 0 do ulaznog. Promjenom frekvencije regulira se broj okretaja standardnog asinkronog ili sinkronog motora. Raspon izlaznih frekvencija kreće se od 0 do 500 Hz. Opremljen je s naponskim (2-10 V) i strujnim (4-20 mA) izlazima kojima se podaci o radu šalju na računalo.



Slika 10: Ugrađeni frekvencijski pretvarač ABB ACH580-01

5.2.4 Elektronički ekspanzijski ventil

Elektronički ekspanzijski ventil (EEV) regulator je temperature pregrijanja. Temperatura pregrijanja regulira se s ciljem isparavanja sve radne tvari u isparivaču kako bi se zaštitio kompresor od pojave kapljica radne tvari koje bi zbog svoje nestlačivosti uzrokovale kvar kompresora. Ovisno o tlaku i temperaturi na izlazu iz isparivača mikroprocesor EEV-a otvara i zatvara ventil kako bi propustio onoliko radne tvari koliko je potrebno za održavanje željenog pregrijanja. Željeno pregrijanje radne tvari odabire korisnik na regulatoru EEV-a.

Prigušni ventili u sustavu dizalice topline model je Carel E2V24. Koristi se za kontroliranje protoka kapljevite radne tvari s dijela sustava pod visokim tlakom u dio sustava pod niskom tlakom. Protok se kontrolira prigušivanjem s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja.

5.2.5 Ostale komponente sustava

Sakupljač ukapljene radne tvari (eng. reciver) marke OCSCOLD prihvaća radnu tvar koja dolazi iz kondenzatora ili iz čitavog sustava. Time se omogućava da se kondenzator uređaja drži praznim te se u njemu akumulira radna tvar za trenutne potrebe sustava. Također, prilikom servisa, radna se tvar u njemu sakupi dok se određeni dio sustava servisira. Na taj se način samo manji dio radne tvari izgubi u okoliš.

Filtar ulja, Castel 315s, služi za odvajanje krutih čestica iz kruga radne tvari. Krute čestice u većim koncentracijama mogu oštetiti komponente sustava.

Cirkulacijske pumpe marke Wilo u sustavu s dizalicom topline održavaju protok glikolne smjese/vode u krugu izvora i ponora topline. Kod pokretanja uvijek se prvo pokreću pumpe kako bi komponente sustava i sekundarni fluidi bili protemperirani. Akumulacijski spremnik vode Elbi puffer-p 300 plus u sustavu služi kako bi se izbjeglo konstantno paljenje i gašenje dizalice topline. U akumulacijskom spremniku se pomoću vode akumulira rashladni/toplinski učin te se distribuira na ventilokonvektore. Primjenom akumulacijskog spremnika omogućuje se mirniji rad. Volumen postavljenog akumulacijskog spremnika je 300 l.

U sustavu se nalaze i dvije ekspanzijske posude. Model Extravarem 1r (25 l) nalazi se u krugu distribucije vode, a model reflex N (12 l) u krugu bušotinskog izmjenjivača topline. Ekspanzijska posuda kompenzira promjenu volumena medija koji se nalazi u optoku. Do promjene volumena dolazi kod promjene temperature vode/glikolne smjese. Ekspanzijska posuda štiti sustav od manjka medija i od pucanja cijevi uslijed prevelikog volumena.

5.3 | Mjerna oprema



Slika 11: Mjerna oprema u tehničkoj sobi

Mjerna oprema služi za pretvorbu mjernih veličina u signale, koji se zatim elektroničkim komponentama pretvaraju u oblik prikladan za prikaz i pohranu na mjernom uređaju ili računalu. Na taj se način mogu pratiti pojedini parametri procesa. Mjerni sustav je opremljen mjerilima toplinske i električne energije, osjetnicima temperature te pretvaračima tlaka.

5.3.1 Mjerenje temperature

Mjerenja temperature na ispitnom uređaju provode se pomoću termoparova tipa K (Ni/NiCr). Korišteni termoparovi imaju preciznost od $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ te raspon mjerenja od -40 do 1000°C . Njima se mjeri temperatura zraka u prostoru i vanjskom okolišu, polaz/povrat prema bušotinskom izmjenjivaču topline, međuizmjenjivaču, spremniku, potrošačima te temperature radne tvari u karakterističnim točkama procesa. Kako bi

se što preciznije mjerila temperatura, termoparovi su umetnuti u samu cijev pomoću kapilara.

5.3.2 Mjerenje tlaka

Ispitni uređaj sadrži dva pretvarača tlaka koji se nalaze u tlačnom i usisnom vodu kompresora. Pretvornici tlaka rade na piezoelektričnom efektu tj. pojavi električnog naboja na površini kristala na koji djeluje tlačna sila. Mjerna nesigurnost pretvarača tlaka između temperatura od -10 do 135°C iznosi 4%.

5.3.3 Mjerenje toplinske energije

U mjerenom sustavu koristi se mjerilo toplinske energije Landis Gyr+ koje koristi ultrazvučno mjerilo protoka i Pt500 sonde za mjerenje temperature. Pt500 sonde

su otpornički termometri čiji se rad temelji na promjeni otpora s promjenom temperature.

5.3.4 Mjerenje električne snage

Mjerenje električne snage (potrošnje energije) provodi se na dizalici topline, kompresoru, regulaciji dizalice topline te pumpama u sustavu dizalice topline. Mjerenja se provode digitalnim multimetrima tvrtke Schneider i Schrack.

5.3.5 Akvizicijski sustav

Za prikupljanje podataka iz mjernih uređaja, obradu i njihov transfer prema računalu korišten je sustav za akviziciju podataka Agilent 34970 A s analogno-digitalnim pretvaračem. Mjerna je oprema spojena na strujne (4-20 mA) i naponske (2-10 V) ulaze. Mjerni se podaci prikupljaju preko USB-GPIB kabela na računalo u kontrolnoj sobi. Na računalu su se podešavali parametri mjerenja i pratili tijekom samog izvođenja. Postavljanje mjernog intervala, kontroliranje mjerenja i obrada ulaznih podataka (pojačanje i kompenzacija) potrebnih za mjerenje odrađivale su se preko softverskog alata Agilent BenchLink Data Logger. Izmjereni podaci spremni su u tabličnom obliku te naknadno procesuirani.

