

Mjerenje parametara rada i učinkovitosti dizalice topline s i bez frekvencijskog pretvarača

Šestan, Stipe

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:116041>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-01**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Stipe Šestan

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo, dipl. ing.

Student:
Stipe Šestan

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Vladimiru Soldi, koji mi je omogućio provedbu mjerenja, udijelio korisne savjete i znanje da bi ovaj rad bio uspješno napravljen.

Veliko hvala i doktorandu Dini Miše, na uloženom vremenu i trudu.

Posebno hvala mojoj obitelji koja je od prvog dana fakulteta moj najveći oslonac.

Za kraj se moram zahvaliti najboljim prijateljima koji su mi uljepšali svaki provedeni dan u dosadašnjem studentskom životu.

Stipe Šestan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Stipe Šestan** JMBAG: **0035221285**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje parametara rada i učinkovitosti dizalice topline s i bez frekvencijskog pretvarača**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Measurement of operating parameters and heat pump efficiency with and without frequency converter**

Opis zadatka:

Dizalice topline visoko su učinkovit sustav za korištenje obnovljive energije okoliša. Visoki porast broja jedinica pokretan inicijativama EU doveo je do velikih ulaganja u tehnologiju. Regulacija rada vrlo je važna za efikasnost dizalice topline. Tradicionalan način „on/off“ upravljanja podrazumijeva rad maksimalnim kapacitetom dok se ne postigne tražena vrijednost temperature spremnika sustava grijanja, a zatim se sustav gasi dok temperatura ne padne do zadane donje vrijednosti. Ovaj način rada karakteriziran je čestim paljenjem i gašenjem sustava što dovodi do smanjene učinkovitosti i većeg trošenja komponenti. Zato je sve češća upotreba frekvencijske regulacije promjenom broja okretaja elektromotora kompresora pomoću frekvencijskog pretvarača. Pri manjim toplinskim opterećenjima prostora smanjuje se kapacitet sustava, a time se produžuje vrijeme njegova rada što dovodi do manjeg broja paljenja i gašenja. U isto se vrijeme smanjuje razlika temperatura na izmjenjivačima i snaga kompresora.

U radu je potrebno ispitati utjecaj vrste upravljanja dizalice topline na njegovu efikasnost. Ispitivanje će se provoditi na geotermalnoj dizalici topline ugrađenoj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje za potrebe grijanja i hlađenja dviju računalnih učionica.

Rad treba sadržavati:

1. Pregled upravljanja intermitentnim „on/off“ načinom i frekvencijskim pretvaračem.
2. Analizu rezultata mjerenja dizalice topline u intermitentnom načinu rada.
3. Analizu rezultata mjerenja dizalice topline s promjenjivim brojem okretaja elektromotora.
4. Usporedbu rezultata dviju metoda.
5. Dispozicijski crtež dizalice topline.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
30. 11. 2021.	1. rok: 24. 2. 2022. 2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022. 3. rok: 22. 9. 2022.	1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022. 2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022. 3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.
Zadatak zadao:		Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo		Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	3
POPIS OZNAKA.....	5
SAŽETAK	6
SUMMARY	7
1. GEOTERMALNA DIZALICA TOPLINE	8
1.1.Sustav geotermalne dizalice topline na FSB-u	9
1.2. Osnovne komponente geotermalne dizalice topline na FSB-u.....	11
1.2.1. Kompresor.....	11
1.2.2. Iparivač i kondenzator	12
1.2.3. Prigušni ventil	13
1.2.4. Mjerna oprema	14
1.2.5. Propan (R290).....	16
2. REGULACIJA RADA GEOTERMALNE DIZALICE TOPLINE NA FSB-U	17
2.1.Intermitirajuća („on/off“) regulacija	18
2.2. Frekvencijska regulacija	20
3. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA MJERENJA	25
3.1.„on/off“ regulacija	25
3.2. Frekvencijski upravljani uređaji.....	30
4. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA	34
PRILOZI	35

POPIS SLIKA

Slika 1. Vertikalna izvedba izmjenjivača [1].....	7
Slika 2. Horizontalna izvedba izmjenjivača [1].....	8
Slika 3. Pojednostavljena shema sustava geotermalne dizalice topline na FSB-u [4].....	8
Slika 4. Ventilokonvektori Sabiana [3].....	9
Slika 5. Spremnik vode Elbi [3].....	10
Slika 6. Poluhermetički stapni kompresor Dorin [2].....	11
Slika 7. Kompaktni pločasti izmjenjivač topline [3].....	12
Slika 8. Elektronički ekspanzijski ventil Carel E2V24 [2].....	13
Slika 9. Multimetri proizvođača Schneider i Schrack [2].....	14
Slika 10. Akvizicijski sustav Agilent 34970 A [2].....	15
Slika 11. Spremnik propana (R290).....	15
Slika 12. Regulacijska karakteristika inverterskog i „on-off“ načina upravljanja [1].....	17
Slika 13. Primjer „on-off“ regulacije.....	18
Slika 14. Dijagram prikaza rada uređaja s „on-off“ regulacijom.....	19
Slika 15. Primjer inverterske regulacije.....	20
Slika 16. Blok dijagram PID regulatora.....	21
Slika 17. Frekvencijski pretvarač ABB ACH580-01 [2].....	22
Slika 18. Promjena temperature na isparivaču s promjenom broja okretaja kompresora ($n_1 > n_2$) [1].....	23

Slika 19. Promjena temperature na kondenzatoru s promjenom broja okretaja kompresora ($n_1 > n_2$) [1].....	23
Slika 20. Paljenje geotermalne dizalice topline, $\Delta T=3\text{ }^\circ\text{C}$	24
Slika 21. Vrijednosti radne histereze za $\Delta T=6\text{ }^\circ\text{C}$	25
Slika 22. Ovisnost snage kompresora i učina kondenzatora s „on-off“ regulacijom, $\Delta T=3\text{ }^\circ\text{C}$	26
Slika 23. Kretanje temperature isparavanja pri „on-off“ regulaciji, $\Delta T=6\text{ }^\circ\text{C}$	27
Slika 24. Usporedba intervala paljenja u ovisnosti o histerezi, $\Delta T=3\text{ }^\circ\text{C}$, $6\text{ }^\circ\text{C}$	28
Slika 25. Usporedba ciklusa paljenja s i bez frekvencijskog pretvarača, $\Delta T=3\text{ }^\circ\text{C}$	29
Slika 26. Kretanje temperature isparavanja u sustavu s frekvencijskom regulacijom, $\Delta T=3\text{ }^\circ\text{C}$	30
Slika 27. Usporedba temperatura isparavanja s i bez frekvencijskog pretvarača, $\Delta T=3\text{ }^\circ\text{C}$...	31

POPIS OZNAKA

$e(t)$	-	Regulacijsko odstupanje
u_{PID}	-	Upravljački signal koji regulator šalje izvršnom uređaju
K_p, K_i, K_d	-	Konstante pridružene proporcionalnom, integracijskom i derivacijskom djelovanju
n	min^{-1}	Brzina vrtnje motora
f	Hz	Frekvencija
p	-	Broj pari polova motora
s	-	Klizanje motora
T_s	$^{\circ}C$	Temperatura spremnika
T	$^{\circ}C$	Temperatura isparavanja
ΔT	$^{\circ}C$	Razlika između gornje i donje granice temperature spremnika
P_k	kW	Snaga kompresora
Φ_k	kW	Toplinski tok predan na kondenzatoru
t	s	Vrijeme

KRATICE

BIT	Bušotinski izmjenjivač topline
COP	Faktor grijanja (eng. <i>Coefficient Of Performance</i>)
EEV	Elektronički ekspanzijski ventil (eng. <i>Electronic Expansion Valve</i>)
GWP	Potencijal globalnog zagrijavanja (eng. <i>Global Warming Potential</i>)
ODP	Potencijal razgradnje ozona (eng. <i>Ozone Depletion Potential</i>)
PID	Proporcionalno-integralno-derivativni regulator

SAŽETAK

U posljednje vrijeme dizalice topline postižu sve veći napredak i sve više zauzimaju tržište. Do toga su dovele njihova visoka učinkovitost i ekološka prihvatljivost u vremenima visoke potrošnje i rasta cijene električne energije. Značajan udio u njihovoj visokoj učinkovitosti ima regulacija rada kompresora. U ovome radu ispitat će se dva načina regulacije od kojih je jedan primitivan, a drugi napredan. Provedeno je ispitivanje radnih parametara geotermalne dizalice topline s bušotinskim izmjenjivačem topline. Dizalica topline radila je u režimu grijanja. Prvi dio mjerenja proveden je za oblik najjednostavnije „on/off“ regulacije. Izmjereni su rezultati analizirani i grafički prikazani. Drugi dio mjerenja proveden je za oblik naprednije regulacije s ugrađenim frekvencijskim pretvaračem. Izmjereni su rezultati također analizirani i uz to uspoređeni s „on/off“ načinom regulacije.

Ključne riječi: Regulacija rada kompresora; Energetska učinkovitost u režimu grijanja; Geotermalna dizalica topline.