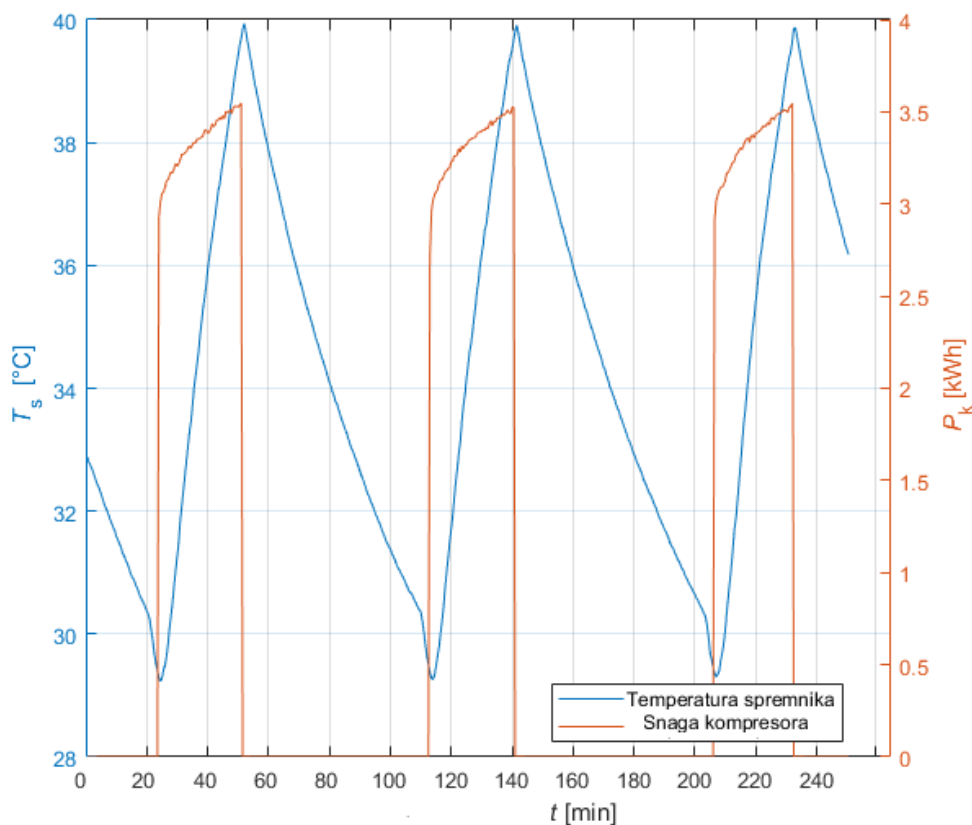
5.4 | Metodologija mjerenja

Mjerenja su provedena od ožujka do lipnja 2020. godine na predhodno opisanoj mjernoj liniji. Provedena su mjerenja za sezonu grijanja. Provedena mjerenja obuhvaćaju prijelazno razdoblje u sezoni grijanja kada se ne očekuju maksimalna opterećenja. Mjerenja su se provodila po nekoliko sati kako bi se izbjegle sve prijelazne pojave u sustavu. Velik broj provedenih mjerenja (očitanja parametara procesa) također je dao uvid u ponašanje sustava kod različitih opterećenja. Mjerni interval bio je postavljen na 30 sekundi. Prvo su provedena mjerenja s „on/off“ regulacijom kompresora, a nakon toga ugrađen je frekvencijski pretvarač pa su mjerenja ponovljena. Zadana temperatura akumulacijskog spremnika postavljena je na 40°C. Mjerenja su provedena za tri različite histerze spremnika od 3, 6 i 9 °C kako bi se pratio i utjecaj histerze na efikasnost samog sustava. Mjereni parametri procesa obrađeni su u programskom paketu Matlab uz pomoću Coolprop koji je poslužio za dobivanje veličina stanja za zadane vrijednosti.

6 | Pregled prikupljenih podataka i njihova analiza

6.1 | „on/off“ regulacija

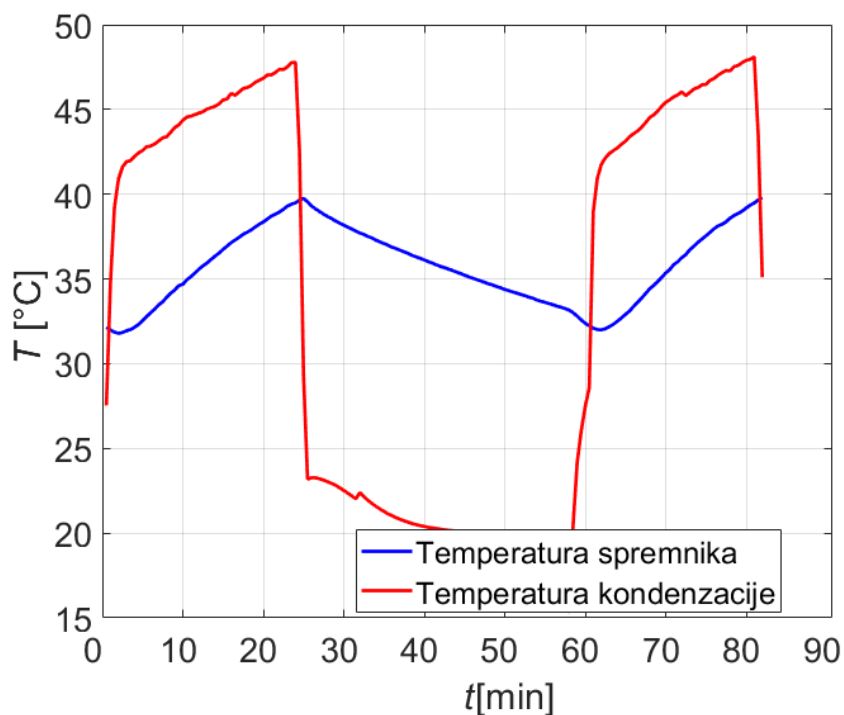
Toplinsko opterećenje u prostorijama S7 i S8 pokriva se iz topline spremljene u akumulacijskom spremniku. Voda iz akumulacijskog spremnika struji preko ventilokonvektora predajući toplinu prostoriji. Predavanjem topline prostoriji snižava se temperatura u akumulacijskom spremniku. Kada temperaturni osjetnik očita temperaturu ispod zadane vrijednosti (temperatura spremnika umanjena za histerezu) šalje se signal dizalici topline za pokretanje kompresora. Na slici [12](#) prikazano je nekoliko karakterističnih ciklusa za upoznavanje s problematikom procesa.



Slika 12: Ciklusi paljenja i gašenja kompresora

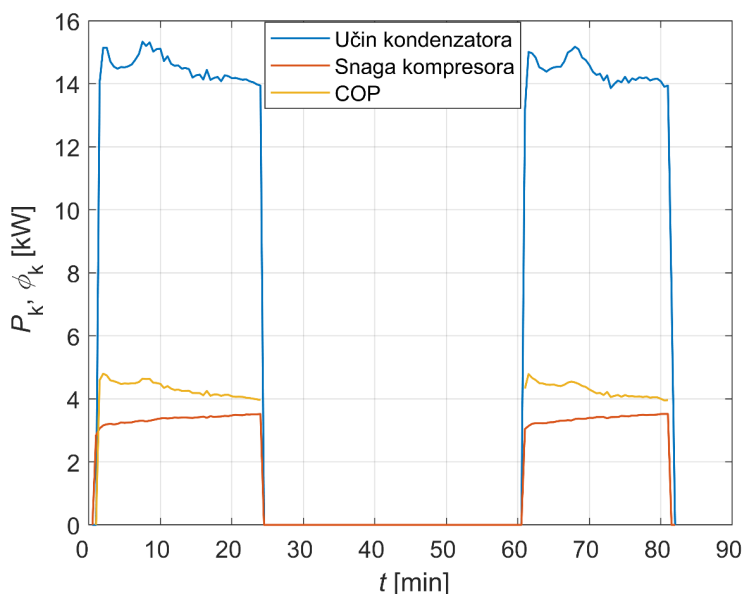
Karakterističan proces kod pokretanja kompresora prikazan za odabranu temperaturnu histerzu spremnika od $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na y-osi prikazani su temperatura spremnika (T_s) i izmjerena snaga kompresora (P_k) dok je na x-osi prikazano relativno vrijeme (t) u minutama. Dizalica topline pokreće se kada spremnik poprimi vrijednost od $31\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na grafu se vidi da temperatura u spremniku ne raste odmah nego pada na vrijednost od $29\text{ }^{\circ}\text{C}$. Razlog tome je inercija sustava tj. potrebni je određeni period da se zagrije voda u sustavu pa da osjetnik bilježi rast temperature. Paljenje kompresora prati se porastom izmjerene snage kompresora. Kad spremnik ponovno dostigne gornju vrijednost kompresor se isključuje.

U sustavu bez napredne regulacije kompresor počinje raditi punim kapacitetom. Samim time puno radne tvari kruži kroz sustav pa je toplinski tok na kondenzatoru velik. Temperatura kondenzacije tijekom ciklusa raste jer je proporcionalna temperaturi spremnika (koja također raste jer se grije spremnik) što je prikazano na slici 13.



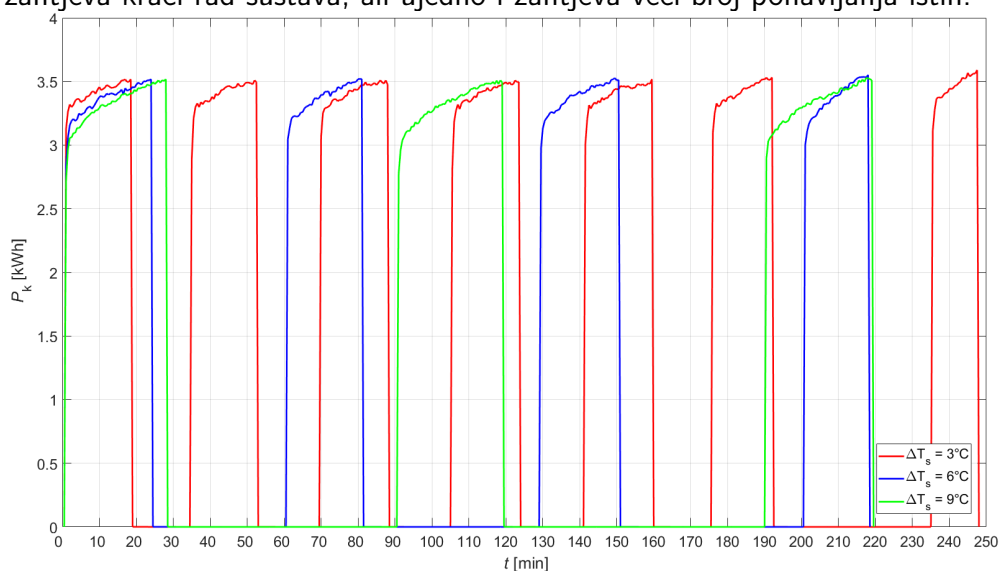
Slika 13: Ovisnost temperature kondenzacije o temperaturi spremnika

To dovodi do blagog porasta snage unutar ciklusa i pada učina na kondenzatoru što je u suglasnosti s rezultatima Solde [1]. Stoga dolazi do smanjenja COP-a prema jednadžbi (3). Ovi trendovi prikazani su na slici 14. Prema tome, poželjno je da temperatura ogrjevnog fluida bude što je niža moguća, uz uvjet da još uvijek zadovoljava traženi učin.



Slika 14: „on/off“ regulacija usporedba snage kompresora i učina kondenzatora

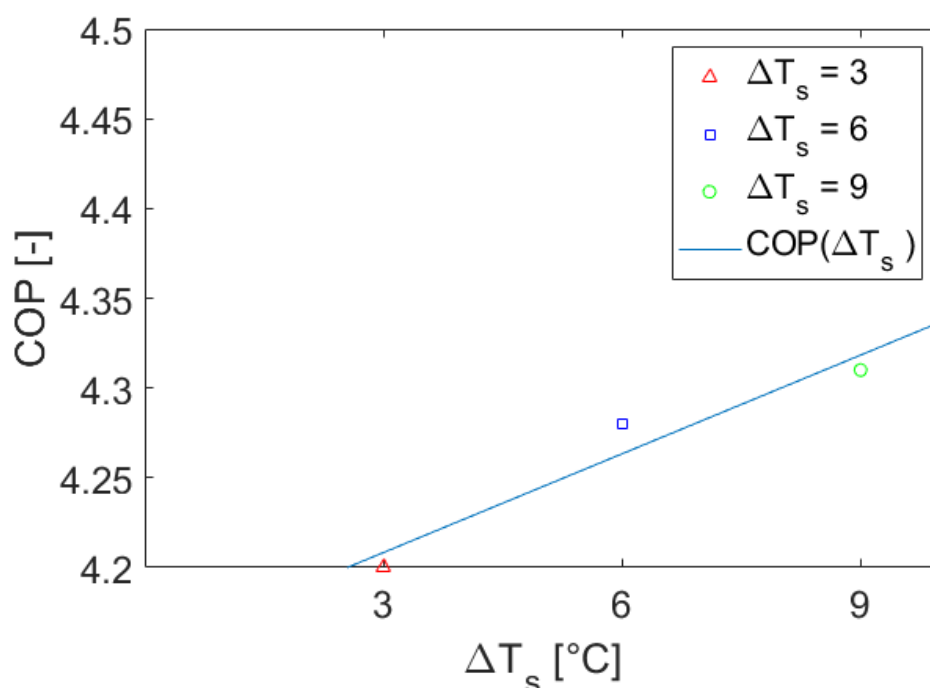
Ovisnost promjene histereze spremnika i vremena rada kompresora prikazana je na slici 15. Veća histereza spremnika (zeleni ciklusi) zahtjeva duži rad kompresora tijekom jednog ciklusa, ali zato broj takvih ciklusa je manji. Manja histereza zahtjeva kraći rad sustava, ali ujedno i zahtjeva veći broj ponavljanja istih.



Slika 15: Ovisnost histereze spremnika i vremena rada

Odabirom veće histereze spremnika tj. manji broj ciklusa bolje utječe na očuvanje

kompresora. Kompresora kod pokretanja koristi veliki okretni moment da savladavanje razlike tlakova između isparivača i kompresora. Za to mu je potreban velika količina struje što dovodi do ubrzanog zagrijavanja namotaja elektromotora. Stalnim paljenjem i gašenjem takav proces se često ponavlja što dovodi do bržeg trošenja namotaja motora, a može dovesti i do pregaranja samog motora [28]. Provedena mjerenja bez frekvencijske regulacije za različite histerze spremnika dale su sljedeće vrijednosti COP-a prikazane na slici 16. Za najveću histerzu spremnika (9°C) dobila se ujedno i najveća vrijednost COP-a od 4.31, a za najmanju histerzu spremnika (4°C) slijedni i najmanja vrijednost COP-a od 4.2.

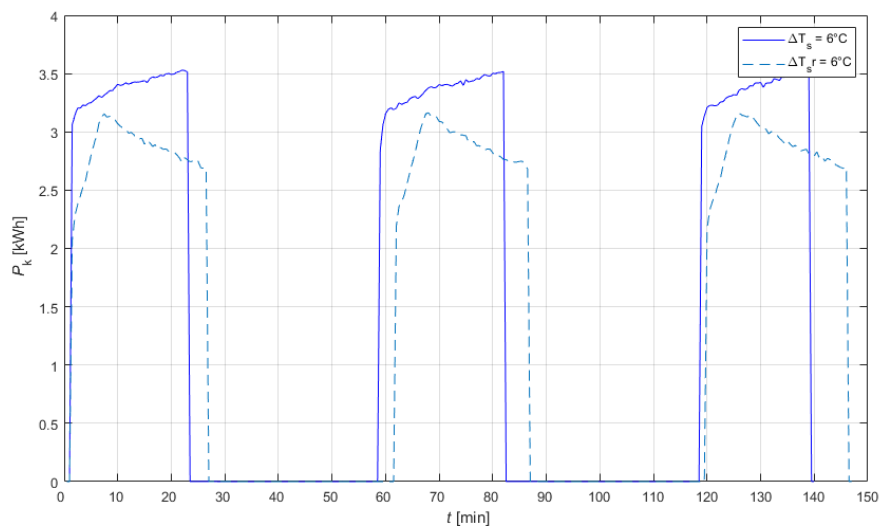


Slika 16: Vrijednosti COP za „on/off“ regulaciju za različite histerze
 Do rasta vrijednosti COP-a porastom histerze dolazi zbog smanjenja srednje temperature spremnika i manjeg broja paljenja kompresora čime se izbjegavaju nestacionarne pojavi pri paljenju.