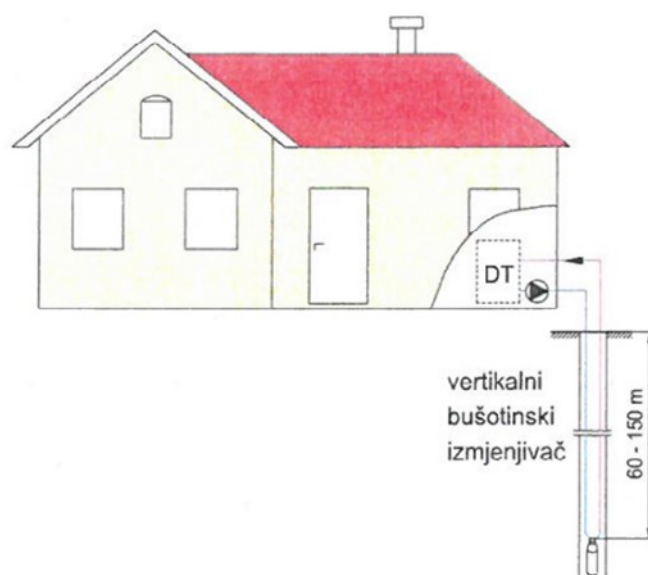
SUMMARY

Recently, heat pumps have been making more and more progress and are occupying more and more of the market. This was due to their high efficiency and environmental acceptability in times of high electricity consumption and rising electricity prices. A significant part in their high efficiency is played by the regulation of compressor operation. In this paper, two methods of regulation will be examined, one of which is primitive and the other which is advanced. Testing of the operating parameters of the geothermal heat pump with a borehole heat exchanger was carried out. The heat pump was operating in heating mode. The first part of the measurement was carried out for the form of the simplest "on/off" regulation. The measured results were analyzed and graphically presented. The second part of the measurement was carried out for a form of more advanced regulation with a built-in frequency converter. The measured results were also analyzed and compared with the "on/off" mode of regulation.

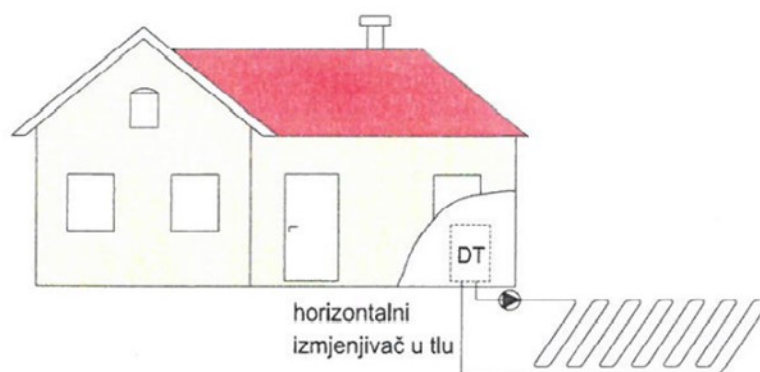
Key words: Compressor operation regulation; Energy efficiency in heating mode; Geothermal heat pump.

1. GEOTERMALNA DIZALICA TOPLINE

Geotermalne dizalice topline koriste tlo kao toplinski izvor. Tlo je iznimno veliki toplinski spremnik kojemu je glavna prednost relativno konstantna temperatura već na dubini od 2 m (od 8 do 14°C). Sustavi s tлом kao izvorom topline sve su korišteniji i dijele se na otvorene i zatvorene sustave. Najčešće izvedenice zatvorenog sustava su: horizontalna izvedba izmjenjivača i vertikalna izvedba izmjenjivača. Horizontalna izvedba izmjenjivača podrazumijeva polegnuti snop PE vodoravnih cijevi na dubini od 1,2 do 1,5 m ispod površine tla. Učink takvog izmjenjivača ovisi o vrsti i sastavu tla. Glavni problem izvedbe predstavlja potreba za velikom slobodnom površinom na koju se on postavlja. Vertikalna izvedba izmjenjivača podrazumijeva ulaganje izmjenjivača u bušotinu na dubinu od 60 do 200 m. Takva izvedba često je prihvatljiva u gusto naseljenim područjima, pogotovo na mjestima uređenog okoliša. Bušotinski izmjenjivač topline (BIT) polaže se u tlo u tri osnovne izvedbe: kao jednostruka U cijev, kao dvostruka U cijev te kao koaksijalna cijev [1]. Posredni medij, voda ili mješavina vode i glikola, struji kroz BIT koji je spojen na dizalicu topline i izmjenjuje toplinu sa zemljom. Glavni nedostatak ove izvedbe su troškovi bušenja tla.



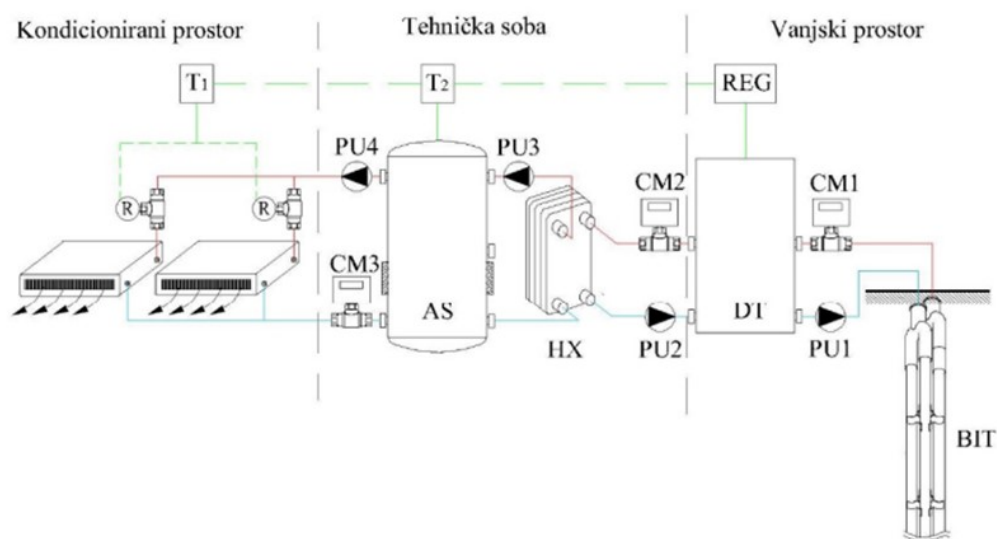
Slika 1. Vertikalna izvedba izmjenjivača [1]



Slika 2. Horizontalna izvedba izmjenjivača [1]

1.1. Sustav geotermalne dizalice topline na FSB-u

U južnoj zgradi Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu izvedena je geotermalna dizalica topline s izmjenjivačem u vertikalnoj bušotini dubine 130 m. Sustav dizalice topline podijeljen je na tri dijela (krug bušotinskog izmjenjivača topline, rashladni krug s radnom tvari i krug vode s ventilokonvektorima) i koristi se za cjelogodišnje grijanje i hlađenje učionica S7 i S8. Također, sustav je opremljen mjernim uređajima koji omogućuju zorno praćenje parametara procesa.



Slika 3. Pojednostavljena shema sustava geotermalne dizalice topline na FSB-u [4]

Razvod vode s ventilokonvektorima prolazi kroz dva prostora, kondicionirani prostor i tehničku sobu kao što je vidljivo na slici 3. Ventilokonvektori proizvođača Sabiana, model Carisma CRC 53, smješteni su po dva u obje učionice (kondicionirani prostor) i sadrže termostat za podešavanje željene temperature. U tehničkoj sobi nalaze se: spremnik vode od 300 l proizvođača Elbi, model Puffer P-300 Plus, pločasti međuzmjenjivač (HX), dvije pumpe (PU3 i PU4) te cjevovod i armatura za siguran rad sustava. Krug bušotinskog izmjenjivača i rashladni krug s radnom tvari smješteni su u vanjskom prostoru. Bušotinski izmjenjivač topline (BIT) proizvođača Pipelife izveden je u obliku dvostruke U cijevi od polietilena visoke gustoće (PEHD 100) i kroz njega struji glikolna smjesa, pogodna za zaštitu opreme od smrzavanja pri niskim temperaturama. Rashladni krug s propanom (R290) kao radnom tvari jest dizalica topline proizvođača Frigo Plus d.o.o., nazivnog učina grijanja 11,94kW i hlađenja 13,65 kW [2]. Osim njezinih glavnih komponenti koje će biti detaljno opisane u nastavku, potrebno je spomenuti još dodatni pločasti međuzmjenjivač koji služi za pothlađenje radne tvari na izlazu iz kondenzatora i pregrijanje radne tvari na ulazu u kompresor. Prebacivanje opisanog sustava iz režima grijanja u režim hlađenja i obrnuto izvedeno je pomoću troputnih ventila.



Slika 4. Ventilokonvektori Sabiana [3]



Slika 5. Spremnik vode Elbi [3]

1.2. Osnovne komponente geotermalne dizalice topline na FSB-u

1.2.1. Kompresor

Kompresor u dizalicama topline služi za usisavanje radne tvari u parovitom agregatnom stanju pri nižem tlaku i temperaturi i dizanje odnosno kompresiju na viši tlak i temperaturu. Drugim riječima on podiže radni medij s niže na višu energetska razinu. Postoje različite izvedbe kompresora, a one koje se danas najviše koriste u dizalicama topline su: stapni, lamelni i spiralni za manje i srednje sustave te vijčani i centrifugalni za veće sustave.

Ispitna geotermalna dizalica topline koristi poluhermetički stapni kompresor proizvođača Dorin. Poluhermetička izvedba kućišta označava motor zajedno s kompresorom u zajedničkom kućištu, ali s posjedovanjem servisnog otvora. Stapni kompresor svoj učinak ostvaruje periodičkim povećavanjem i smanjivanjem radnog prostora pomoću oscilirajućeg stapa koji se linearno giba u cilindru naizmjenice u jednom pa u drugom smjeru [6]. Veliki nedostatak stapnog kompresora su samoradni ventili koji su najopterećeniji dijelovi kompresora jer

njihova konstrukcija povećava štetni prostor koji je uzrok volumetrijskih gubitaka. Do učinaka od 350 kW učinkovitost mu je bolja u odnosu na vijčane kompresore [1].