6.2 | Frekvencijska regulacija

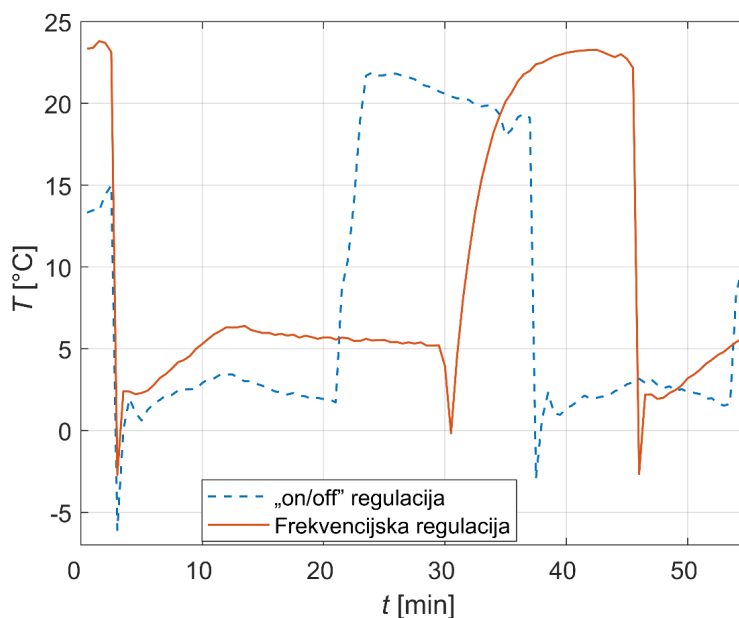
Na slici 17 prikazani su usporedno radni ciklusi kompresora s frekvencijskom regulacijom (isprekidana linija) i bez frekvencijske regulacije (puna linija). Graf prikazuje da s korištenjem frekvencijskog pretvarača kompresor kod pokretanja

troši manje energije te se produljuje vrijeme rada kompresora za dostizanje iste tražene temperature spremnika.



Slika 17: Usporedba paljenja kompresora s i bez frekvencijske regulacije

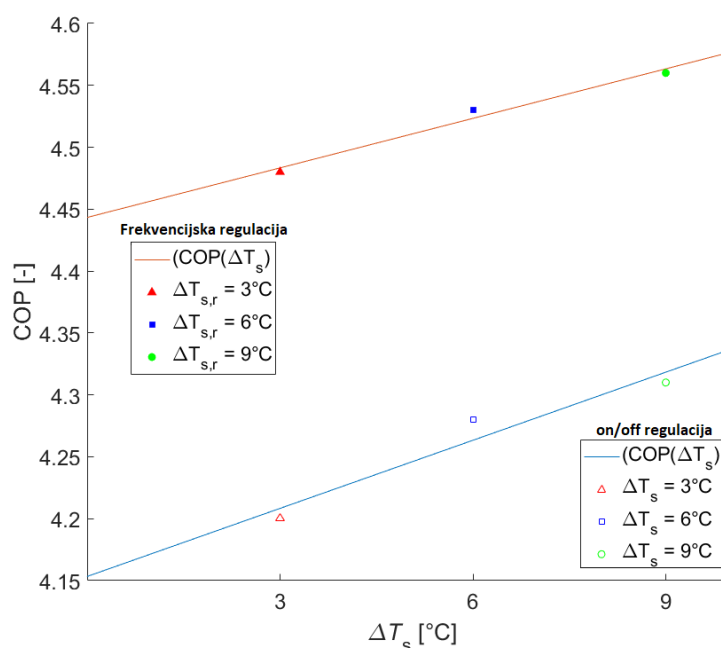
Na slici 18 prikazano je usporedba temperature isparavanja s i bez frekvencijskog upravljača.



Slika 18: Usporedba temperatura isparavanja s i bez frekvencijske regulacije

Za karakterističan ciklus paljenja korištenjem frekvencijske regulacije temperatura

isparavanja poprima višu prosječnu vrijednost nego bez frekvencijske regulacije. Razlog tome je manja količina radne tvari koja se šalje u sustav korištenjem frekvencijske regulacije. Manje radne tvari duže se zadržava u sustavu što znači bolja izmjena topline i povećanje srednje vrijednosti temperature na isparivaču. Izmjerene vrijednosti faktora grijanja za mjerenja s ugrađenim frekvencijskim pretvaračem prikazana su na grafu na slici 19 i uspoređene su s rezultatima mjerenja bez frekvencijskog pretvarača. Mjereni podaci pokazuju da se ugradnjom frekvencijskog pretvarača povećava vrijednost COP-a za istu histerzu spremnika.



Slika 19: Usporedba COP-a s i bez frekvencijske regulacije

Izračunate vrijednosti faktora grijanja za različite histerze prije i nakon ugradnje frekvencijskog pretvarača prikazane su u tablici 1. Također je prikazano povećanje COP-a u postocima.

Tablica 1: Izračunate vrijednosti COP-a prije i nakon ugradnje frekvencijskog pretvarača

Histerza spremnika	$\Delta T = 3^\circ\text{C}$	$\Delta T = 6^\circ\text{C}$	$\Delta T = 9^\circ\text{C}$
COP - "on-off" regulacija	4.20	4.28	4.31
COP - frekvencijska regulacija	4.48	4.53	4.56
Povećanje vrijednosti COP-a	6.25%	5.52%	5.48%

6.3 | Proračun godišnjih ušteda

Eksperimentalni podaci pokazali su da se ugradnjom frekvencijskog pretvarača postižu više vrijednosti COP-a za pojedine cikluse. Cjelogodišnje ponašanje sustava prikazat će se kvazistacionarnom simulacijom. Temeljem izmjerenih podataka izračunate su se vrijednosti COP-a tijekom cijele godine kako bi vidjela eventualna ušteda na potrošenoj energiji.