Slika 6. Poluhermetički stapni kompresor Dorin [2]

1.2.2. Isparivač i kondenzator

Isparivač i kondenzator pripadaju izmjenjivačima topline. Osnovna podjela izmjenjivača topline je na rekuperatore, regeneratore te direktne izmjenjivače.

Ispitna dizalica topline koristi pločaste kompaktne izmjenjivače topline kao isparivač i kondenzator. To su visoko učinkoviti rekuperativni (dvije struje fizički odvojene) izmjenjivači topline, malog volumena, sastoje se od ploča valovita lima, čije udubine služe za usmjeravanje tvari. Radna tvar isparava u svakom drugom međuprostoru (prvom, trećem, petom, itd.), a hladni medij ulazi u drugi četvrti, šesti itd. međuprostor [1]. Veličina i broj ploča ovise o potrebnom kapacitetu sustava dok ploče svojim oblikom povećavaju koeficijent prolaza topline. Prednost ovakve vrste izmjenjivača je u malenom unutarnjem volumenu što rezultira manjom masom radne tvari u sustavu. To je poželjno ako je radna tvar opasna i ima ograničenje u punjenju. Kao nedostatak treba izdvojiti vrlo teško čišćenje i osjetljivost na vanjske uvjete. Svako onečišćenje povećava toplinske otpore i smanjuje učinkovitost uređaja. Neki od uzroka onečišćenja mogu biti: taloženje, kristalizacija, korozija itd [5].



Slika 7. Kompaktni pločasti izmjenjivač topline [3]

1.2.3. Prigušni ventil

Prigušni ventili služe za doziranje i prigušivanje radne tvari s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja. Dizalice topline s halogeniranim ugljikovodicima kao radnim tvarima koriste iduće prigušne ventile: kapilare, termoekspanzijske ventile (TEV) i elektroničke ekspanzijske ventile (EEV) dok se za amonijačne sustave koriste ventili s plovkom [1].

Geotermalna dizalica topline na FSB-u koristi elektronički ekspanzijski ventil (EEV) proizvođača Carel, model E2V24. On regulira minimalno stabilno pregrijanje radne tvari na izlazu iz isparivača. To je bitno jer rezultira potpunim isparavanjem radne tvari u isparivaču što isključuje opciju pojave kapljica radne tvari koje dovode do kvara kompresora. Drugim riječima, ima veliku ulogu u zaštiti kompresora. EEV sastoji se od: osjetnika temperature pregrijanja radne tvari na izlazu iz isparivača, pretvarača tlaka spojenog na tlak radne tvari na izlazu iz isparivača, regulatora koji iz očitavanja temperature i tlaka određuje pregrijanje radne tvari te igličastog ventila na ulazu u isparivač. Regulator, na temelju očitavanja, otvara i zatvara

ventil kako bi popustio onoliko radne tvari koliko je dovoljno za održavanje željenog pregrijanja. Željeno pregrijanje radne tvari odabire korisnik na regulatoru [2].



Slika 8. Elektronički ekspanzijski ventil Carel E2V24 [2]

1.2.4. Mjerna oprema

Mjerna oprema postavlja se na sustav radi praćenja parametara procesa koje taj isti sustav obavlja. Sustav geotermalne dizalice topline na FSB-u sastoji se od mjerila toplinske i električne energije, osjetnika temperature K tipa na strani radne tvari i na strani toplinskih spremnika, optičkih kabela za mjerenje temperature u tlu, pretvarača tlaka na visokotlačnoj i niskotlačnoj strani. Mjereni podaci prikupljaju se i prenose do računala putem akvizicijskog sustava Agilent 34970 A s analogno-digitalnim pretvaračem.

- Mjerila toplinske energije

Mjerila toplinske energije (kalorimetri) su uređaji koji služe za mjerenje toplinske energije koju je na sebe primio ili predao fluid (nosilac topline). Mjereni sustav koristi mjerilo toplinske energije proizvođača Landis+Gyr. Karakteristično za njega jest korištenje ultrazvučnog mjerila protoka i Pt500 sonde za mjerenje temperature [2].

- Mjerila električne energije

Mjeri se električna snaga odnosno potrošnja energije (na kompresoru, na pumpama, ...) putem digitalnih multimetara. Ispitni sustav koristi multimetre proizvođača Schneider i Schrack.

- Mjerila tlaka

Mjerenje tlaka provodi se s pretvaračima tlaka. To su uređaji koji pretvaraju izmjereni tlak u mehanički ili električni signal. Ispitni sustav sadrži dva pretvarača tlaka.



Slika 9. Multimetre proizvođača Schneider i Schrack [2]



Slika 10. Akvizicijski sustav Agilent 34970 A [2]

1.2.5. Propan (R290)

Propan je jedan od pionira među radnim tvarima koje su se koristile u mehaničkim rashladnim uređajima. Spada u skupinu ugljikovodika HC (C_3H_8) te ima dobra termofizikalna i ekološka svojstva. Pod dobrim ekološkim svojstvima mislimo na vrijednosti koeficijenta ODP (0) i GWP (3). Glavni nedostatak propana je njegova zapaljivost. Temperatura zapaljenja mu iznosi 470°C , a zapaljiv je ako je njegova koncentracija u zraku između donje i gornje granice zapaljivosti 1,7 i 10,9 vol %. Također, spada u sigurnosnu grupu A3 zbog niske toksičnosti i visoke zapaljivosti [1]. Ograničenja u punjenju rashladnih uređaja i dizalica topline s radnom tvari R290 razlikuju se prema više kategorija. No, treba napomenuti da generalno dozvoljena masa punjenja prema normi HRN EN 378-1 iznosi 150 g za prostorije bilo kojeg volumena.



Slika 11. Spremnik propana (R290)

2. REGULACIJA RADA GEOTERMALNE DIZALICE TOPLINE NA FSB-U

Regulacija rada nekog ogrjevnog/rashladnog sustava važna je radi održavanja željene toplinske ugodnosti. Ako bi instalirali uređaj bez sustava regulacije, željene bi uvjete mogli postići samo u slučaju vršnog toplinskog opterećenja. S obzirom da znamo da se u stvarnosti toplinsko opterećenje neprestano mijenja, regulacija postaje neizostavan dio sustava. Treba napomenuti da je upravljanje takvim sustavom kompliciran i složen zadatak zbog broja komponenata koje su u međusobnoj interakciji. Drugim riječima, promjena jednog parametra često utječe na ponašanje nekoliko drugih.

Upravljačke elemente regulacije čine mikroprocesor-kontroler, frekvencijski upravljač i pretvarač tlaka. Regulacijske elemente rashladnih uređaja i dizalica topline čine termostat i presostat niskog tlaka, dok sigurnosne elemente čine presostat visokog tlaka, presostat niskog tlaka, diferencijalni presostat ulja i osjetnik temperature hladene vode [1].

- Termostat

Mjeri temperaturu i prosljeđuje informaciju radi održavanja temperature u traženim granicama. Također obnaša funkcije zaštite od pregrijavanja te zaštite od smrzavanja.

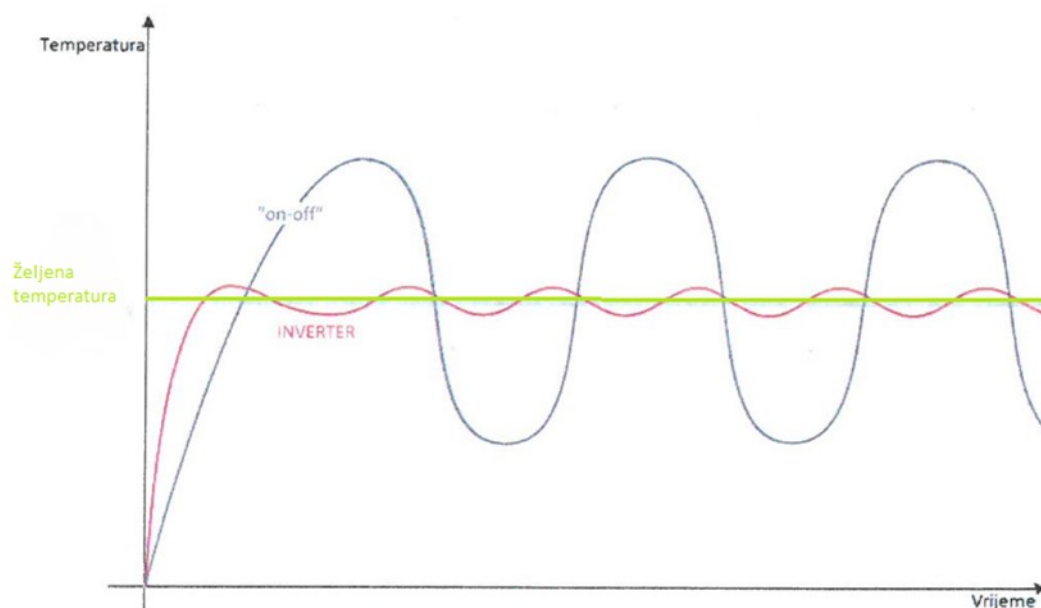
- Presostat visokog tlaka

Mjeri tlak radne tvari nakon kompresije i štiti kompresor od maksimalno dozvoljenog tlaka radne tvari koji bi oštetio sustav.

- Presostat niskog tlaka

Mjeri tlak radne tvari prije kompresije i isključuje kompresor kada taj tlak padne ispod minimalne zadane granice. Također, može umjesto termostata regulirati rad sustava.