Satno toplinsko opterećenje prostorija izračunato je u sklopu rada Boban [20]. Potrebne temperature zraka preuzete su od Državnog hidrometeorološkog zavoda. Povezanost temperature tla i temperature zraka preuzeta je iz „Algoritma za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama“ [32]:

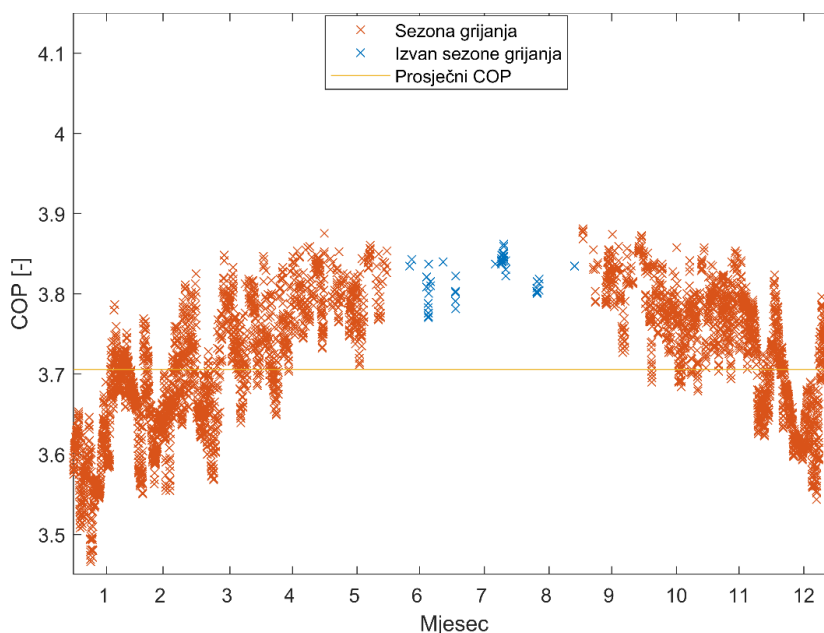
$$T_{tlo} = 0,15T_z + 1,5. \quad (6)$$

Iz izmjerenih podataka dobivena je funkcijska ovisnost COP-a i temperature tla:

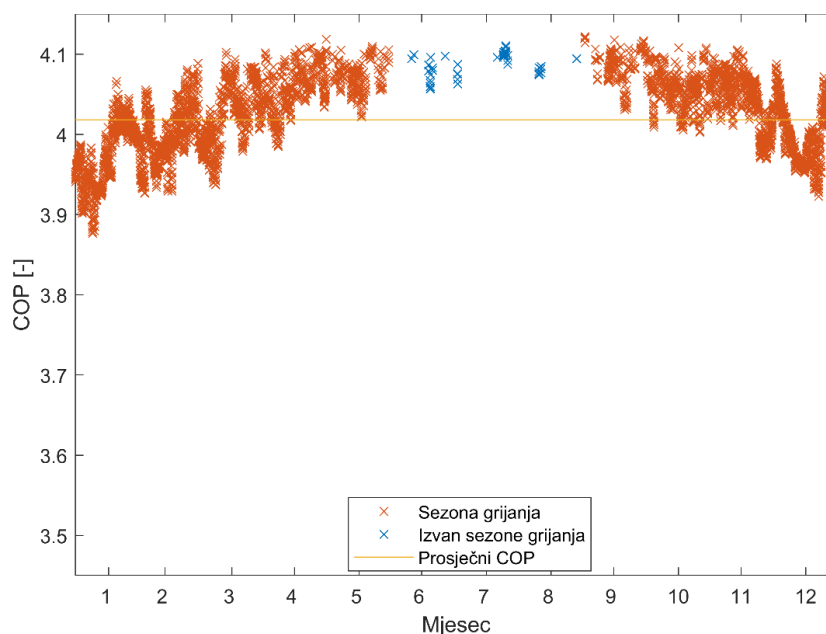
$$COP_{1,on/off} = 0,090982T_{tlo} + 3,511, \quad (7)$$

$$COP_{1,f} = 0,05375T_{tlo} + 3,903. \quad (8)$$

Dobivene satne vrijednosti tla iz jednadžbe 6 ubacujemo u jednadžbe (7) i (8) i dobivamo faktore grijanja za svaki sat u godini, slika 20 i 21.



Slika 20: Godišnje simulirane vrijednosti COP-a bez frekvencijske regulacije



Slika 21: Godišnje simulirane vrijednosti COP-a s frekvencijskom regulacijom

Trendovi grafova prilično su slični. Ipak, vidi se da je graf „on/off“ regulacije „razvučeniji“ po y osi, odnosno osjetljiviji na promjene temperature izlaza iz tla. To se može zaključiti i prema većem koeficijentu pravca jednadžbe (7) u usporedbi s jednadžbom (8). Samim time on daje lošije vrijednosti na niskim temperaturama od polinoma jednadžbe (8) frekventno reguliranog sustava. Prosječni je COP za sustav bez regulacije 3,71, a za sustav s regulacijom 4,02. Treba napomenuti da su eksperimentalno prikupljeni podaci dobiveni za vrlo uski interval temperatura tla, koje su u vrijeme mjerenja bile znatno više od proračunskih. Osim toplog vremena, na temperature izlaza iz tla utjecalo je i duže vrijeme uređaja izvan pogona. U radu uređaj izmjenjuje toplinu s tlom i mijenja temperaturno polje u okruženju BIT-a. Isključivanjem iz rada dolazi do regeneracije tla, toplinska se energija ne iscrpljuje pa se tlo protemperira i zemlja oko BIT-a ponovo postaje toplija. Dobiveni rezultati iz jednadžbi (7) i (8) za realne uvijete ekstrapolacija su mjerenih rezultata što narušava njihovu točnost.

Da bi se dobio sezonski faktor grijanja (SCOP) vrijednosti faktora grijanja treba korigirati faktorom djelomičnog opterećenja (PLF) i osrednjiti. U sustavima gdje kompresor radi s konstantnim brojem okretaja dolazi do cikličkih gubitaka. Dva su glavna razloga cikličkih gubitaka; gubici starta u koje spada dodatan utrošak energije na kompresoru prilikom njegovog pokretanja i rebalans tlakova radne tvari unutar rashladnog kruga. Drugi su gubici povezani s potrošnjom pomoćnih komponenti sustava kada je dizalica topline uključena, a kompresor

ne radi. Također, prije svakog pokretanja uključuju se cirkulacijske pumpe na određeno, konstantno vrijeme. Što je više ciklusa to su veći povezani ciklički gubici [33]. Analiza cikličkih gubitaka provodi se pomoću dva indikatora; omjera djelomičnog opterećenja, poznatog kao omjer kapaciteta u normi EN 14825 [34] (CR ili PLR), i faktora djelomičnog opterećenja (PLF). CR je omjer između toplinskih gubitaka objekta $Q_{h,nd}$ i nazivnog kapaciteta dizalica topline (ϕ_N) koji se računa iz polinoma dobivenog mjerenjima, jednačba (9) i (10). S druge strane, PLF je definiran kao omjer faktora grijanja u cikličkim uvjetima i njegove nominalne vrijednosti.

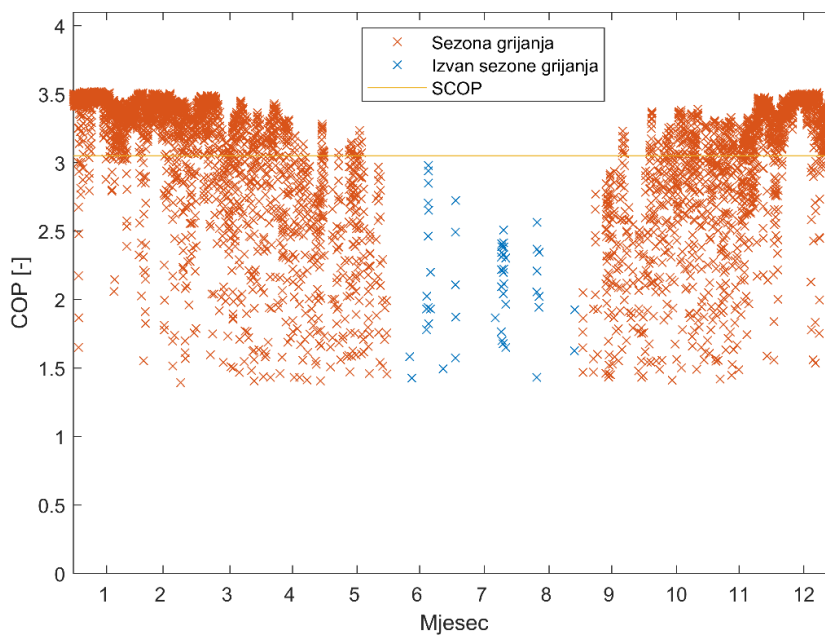
Ova dva faktora povezana su u normi EN 14825 bezdimenzijskim koeficijentima prema jednačbi (11);

$$\phi_N = 0,2664T_{tlo} + 11,8047 \quad (9)$$

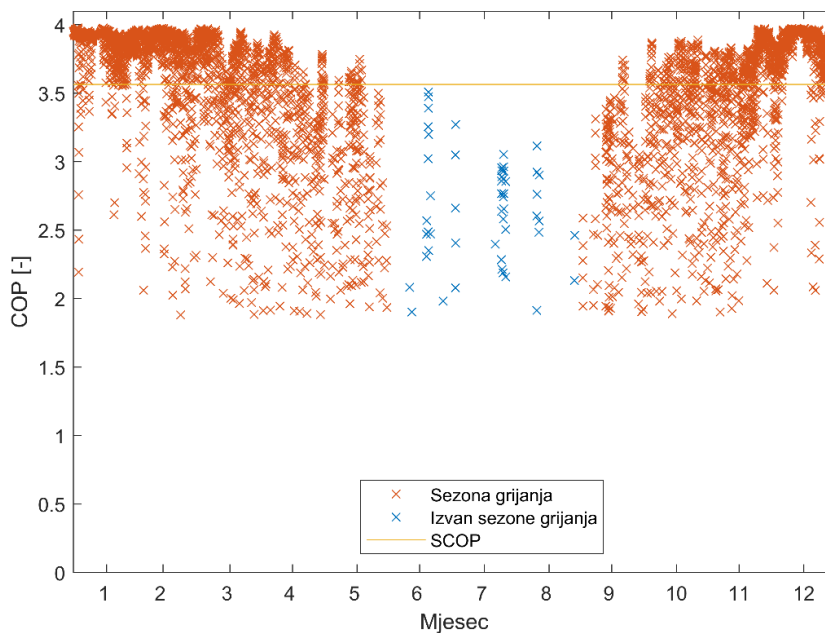
$$CR = \frac{Q_{h,nd}}{\phi_N \cdot 1h} \quad (10)$$

$$COP_{PL,on/off} = COP_{1,on/off} \cdot PLF = COP_{1,on/off} \cdot \frac{CR}{C_c \cdot CR + (1 - C_c)} \quad (11)$$

gdje je $COP_{PL,on/off}$ faktor grijanja s uračunatim cikličkim gubiticima, a C_c koeficijent narušavanja procesa koji je konstantan i iznosi 0,9. Za frekvencijski upravljani uređaj korekciju je potrebno provoditi samo onda kada je potreba za energijom manja od najmanjeg učina koji dizalica topline može dati za zadane uvijete. Minimalni učin ovisan je o minimalnoj dopuštenoj frekvenciji koja je u ovome radu postavljena na 35 Hz. Izračunati satni faktori grijanja korigirani su cikličkim gubiticima i prikazani na slikama 22 i 23 Izračunati su i sezonski faktor grijanja kao srednja vrijednost korigiranih satnih faktora grijanja.



Slika 22: Godišnje simulirane vrijednosti korigiranog COP-a bez frekvencijskom regulacijom



Slika 23: Godišnje simulirane vrijednosti korigiranog COP-a s frekvencijskom regulacijom

Satni toplinski gubitci se dijele s odgovarajućim faktorom grijanja kako bi se dobila potrošnja električne energije. Modelirani sustav bez napredne regulacije godišnje potroši 9584 kWh električne energije sa sezonskim faktorom grijanja (SCOP) 3,05, a sustav s naprednom regulacijom 8053 kWh uz sezonski faktor grijanja 3,56. Razlika u potrošenoj električnoj energiji je 15.97% na godišnjoj razini.

Ta bi ušteda mogla biti i veća kada ne bi dolazilo do pojave rezonancije pri manjim frekvencijama, odnosno broju okretaja kompresora. Izračunata ušteda električne energije s promjenom intervala dozvoljenih frekvencija u usporedbi s osnovnim slučajem (OS) sustava bez regulacije prikazana je u tablici 2.

Tablica 2: Utjecaj promjene frekvencije na uštedu sustava

Frekvencija [Hz]	30	35	40	OS
COP [–]	3,652	3,564	3,477	3,051
Potrošena energija [kWh]	7804	8053	8314	9585
Razlika energija [%]	18,6	16,0	13,3	–
Jednotarifni model [kn]	3854	3977	4106	4733
Dvotarifni model [kn]	3022	3126	3233	3738
Usteda (dvotarifna) [kn]	715,8	612,4	504,7	–
Usteda (dvotarifna) [%]	19,2	16,4	13,5	–

U izračun su ubačene cijene električne energije prema cjeniku HEP-a [35] i to dva modela:

- Jednotarifni s fiksnom cijenom električne energije od 0,4938 kn/kWh;
- Dvotarifni model prema kojem se mijenjaju viša, 0,52602 kn/kWh, i niža, 0,25764 kn/kWh tarifa ovisno o dobu dana. Za 2020. godinu od 29. ožujka do 25. listopada vrijedi ljetno računanje vremena. Viša tarifa je na snazi od 8 do 22 sata. Ostatak godine pripada zimskom računanju vremena prema kojem je viša tarifa u periodu od 7 do 21 sat.

Analizom je utvrđeno da dvotarifni model daje niže cijene struje potrebne za pogon dizalice topline. Cijenom od otprilike 4000 kn frekvencijski bi se pretvarač isplatio nakon 6.5 godina.

7 | Rasprava

U sklopu ovog rada praćen je rad dizalice topline prije i nakon ugradnje frekvencijskog pretvarača. Mjereni podaci analizirali su kako bi se pokazale prednosti ugradnje frekvencijskog pretvarača te prednosti pravilnog odabira parametara procesa.

Ugradnjom frekvencijske regulacije dolazi do nekoliko poboljšanja u procesu. Kao prvo frekvencijski pretvarač omogućava start s djelomičnim opterećenjem što ublažava naprezanja uzrokovana zakretnom momentom i produžuje životni vijek sustava [30] što dokazuje slika 17. Ista slika pokazuje da se ugradnjom frekvencijske regulacije produžuje vrijeme rada kompresora kod pojedinog ciklusa što dovodi do manjeg broja uključivanja kompresora. Izračunate vrijednosti COP-a pokazuju da se ugradnjom frekvencijskog pretvarača poboljšava iskoristivost procesa za otprilike 6% što je bilo i za očekivati promatrajući ostala istraživanja [7, 14, 15]. Usporedbom iz literature dalo se naslutiti da bi povećanje COP-a moglo biti i veće, ali zbog velikog kapaciteta kompresora i pojave rezonance kod niskih brzina okretaja (niska frekvencija) kompresora frekvencijski pretvarač nije dao veće uštede.