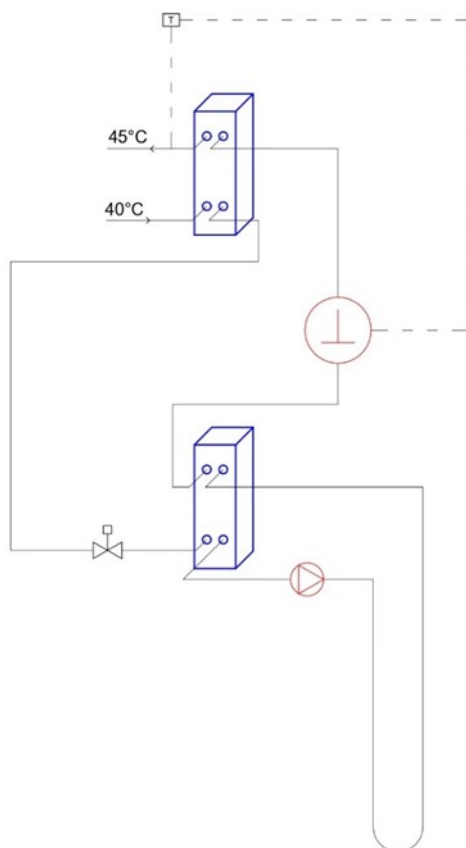
Postoji nekoliko mogućih metoda regulacije sustava dizalice topline. Geotermalna dizalica topline na FSB-u koristi dvije metode, intermitirajuću („*on-off*“) regulaciju i frekvencijsku regulaciju, koje će biti opisane u nastavku.



Slika 12. Regulacijska karakteristika inverterskog i „on-off“ načina upravljanja [1]

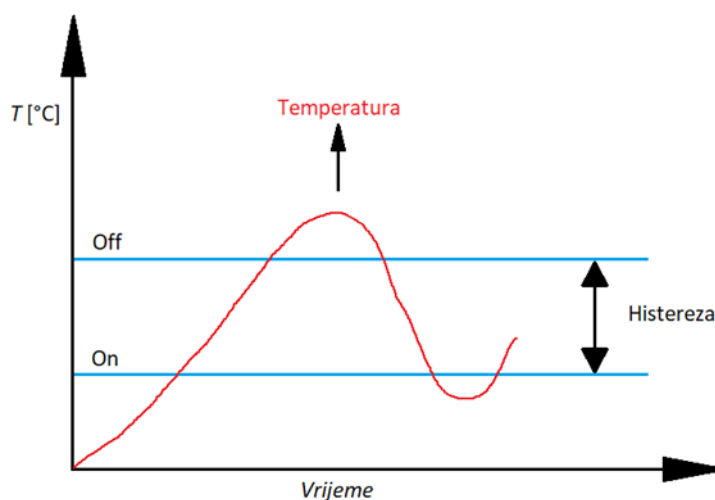
2.1. Intermitirajuća („on/off“) regulacija

Osnovni i najjednostavniji oblik regulacije sustava dizalice topline je „on/off“ regulacija. Najčešće se koristi na jednostavnijim i manjim rashladnim i klima uređajima, što i pokazuje činjenica da se većina takvih postojećih rashladnih sustava u svijetu još uvijek zasniva na ovom tradicionalnom diskontinuiranom obliku regulacije. Princip rada zasniva joj se na termostatu koji mjeri temperaturu hlađenog prostora (medija) i direktno isključuje kompresor iz rada kada je postignuta temperatura hlađenja. Također, termostat uključuje kompresor u rad, ako je temperatura hlađenog prostora (medija) postigla gornju graničnu vrijednost namještenu na termostatu [1]. Ovakav način regulacije je energetska neučinkovit, loš po pitanju kontrole temperature te upravljački ograničen. Ta energetska neučinkovitost proizlazi iz suviše potrošnje energije, pogotovo kod sustava kod kojih je prisutan veliki broj ciklusa uključivanja i isključivanja kompresora zbog znatnog variranja njihovog rashladnog opterećenja tijekom rada. Kao bitan nedostatak treba još istaknuti da kompresor kad god je uključen radi sa 100 % kapacitetom.



Slika 13. Primjer „on/off“ regulacije

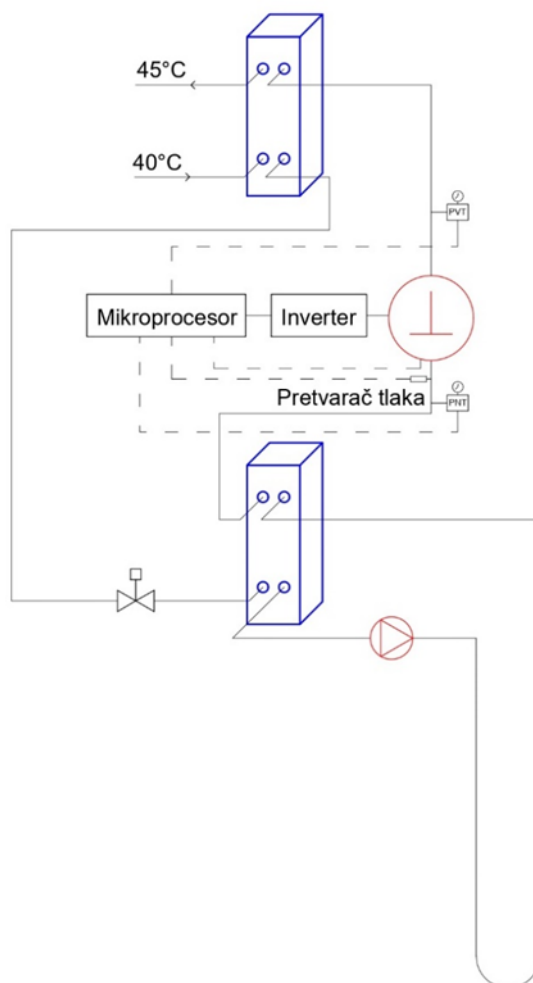
Za dizalicu topline koja radi u „on/off“ režimu rada karakteristično je da mora isporučivati toplinu na višim temperaturama što u režimu grijanja dovodi do rasta temperature kondenzacije i pada učinkovitosti. Jedno od oblika rješenja tog problema jest postavljanje kraćih intervala paljenja i gašenja kompresora, no to negativno djeluje na brzinu trošenja komponenti. Da bi riješili taj problem, moramo pronaći najbolju moguću temperaturnu histerezu sustava. Pod tim se podrazumijeva minimalno vrijeme između uključivanja (temperatura spremnika minimalna) i isključivanja (temperatura spremnika dostignuta) koje ne izaziva trošenje komponenti. Postavljena histereza je razlika između postavljenih temperatura pri kojima se kompresor uključuje ili isključuje. Naravno da u praksi uvijek postoje odstupanja pa je tako i u ovom slučaju. Događa se prelaženje temperature ispod i iznad zadanih granica zbog toplinske inercije prostora i postrojenja što je prikazano na slici 14. Razlika između tih vrijednosti naziva se radna histereza.



Slika 14. Dijagram prikaza rada uređaja s „on/off“ regulacijom

2.2. Frekvencijska regulacija

Frekvencijska regulacija za razliku od gore opisane „on/off“ regulacije daje znatno bolje rezultate regulacije rada rashladnog uređaja i dizalice topline. Ona predstavlja napredak u vođenju i regulaciji rada spomenutih uređaja što nam pokazuje i podatak da danas većina dizalica topline imaju mogućnost frekvencijske regulacije. Zadatak joj je frekvencijski regulirati broj okretaja motora kompresora te tako rad kompresora i učinak točnije prilagoditi zadanim uvjetima. Temperaturna su odstupanja mnogo manja nego kod „on/off“ regulacije pa je i udobnost primjene veća, a uz to je potrošnja električne energije 15 do 20% manja. Također, kompresor se ne pokreće svako malo nego radi u kontinuitetu što je velika prednost [1]. Da bi se ostvarila frekvencijska regulacija sustav mora sadržavati PID regulator i frekvencijski pretvarač.

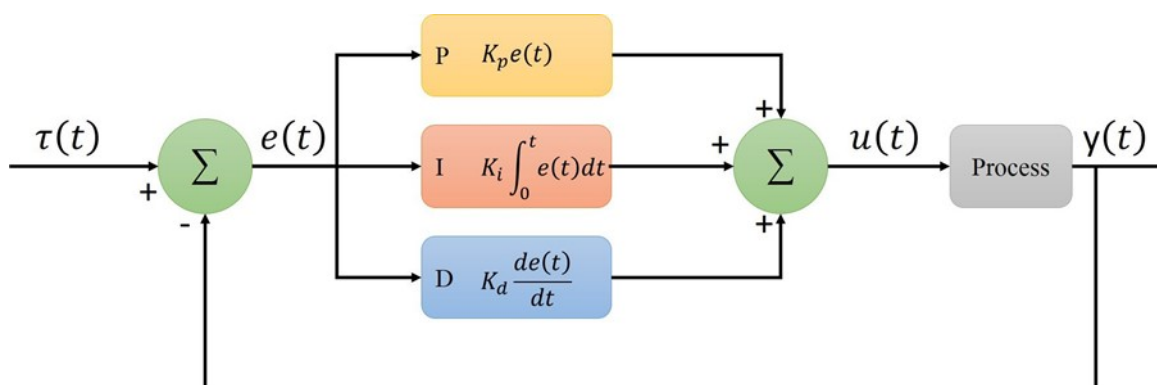


Slika 15. Primjer inverterske regulacije

Proporcionalno-integralno-derivatni (PID) regulator je mehanizam upravljačke petlje koji koristi povratnu informaciju. Široko se koristi u industrijskim upravljačkim sustavima i mnogim drugim aplikacijama koje zahtijevaju kontinuirano modulirano upravljanje. Regulator kontinuirano izračunava vrijednost pogreške kao razliku između zadane vrijednosti i izmjerene vrijednosti procesa [7]. Ta razlika naziva se regulacijsko odstupanje. Preko regulatora se regulacijski signal vremenski preoblikuje odnosno događa se proporcionalno, integralno i derivacijsko djelovanje. Proporcionalni član djeluje brzo, ali ne i učinkovito što se tiče otklanjanja regulacijskog odstupanja u većini slučajevima. Integralni član djeluje sporo ali učinkovito po pitanju otklanjanja regulacijskog odstupanja dok derivacijski član djeluje stabilizirajuće i ubrzava smanjenje regulacijskog odstupanja. Upravljački signal PID regulatora namijenjen izvršnom uređaju glasi:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

gdje $e(t)$ predstavlja regulacijsko odstupanje, a K_p, K_i, K_d konstante pridružene proporcionalnom, integracijskom i derivacijskom djelovanju.