Mjerenjem s različitom temperaturnom histerezoj spremnika htjelo se naglasiti važnost odabira dobrih parametara procesa. Povećanjem histereze spremnika mjereni rezultati pokazali su povećanje COP-a. Jednak trend vrijedi u slučaju korištenja frekvencijske regulacije i standardnom regulacijom procesa kao što je prikazano na slici 19. Povećanje histereze mora se odraditi pažljivo da ne bi došlo do smanjenja toplinske ugodnosti u kondicioniranim prostorijama. Naime, povećanjem histereze snizuje se temperatura polaza prema ventilokonvektorima kada dizalica topline ne radi što bi moglo dovesti do nemogućnosti savladavanja toplinskog opterećenja prostorije u danom trenutku. Bitno je dobro odabrati histerezu spremnika kako bi sve komponente sustava grijanja/hlađenja radile u optimalnim radnim uvjetima. Također vidi se iz grafa na slici 15 da se korištenjem većih histereza spremnika smanjuje broj ciklusa uključivanja i isključivanja kompresora čime se osigurava dugotrajnost opreme. Time se dokazalo da se postojeći sustavi mogu unaprijediti boljim vođenjem i pravilnijim odabirom parametara procesa, ali potrebno je dobro optimizirati sve parametre sustava kako bi cjelokupni sustav radio pravilno. Naime, iako su veće histereze bolje sa strane potrošnje energije prvenstvena zadaća bilo kojeg HVAC sustava je održavanje toplinske ugodnosti. Ugradnja frekvencijskog pretvarača moguća je na većini postojećih sustava dizalice topline (slika (10)) koje trenutno koriste „on-off“ regulaciju. Kod ugradnje frekvencijskog pretvarača i puštanja u sustava dizalice topline u pogon potrebno

je dobro pripaziti na odabir minimalne frekvencije na kojoj radi kompresor. Naime moguća je pojava rezonance na nižim frekvencijama te može doći do kvara kompresora, a i do kvara ostalih komponenata sustava. Prva provedena mjerenja nakon ugradnje frekvencijskog pretvarača idu u prilog navedenoj tvrdnji. Naime, mjerenja su odrađena s postavljenom minimalnom frekvencijom od 30 Hz te su ta mjerenja pokazala odlične rezultate, ali se nakon nekoliko ciklusa uključivanja i isključivanja kompresora pokazalo da kompresor ulazi u rezonancu te je postojala mogućnost kvara sustava. Također je potrebno naglasiti i problem vezan uz ulje. Pri niskim brzinama vrtnje kompresora, ulje koje osigurava brtvljenje ne doseže na sva mjesta koje brtvi. Stoga smanjenje brzine vrtnje kompresora može dovesti do povratak radne tvari u usis uslijed čega dolazi do naglog smanjenja volumetrijske učinkovitosti [10]. Iako, teorija i mjereni rezultati pokazuju da bi se danjim smanjenjem frekvencije dobio još efikasniji proces, ali u praksi pojava rezonance i problemi vezani uz brtvljenje limitiraju povećanje efikasnosti sustava dizalice topline smanjenjem broja okretaja kompresora.

Kvazistacionarnim proračunom i ekonomskom analizom pokazalo se da je period povrata ovakve investicija relativno visok (6.5 godina). S druge strane brojna poboljšanja koja omogućuje ugradnja frekvencijskog pretvarača (uključivanje kompresora u pogon u djelomičnom opterećenju, produljenje ciklusa rada) pokazuju da se njegovom ugradnjom može produžiti životni vijek kompresora te unaprijediti proces (viša temperatura isparavanja).

8 | Zaključak

Provedena mjerenja napravljena su s ciljem ispitivanja utjecaja frekvencijskog pretvarača na efikasnost dizalice topline. Prvo su provedena mjerenja s postojećom „on-off“ regulacijom te različitom histerezoz spremnika. Navedena mjerenja pokazala su da se povećanjem histereze spremnika smanjuje broj radnih ciklusa kompresora te se produžuje njihovo trajanje. Sukladno tome izračunate vrijednosti COP-a dale su veće vrijednost za veće histereze. Time se htjelo naglasiti važno odabira pravilnih parametara rada.

Ponovno provedena mjerenja nakon ugradnje frekvencijske regulacije pokazala su da se ugradnjom frekvencijske regulacije omogućuje pokretanje kompresora u djelomičnom opterećenju te produljenje trajanja pojedinog ciklusa uključivanja/isključivanja čime mu se produljuje radni vijek. Srednja temperatura isparavanja također raste ugradnjom frekvencijskog pretvarača čime se poboljšava termodinamička kvaliteta procesa. Također je pokazano da ugradnjom frekvencijskog pretvarača dolazi do povećanja vrijednosti COP-a u iznosu od oko 6%.

Kvazistacionarnom simulacijom proširile su se dobivene vrijednosti COP-a na cijelu godinu. Izračunate vrijednosti COP-a za pojedini ciklus uključivanja/isključivanja kompresora stavljene su u funkcijsku vezu s temperaturom tla koja ovisi o temperaturi vanjskog zraka. Za svaki sat u godini izračunat je COP. Dobivene vrijednosti COP-a podijeljene su s toplinskim opterećenjem prostorije u svakom satu u godini kako bi se dobila potrošnja energije. Nakon toga vrijednosti COP-a za svaki sat umanjene su za cikličke gubitke koji nastaju uslijed povećane potrošnje energije prilikom pokretanja kompresora i postizanja radnih tlakova. Drugi uzrok cikličkih gubitaka je potrošnja pomoćnih komponenti poput cirkulacijskih pumpi i sustava regulacije koji su uključeni i kada kompresor ne radi. Pomoću tako dobivenih vrijednosti COP-a napravljena je analiza koja je pokazala da se ugradnjom frekvencijskog pretvarača u sustav dizalice topline može uštedjeti 16% energije na godišnjoj razini.

Mogućnosti uštede ugradnjom frekvencijskog pretvarača su moguće. Posebnu pozornost potrebno je obratiti na postavne parametre frekvencijskog pretvarača (izbjeći rezonancu) te mogućnost poboljšanja procesa boljim odabirom parametara procesa.

9 | Zahvale

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Vladimiru Soldi na pruženoj prilici, savjetima, motivaciji i pomoći prilikom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem dr. sc. Luki Bobanu na pruženoj pomoći tijekom pisanja rada i uvijek korisnim savjetima.

Veliko hvala i kolegi Dini Mišeu koji je odvojio svoje vrijeme tijekom ljeta i pružio mi neizmjernu pomoć u izradi ovog rada.

Hvala i poduzeću FrigoPlusu d.o.o. na pruženoj opremi te njihovim zaposlenicima na korisnim savjetima vezanim uz korištenu opremu.

Stjepan Herceg

Literatura

- [1] V. Soldo, "Skripta iz kolegija Dizalice topline s OIE," tech. rep., 2020.
- [2] M. Kassai, L. Kajtar, and J. Nyers, "Experimental optimization of energy consumption for direct current refrigerator by PID controller tuning and comparison with ON/OFF refrigerator," *Thermal Science*, vol. 23, no. 2 Part B, pp. 941–952, 2019.
- [3] "Climate strategies & targets," Europska komisija, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en.
- [4] "Zgrade gotovo nulte energije nZEB," Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne Imovine; <https://mgipu.gov.hr/o-ministarstvu-15/djelokrug/energetska-ucinkovitost-u-zgradarstvu/zgrade-gotovo-nulte-energije-nzeb/10504>.
- [5] "EUR-Lex - 32009L0028 - EN - EUR-Lex," Europska komisija; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0028>.
- [6] I. Sarbu and C. Sebarchievici, "General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings," 2014.
- [7] C. K. Lee, "Dynamic performance of ground-source heat pumps fitted with frequency inverters for part-load control," *Applied Energy*, vol. 87, no. 11, pp. 3507–3513, 2010.
- [8] G. Bagarella, R. Lazzarin, and M. Noro, "Sizing strategy of on-off and modulating heat pump systems based on annual energy analysis," *International Journal of Refrigeration*, vol. 65, pp. 183–193, 2016.
- [9] R. M. Lazzarin, "Condensing boilers in buildings and plants refurbishment," *Energy and Buildings*, 2012.
- [10] G. Bagarella, R. M. Lazzarin, and B. Lamanna, "Cycling losses in refrigeration equipment: An experimental evaluation," *International Journal of Refrigeration*, 2013.
- [11] C. Aprea, R. Mastrullo, and C. Renno, "Experimental analysis of the scroll compressor performances varying its speed," *Applied Thermal Engineering*, 2006.