Slika 16. Blok dijagram PID regulatora

Frekvencijski pretvarači su uređaji za kontinuiranu promjenu brzine vrtnje elektromotora. Oni danas čine središte reguliranog elektromotornog pogona jer između ostalog omogućuju: mjerenje varijabli, dijagnostiku, nadzor, upravljanje, zaštitu te regulaciju elektromotornog pogona. Princip rada polazi im od činjenice da je brzina vrtnje kaveznog asinkronog motora proporcionalna frekvenciji napona koji dovodimo na stezaljke motora, jednažba 2;

$$n = \frac{60 * f}{p} * (1 - s), \quad (2)$$

gdje je n - brzina vrtnje motora u min^{-1} , f - frekvencija napona u Hz, p - broj pari polova motora, a s - klizanje motora. Sastoje se od četiri veće cjeline: diodnog ispravljača, izmjenjivača, istosmjernog međukruga i upravljačkog dijela. Diodni ispravljač stvara istosmjerni napon od ulaznog izmjeničnog napona te nakon toga izmjenjivač, algoritmom pulsno-širinske modulacije, daje na izlazu trofazni izmjenični napon tražene frekvencije [8]. U slučaju da nema frekvencijskog pretvarača, asinkroni elektromotor bi stalno radio s istim brojem okretaja koji je određen frekvencijom napona mreže f .

U sustav geotermalne dizalice topline na FSB-u ugrađen je frekvencijski pretvarač ABB ACH580-01. Koristi se za dizalice topline nazivnog učina do 15 kW. Ulaznu trofaznu struju

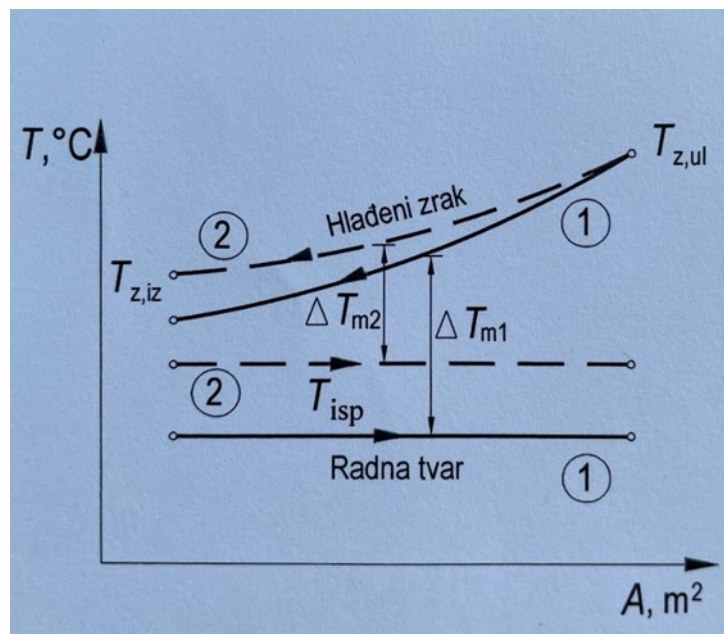
napona 380 do 480V i frekvencije 50/60 Hz pretvara u izlaz promjenjive frekvencije i napona u rasponu od 0 do ulaznog. Promjenom frekvencije regulira se broj okretaja standardnog asinkronog motora [2]. Raspon izlaznih frekvencija kreće se od 0 do 500 Hz, ali ispitni kompresor je ograničen na maksimalnu frekvenciju od 60 Hz.



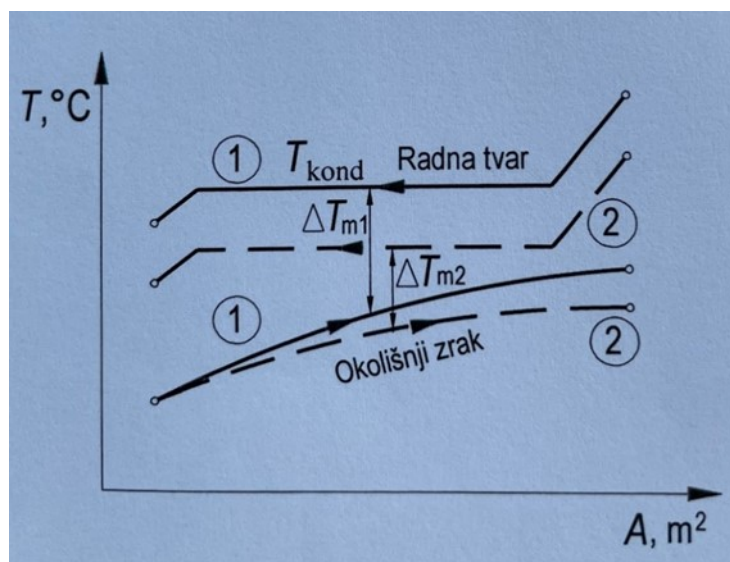
Slika 17. Frekvencijski pretvarač ABB ACH580-01 [2]

Nakon što su opisani osnovni principi i svojstva PID regulatora i frekvencijskog pretvarača, sad će se pojasniti princip rada frekvencijske regulacije.

Frekvencijski regulator kontrolira frekvenciju napajanja motora kompresora, koji pokreće protok rashladnog sredstva unutar sustava i određuje potrebni učinak grijanja. Većinu vremena sustav radi pod djelomičnim opterećenjem. Kad dođe do smanjenja toplinskog opterećenja sustava, smanjuje se frekvencija struje koja odlazi na kompresor te se samim tim smanjuje i protok radne tvari kroz sustav. To daje više vremena radnoj tvari da izmjeni toplinu na isparivaču i kondenzatoru sa sekundarnom tekućinom što dovodi do smanjenja srednje temperaturnih razlika između radne tvari i sekundarnih tekućina na izmjenjivačima topline. Također, smanjuje se razlika između temperatura i tlakova zasićenja na isparivaču i kondenzatoru [2]. To ima za posljedicu manji kompresijski omjer kompresora, manji utrošak električne energije te povećanje termodinamičke učinkovitosti procesa.



Slika 18. Promjena temperature na isparivaču s promjenom broja okretaja kompresora
($n_1 > n_2$) [1]



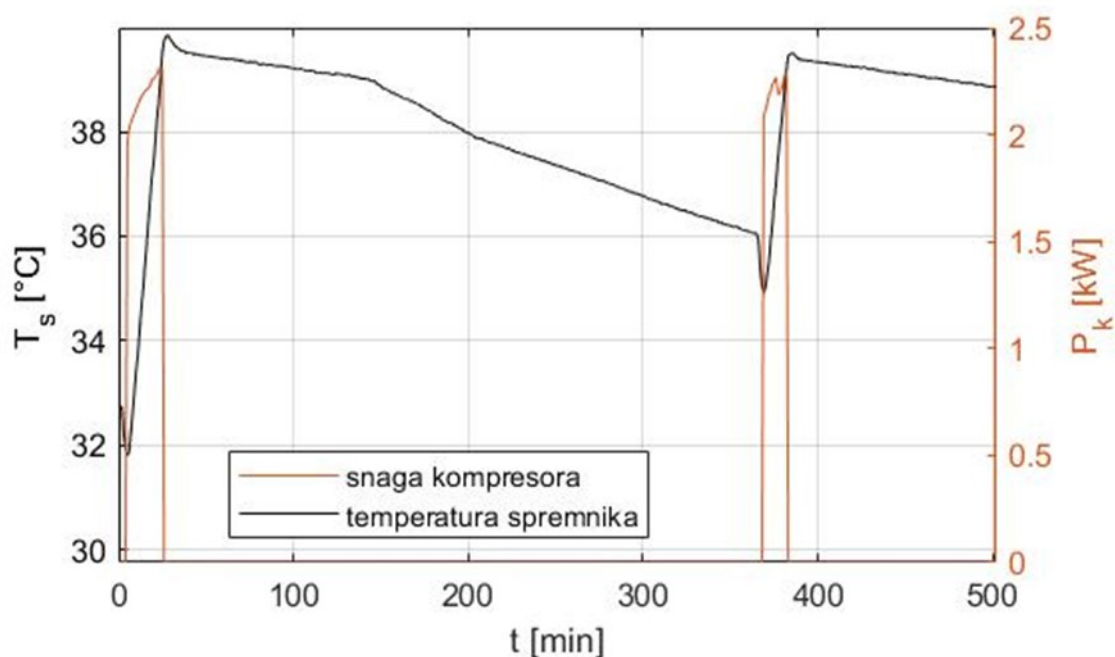
Slika 19. Promjena temperature na kondenzatoru s promjenom broja okretaja kompresora
($n_1 > n_2$) [1]

3. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA MJERENJA

U ovome poglavlju prikazat će se rezultati mjerenja parametara na geotermalnoj dizalici topline u režimu grijanja i njihova analiza. Analizirani su i uspoređeni rezultati mjerenja s „on/off“ regulacijom te frekvencijskom regulacijom. Mjerenja su provedena od siječnja do ožujka 2022. godine.

3.1. „on/off“ regulacija

Graf na slici 20. prikazuje puštanje sustava u rad.

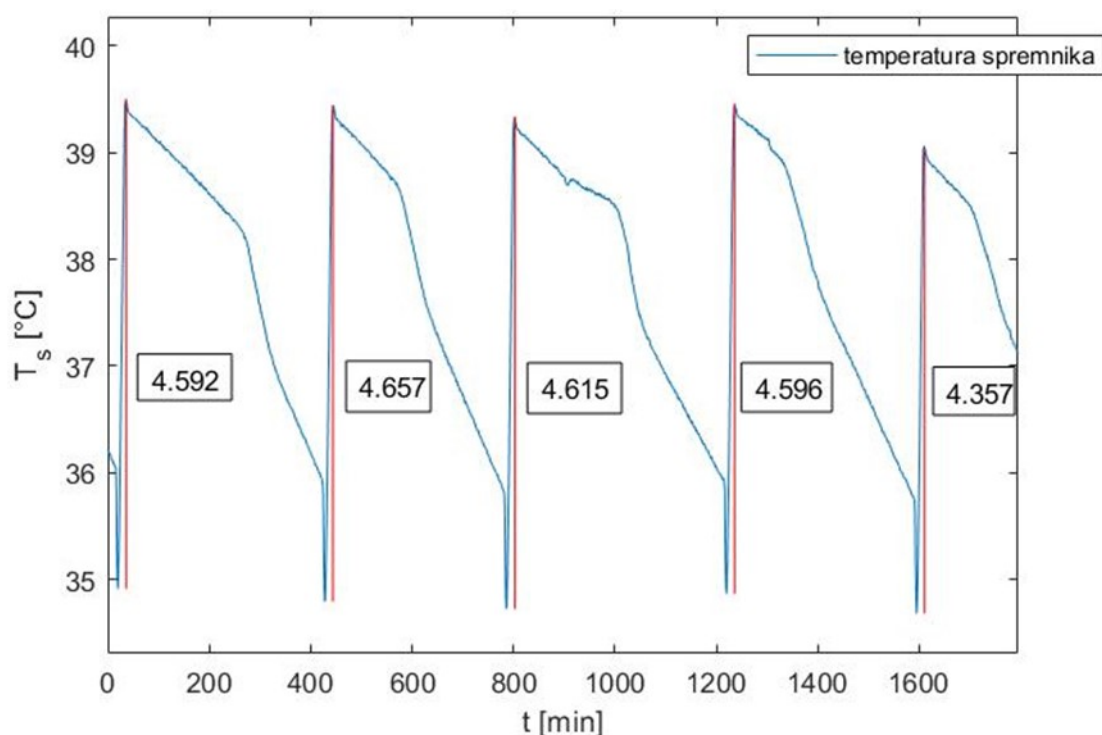


Slika 20. Paljenje geotermalne dizalice topline, $\Delta T=3$ °C

x os predstavlja vrijeme od trenutka paljenja uređaja (t), a y os prikazuje kretanje temperature spremnika (T_s) i snage kompresora (P_k). Temperatura spremnika je na početku ($t=0$) slična temperaturi prostorije u kojoj se spremnik nalazi. To nije začuđujuće jer izolacija spremnika usporava proces izmjene topline s okolišem, ali ga ne zaustavlja. Tako da prilikom dužeg

isključenja sustava temperatura spremnika i temperatura okoliša u kojem se on nalazi postaju približno jednake. Prilikom paljenja dizalice topline, sustav prima signal da temperatura spremnika nije u zadanim granicama. Razlika između tih zadanih granica naziva se histereza. Gornja granica temperature spremnika postavljena je na 40 °C, a mjerenja su provedena s temperaturnim histerezama od $\Delta T=3,6,9$ °C. To znači da su donje granice sukladno histerezama 37 °C, 34 °C i 31 °C. Trenutak paljenja kompresora predočen je naglim skokom narančaste linije što za posljedicu ima povećanje temperature spremnika. Kada temperatura spremnika dosegne gornju granicu, kompresor se isključuje. Također, kada temperatura spremnika dosegne donju granicu, kompresor se uključuje. Ventilokonvektori se pale u trenutku $t=144$ min i toplina se počinje intenzivnije otpuštati u prostor. Njihov zadatak je održavati traženu temperaturu u prostoriji koja se regulira akumuliranom toplinskom energijom iz spremnika. Ovisno o vanjskoj temperaturi, temperatura spremnika će brže ili sporije padati.

Slika 21. prikazuje vrijednosti radne histereze.

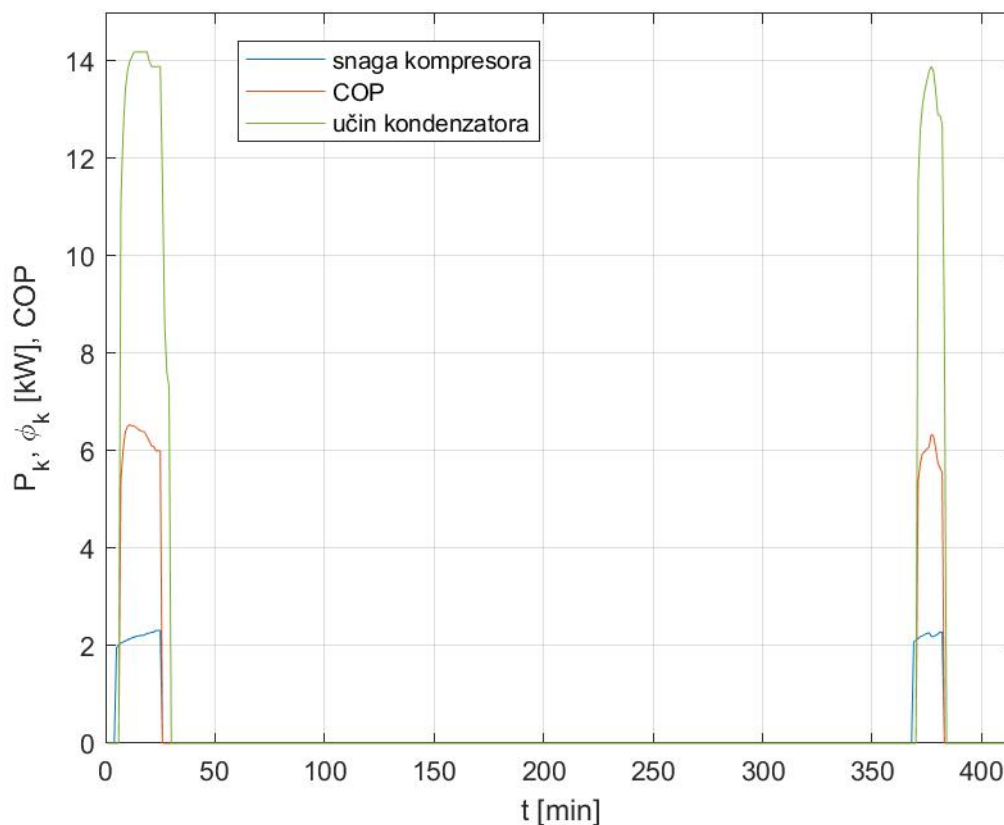


Slika 21. Vrijednosti radne histereze za $\Delta T=3$ °C

Očigledno je radna vrijednost histereze veća od postavljene. To se događa radi vremenskog odmaka pri pokretanju kompresora. Kad dizalica topline primi signal da je temperatura spremnika pala ispod donje zadane granice ona se pali. Međutim, prvo se pale pumpe zbog

postizanja optimalne temperature izmjenjivača topline na strani sekundarnog kruga pa tek onda kompresor. Tijekom tog procesa voda iz spremnika nastavlja se trošiti za grijanje i temperatura joj pada ispod postavljene.

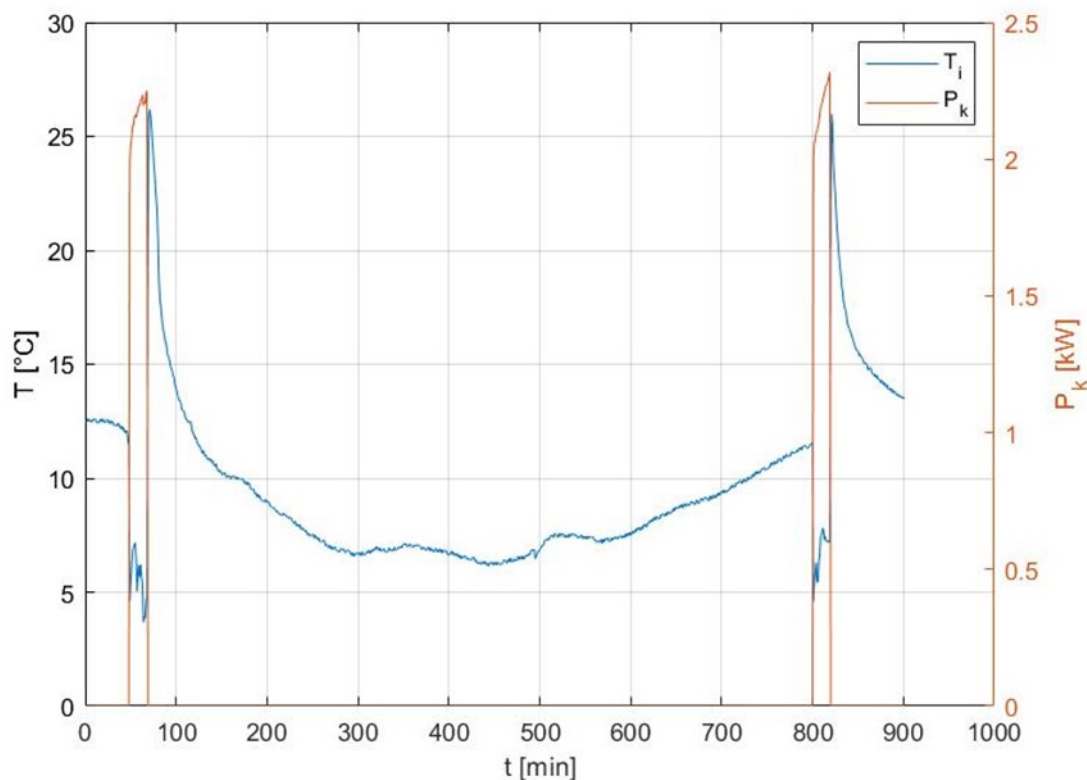
Grafički prikaz na slici 22. prikazuje ponašanje učina kondenzatora u ovisnosti o snazi kompresora tijekom dva ciklusa rada sustava.