- [12] S. Shao, W. Shi, X. Li, and H. Chen, "Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data," *International Journal of Refrigeration*, 2004.
- [13] L. Zhao, L. L. Zhao, Q. Zhang, and G. L. Ding, "Theoretical and basic experimental analysis on load adjustment of geothermal heat pump systems," *Energy Conversion and Management*, 2003.
- [14] R. S. Adhikari, N. Aste, M. Manfren, and D. Marini, "Energy savings through variable speed compressor heat pump systems," in *Energy Procedia*, 2012.
- [15] H. Cheung and J. E. Braun, "Performance comparisons for variable-speed ductless and single-speed ducted residential heat pumps," *International Journal of Refrigeration*, 2014.
- [16] H. Madani, J. Claesson, and P. Lundqvist, "Capacity control in ground source heat pump systems: Part I: Modeling and simulation," *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, no. 6, pp. 1338–1347, 2011.
- [17] L. Junghans, "Evaluation of the economic and environmental feasibility of heat pump systems in residential buildings, with varying qualities of the building envelope," *Renewable Energy*, 2015.
- [18] A. Hesaraki, A. Halilovic, and S. Holmberg, "Low-temperature heat emission combined with seasonal thermal storage and heat pump," *Solar Energy*, 2015.
- [19] K. Huchtemann and D. Müller, "Simulation study on supply temperature optimization in domestic heat pump systems," *Building and Environment*, 2013.
- [20] L. Boban, *Eksperimentalno i teorijsko istraživanje geotermalne dizalice topline*. PhD thesis, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [21] A. Singh Gaur, D. Z. Fitiwi, and J. Curtis, "Heat Pumps and Their Role in Decarbonising Heating Sector: A Comprehensive Review," no. 627, 2019.
- [22] S. J. Self, B. V. Reddy, and M. A. Rosen, "Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options," *Applied Energy*, vol. 101, pp. 341–348, 2013.
- [23] A. Hepbasli, O. Akdemir, and E. Hancioglu, "Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 4, pp. 527–548, 2003.

- [24] K. J. Chua, S. K. Chou, and W. M. Yang, "Advances in heat pump systems: A review," *Applied Energy*, vol. 87, no. 12, pp. 3611–3624, 2010.
- [25] K. Harby, "Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, no. February, pp. 1247–1264, 2017.
- [26] E. H. Mathews, D. C. Arndt, C. B. Piani, and E. Van Heerden, "Developing cost efficient control strategies to ensure optimal energy use and sufficient indoor comfort," *Applied Energy*, 2000.
- [27] M. S. H. Talukder, "HVAC Controls Course Content of HVAC systems," *Consulting-Specifying Engineer*, no. 2, pp. 1–67, 2013.
- [28] L. O. Buzelin, S. C. Amico, J. V. Vargas, and J. A. Parise, "Experimental development of an intelligent refrigeration system," *International Journal of Refrigeration*, 2005.
- [29] J. M. Corberan, "New trends and developments in ground-source heat pumps," *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, pp. 359–385, 2016.
- [30] M. Andrassy, *Stapni kompresori*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 2004.
- [31] I. Sarbu and C. Sebarchievici, "Solar-assisted heat pump systems Heat pump systems for sustainable heating and cooling View project Numerical modelling and optimisation of water supply systems View project SOLAR-ASSISTED HEAT PUMP SYSTEMS," *researchgate.net*, pp. 347–410, jan 2016.
- [32] D. Lončar, D. Dović, and I. Horvat, "Algoritam za određivanje energetskih zahtjeva i učinkovitost termotehničkih sustava u zgradama (Sustavi kogeneracije, sustavi daljinskog grijanja, fotonaponski sustavi)," 2017.
- [33] J. García-Céspedes, G. Arnó, I. Herms, and J. J. de Felipe, "Characterisation of efficiency losses in ground source heat pump systems equipped with a double parallel stage: A case study," *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 2761–2773, 2020.
- [34] T. Climatiseurs, "EN 14825:2018 Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling. Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance," 2018.
- [35] Hrvatska elektroprivreda (HEP), "Cjenik električne energije za kupce kategorije kućanstvo," 2020.

10 | Sažetak

Povećanjem efikasnosti sustava dizalica topline moguće su znatne uštede električne energije. Uštede su značajne zbog velikog udjela HVAC tehnologija u ukupnoj potrošnji. Za postojeće je instalirane jedinice važno pitanje perioda povrata ulaganja ukoliko se odluči unaprijediti sustav. Dizalice topline većinu godine rade djelomičnim opterećenjem, pa je potrebno regulirati njihov učin. Upravo je u regulaciji najveći potencijal za poboljšanje efikasnosti sustava.

Starije dizalice topline učin reguliraju jednostavnim intermitentnim sustavom, dok se u novijim sve češće standardno javlja kompresor s naprednom mogućnošću kontinuirane promjene brzine vrtnje.

U ovom je istraživanju fokus na isplativosti prelaska na napredni način regulacije učina u postojećim sustavima ugradnjom frekvencijskog pretvarača. Provedeno je eksperimentalno istraživanje na geotermalnoj dizalici topline u sklopu FSB-a. Mjerili su se glavni parametri procesa s jednostavnom "on/off" regulacijom, koji su zatim uspoređeni s rezultatima istog sustava s ugrađenom naprednom regulacijom. Dobiveni rezultati pokazali su da napredna regulacija povećava faktor grijanja pojedinog ciklusa, trajnost sustava kao i period između dva paljenja. Sve to vodi većoj sezonskoj učinkovitosti sustava što je i dokazano provedenim kvazistacionarnim proračunom.

Ključne riječi: dizalica topline, on-off regulacija, promjenjiva brzina vrtnje, učinkovitost

11 | Summary

By increasing the efficiency of the heat pump system, significant energy savings are possible throughout the year. The savings are significant due to the large share of HVAC technologies in total energy consumption. If we want to upgrade the system, the issue of return on investment is very important. Heat pumps work part-time most of the year, so it is necessary to control their output. Older heat pumps regulate the performance with a simple intermittent "on-off" relay, while in newer ones, a compressor with an advanced possibility of continuous change in rotational speed is becoming standard.

In this research, the focus is on the cost-effectiveness of switching to an advanced control system of power regulation in existing systems by installing a frequency converter. Experiments were conducted on a geothermal heat pump within the FSB. The main process parameters with simple "on / off" relay control were measured, which were then compared with the results of the same system, but with the built-in advanced control.

The obtained results showed that advanced control increases the heating factor of a single cycle, the durability of the system as well as the period between two ignitions. All this leads to greater seasonal efficiency of the system, which is proven by the quasi-stationary calculation.

Keywords: heat pump, on-off regulation, variable speed, efficiency