Slika 22. Ovisnost snage kompresora i učina kondenzatora s „on-off“ regulacijom, $\Delta T=3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kao što je i ranije rečeno, prilikom „on/off“ regulacije kompresor počinje raditi punim kapacitetom. Sukladno tomu protok radne tvari je velik i jako puno toplinskog toka se otpušta na kondenzatoru. To dovodi i do velikog ogrjevnog faktora (COP-a). Kako temperatura kondenzacije proporcionalno raste s temperaturom spremnika, što se vidi i iz podataka o mjerenju, lagano raste i snaga kompresora, ali dolazi do pada učina na kondenzatoru. Porast snage kompresora i pad učina na kondenzatoru u kombinaciji dovode do smanjenja COP-a, što je vidljivo i na grafu.

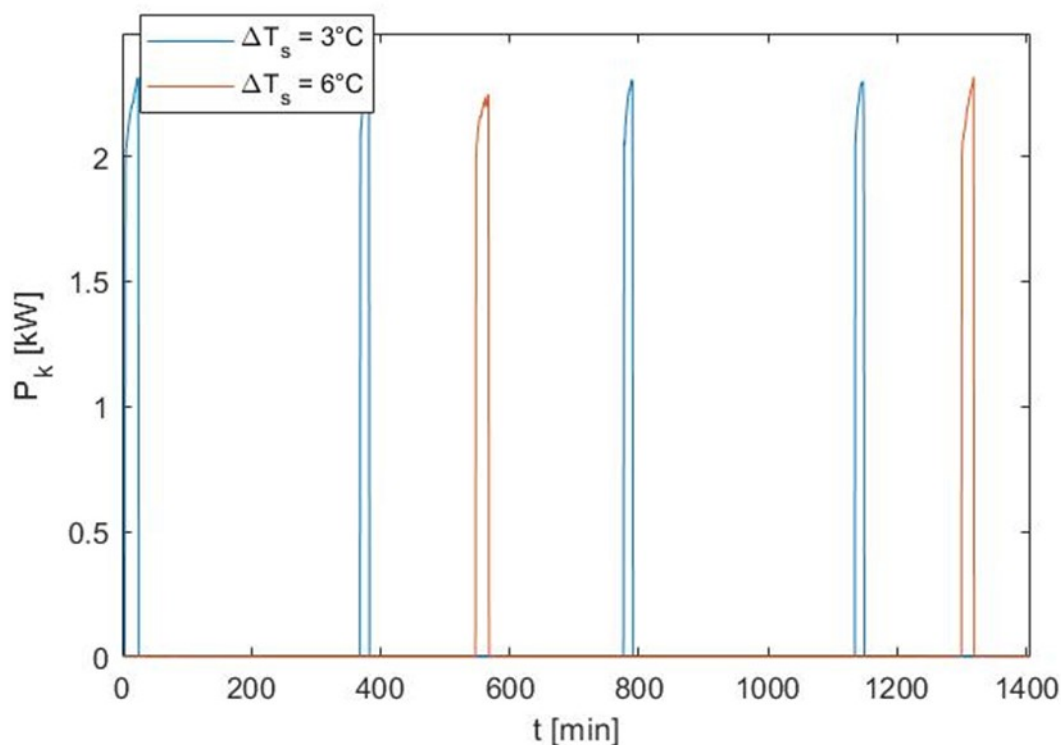
Sljedeća slika prikazuje kretanje temperature isparavanja tijekom dva ciklusa rada.



Slika 23. Kretanje temperature isparavanja pri „on/off“ regulaciji, $\Delta T=6$ °C

Paljenjem sustava, kompresor svojom velikom snagom spušta temperaturu isparavanja jako nisko da bi se omogućio potreban prijenos toplinskog toka između radnog medija i glikolne smjese koja dolazi iz BITa. Do tog naglog pada temperature dolazi jer kompresor velike snage u kratkom vremenu spusti tlak isparavanja. Nakon nekog vremena parametri se stabiliziraju, uspostavlja se toplinski tok te temperatura isparavanja raste.

Graf na slici 24. predstavlja intervale paljenja kompresora u ovisnosti o postavljenim temperaturnim histerezama.

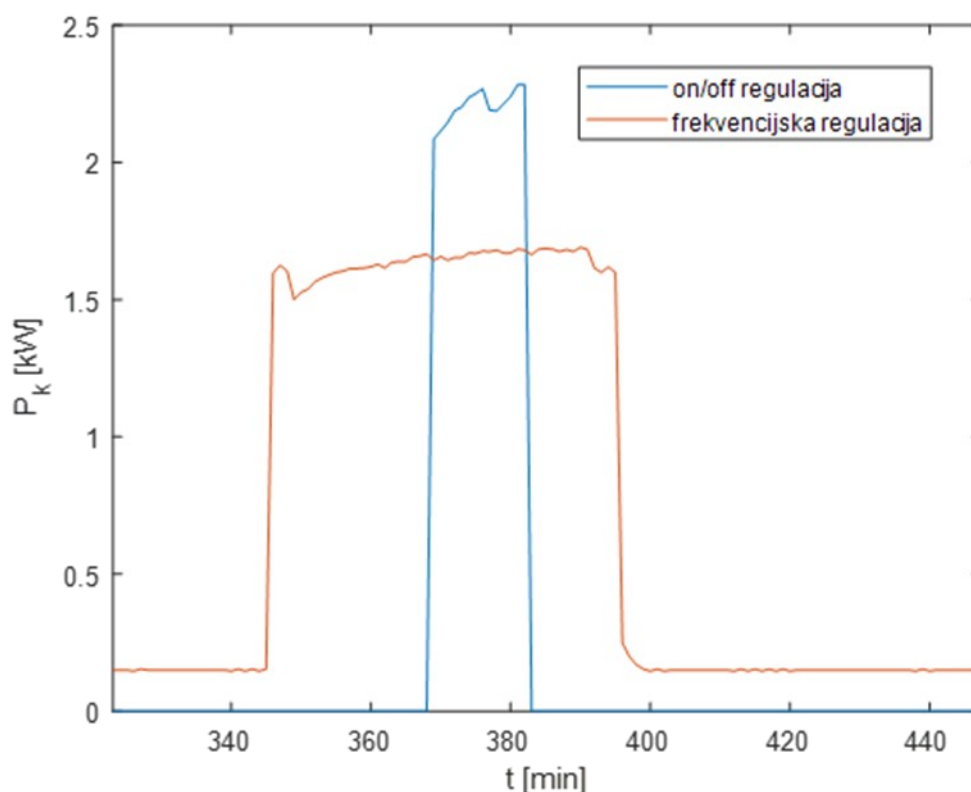


Slika 24. Usporedba intervala paljenja u ovisnosti o histerezi, $\Delta T=3^\circ\text{C}$, 6°C

Iz slike se može zaključiti da što je manja postavljena histereza, intervali paljenja će biti kraći. Drugim riječima, paljenje će biti češće. Također, sam ciklus rada bit će kraći kod manje histereze jer kompresor radi punim kapacitetom i potrebno mu je manje vremena da zagrije spremnik na gornju temperaturnu granicu. Naravno da je za očuvanje samog kompresora poželjno da su ciklusi rada što duži, a broj paljenja što manji. Tako se produljuje životni vijek kompresora.

3.2. Frekvencijski upravljani uređaj

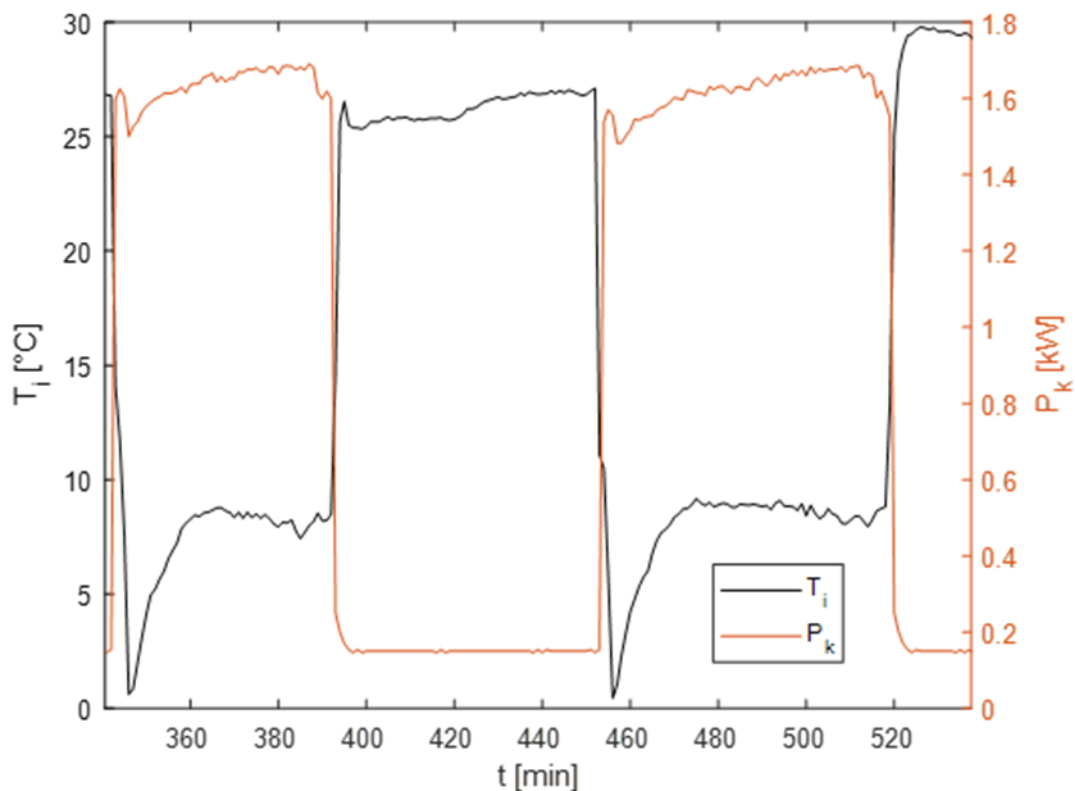
Slika 25. prikazuje usporedbu ciklusa paljenja sustava s i bez frekvencijskog pretvarača.



Slika 25. Usporedba ciklusa paljenja s i bez frekvencijskog pretvarača, $\Delta T=3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Plavom linijom prikazan je slučaj s „on/off“ regulacijom, dok je narančastom linijom prikazan isti slučaj ($\Delta T=3\text{ }^{\circ}\text{C}$), ali s frekvencijskom regulacijom. Jedna od karakteristika frekvencijskog pretvarača jest da omogući start s djelomičnim opterećenjem. Time se ublažavaju naprezanja uzrokovana zakretnim momentom i produžuje životni vijek sustava. Na prikazanom grafu početna je frekvencija stavljena na 35 Hz. To je rezultiralo smanjenjem broja okretaja motora, odnosno kompresora. Manje radne tvari prolazi kroz sustav nego u primjeru s „on/off“ regulacijom, što dovodi do dužeg vremena rada kako bi se postigao isti učin, odnosno dostigla gornja postavljena temperaturna granica spremnika.

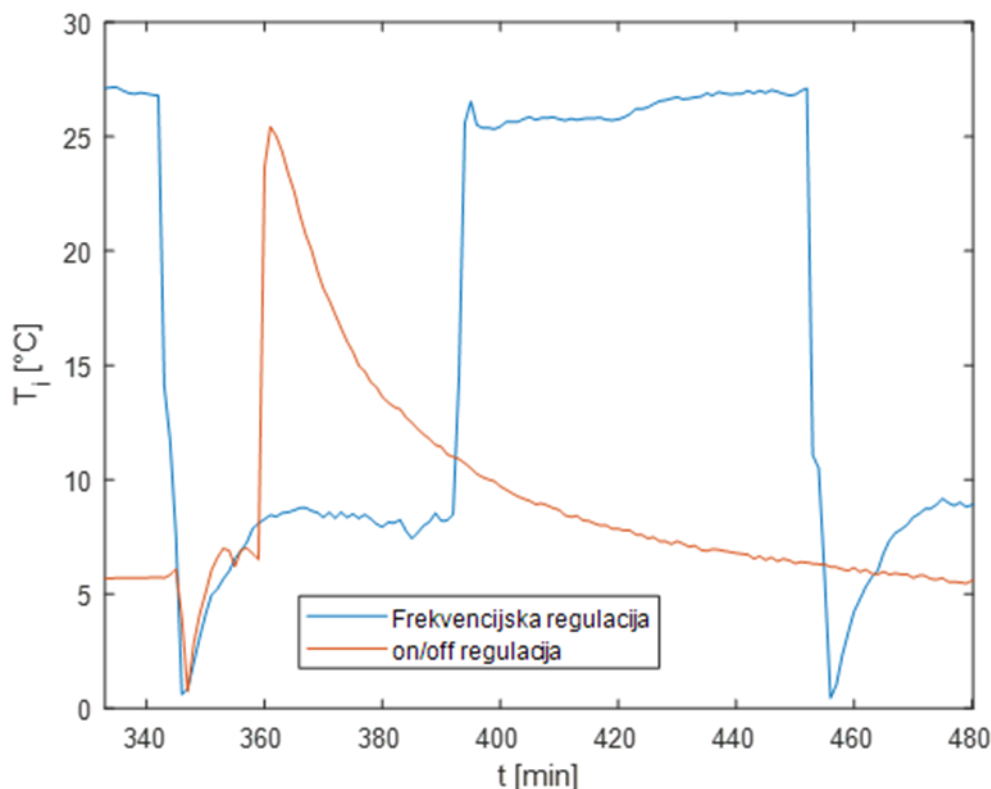
Slika 26. prikazuje ponašanje temperature isparavanja u sustavu s frekvencijskom regulacijom.



Slika 26. Kretanje temperature isparavanja u sustavu s frekvencijskom regulacijom, $\Delta T=3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Graf na gornjoj slici zanimljivo je pogledati jer prikazuje kretanje temperature isparavanja u sustavu koji prilagođava snagu potrebama, odnosno smanjuje protok radne tvari kroz sustav. Usljed toga, temperatura isparavanja raste i približava se temperaturi glikolne smjese iz BITa.

Sljedeća slika prikazuje usporedbu temperaturi isparavanja tijekom jednog ciklusa za oba načina regulacije.



Slika 27. Usporedba temperatura isparavanja s i bez frekvencijskog pretvarača, $\Delta T=3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Jasno su uočljive početne nestacionarnosti oba sustava u trenutku paljenja kompresora ($t \approx 346$ min). Temperature naglo padaju, ali vrlo brzo se podižu prema radnoj temperaturi. Narančasta linija, kojom je označena „on/off“ regulacija, brzo prestaje rasti. Naspram nje plava linija, kojom je označena frekvencijska regulacija, nastavlja rasti, dolazi u radno stanje i pokušava postati konstantna. U tome stanju ostaje duže od narančaste linije što reducira utjecaj početnih nestabilnosti. Srednja vrijednost temperature na isparivaču je viša nego kod sustava s „on/off“ regulacijom pa samim time i faktor grijanja sustava. Iz analize mjerenih podataka proizlazi da je prosječni COP za sustav s frekvencijskom regulacijom veći za 6-7 % po ciklusu od sustava s „on/off“ regulacijom, za slučaj $\Delta T=3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. ZAKLJUČAK

Mjerenja na geotermalnoj dizalici topline na FSB-u provedena su radi usporedbe dvaju načina regulacije koji su implementirani u taj sustav. Prva mjerenja provedena su za slučaj s najjednostavnijom „on/off“ regulacijom za koju je karakteristično da uređaj radi punim kapacitetom za dane uvjete ili uopće ne radi. Nakon toga, mjerenja su ponovljena, ali za slučaj s naprednijom frekvencijskom regulacijom. Karakteristično za nju jest mijenjanje broja okretaja kompresora s čim se postigla preciznija regulacija sustava. Neki od parametara koji su analizirani u ovom radu su: snaga kompresora, toplinski učin na kondenzatoru i isparivaču, tlakovi kondenzacije i isparavanja, temperature na ulazu i izlazu iz kondenzatora, kompresora i isparivača te mnogi drugi. Od važnijih opažanja treba izdvojiti:

- Stvarni (radni) intervali temperaturne histereze puno su širi od postavljenih zbog tromosti sustava;
- Povećanjem histereze produžuje se ciklus rada sustava, a smanjuje se broj paljenja što pozitivno utječe na vijek trajanja sustava. Srednja temperatura spremnika također je manja pa pada i temperatura kondenzacije što dovodi do povećanja faktora grijanja;
- Frekvencijski pretvarač utječe pozitivno na smanjenje naprezanja prilikom paljenja uređaja što produžuje životni vijek istog;
- Na početku ciklusa paljenja zapažaju se nestacionarne pojave koje negativno utječu na učinkovitost. Frekvencijski reguliran uređaj produživanjem intervala smanjuje utjecaj nestacionarnosti na cijeli interval;
- Zbog viših srednjih temperatura na isparivaču kod sustava s frekvencijskom regulacijom faktor grijanja je viši za 6 do 7 %, nego kod sustava s „on/off“ regulacijom.

LITERATURA

- [1] Soldo, V.: Dizalice topline s OIE, Radna skripta predavanja, Zagreb, 2021.
- [2] Miše, D.: Napredni sustavi regulacije geotermalne dizalice topline na FSB-u, Diplomski rad, Zagreb, 2020.
- [3] Gjurasi, I.: Eksperimentalna analiza geotermalne dizalice topline u režimu grijanja, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.
- [4] Boban, L.: Eksperimentalno i teorijsko istraživanje geotermalne dizalice topline, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [5] Hesselgreaves, J.E.: Compact heat exchangers: Selection, design and operations, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 2001.
- [6] Andrassy, M.: Stapni kompresori, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [7] Araki, M.: CONTROL SYSTEMS, ROBOTICS AND AUTOMATION-Volume VII-PID Control, Kyoto University, Japan, 2009.
- [8] Automatika i procesi d.o.o., <https://www.aip.com.hr/>

PRILOZI

- I. Izometrijski prikaz dizalice topline
- II. Tehnička dokumentacija
 - a) Dispozicija dizalice topline

Izometrijski prikaz dizalice topline

