

Proračun godišnje potrošnje energije toplotne pumpe metodom temperaturnih segmenata

Branislav Petrović, Marija Vasilev, Miloš Banjac

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd

Rezime - Toplotne pumpe su električni uređaji koji termičku energiju okoline prenose u grejani prostor. Zahvaljujući tome što, u poređenju sa elektrootpornim grejačima, mogu preneti tri do šest puta više termičke energije u grejani prostor, toplotne pumpe po efikasnosti predstavljaju neprikosnoveno rešenje u tehnici grejanja. U slučaju da je izvor termičke energije spoljašnji vazduh, slučaj tzv. toplotnih pumpi tipa vazduh-vazduh, njihova efikasnost direktno zavisi od temperature spoljašnjeg vazduha. Zbog toga se procena ukupne potrošnje energije toplotne pumpe mora zasnivati na metodologiji koja uzima u obzir promenu ove temperature. Za određivanje ukupne potrošnje energije toplotne pumpe Standard EN 15316 utvrđuje dve metode: metodu stepen-dana i metodu temperaturnih segmenata. U domaćoj praksi isključivo se koristi jednostavnija i manje precizna, metoda stepen-dana. Metoda temperaturnih segmenata, iako pouzdanija, verovatno zbog potrebe da se raspolaze časovnim podacima temperature spoljašnjeg vazduha, ostala je gotovo nepoznata. Kako bi se predstavila i približila inženjerskoj praksi, u radu su opisane teorijske osnove i prikazani osnovni koraci ove metode, a na studiji slučaja upravne zgrade EPS AD u Bajinoj Bašti prikazana njena primena. Grupisanjem stvarnih časovnih podataka o temperaturi spoljašnjeg vazduha u temperaturne segmente i njihovim povezivanjem sa radnim tačkama toplotne pumpe, uz obuhvatanje rada pomoćnih uređaja i rezervnih grejača, određena je ukupna godišnja potrošnja električne energije. Dobijena potrošnja od 56 150 kWh električne energije, pri čemu se 86% ostvaruje u zimskom, a 14 % u letnjem režimu rada, jasno pokazuje dominantan uticaj zimskih sati u ukupnoj potrošnji.

Ključne reči - metoda temperaturnih segmenata, metoda proračuna energetske analize, toplotna pumpa, godišnja potrošnja energije

I UVOD

Toplotne pumpe su trenutno najefikasnije tehničko rešenje kojim mogu da se zadovolje potrebe za grejanjem i hlađenjem. Njihova primena značajno smanjuje upotrebu fosilnih goriva, a time i emisiju gasova koji prouzrokuju efekat staklene bašte, budući da one preuzimajući termičku iz okoline omogućavaju da se tri do šest puta više toplote preda u grejani prostor, nego što se potroši električne energije [1]. Pored sektora zgradarstva, one se koriste i u industrijskim procesima, za potrebe sušenja, isparavanja, destilacije, ukuvavanja, proizvodnju pare ili istovremeno zagrevanje jednog i hlađenje drugog fluida [2]. Posebno je značajna i perspektivna njihova primena u

sistemima daljinskog grejanja, jer one koriste niskotemperaturne toplotne izvore i tzv. otpadnu toplotu. Brojne analize potvrđuju finansijsku isplativost koja se ostvaruje zamenom tradicionalnih sistema grejanja toplotnim pumpama [3-5]. Rad [6] pokazuje da zamena električnog kotla toplotnom pumpom vazduh-voda značajno smanjuje potrošnju električne energije za grejanje objekta, pri čemu se ostvaruje ušteda od približno 60 %. Dodatno, u istom radu navodi se da prelazak sa gasnog kotla na toplotnu pumpu doprinosi oko 40% manju potrošnju energije. S obzirom na značajne energetske i ekološke koristi u primeni toplotnih pumpi, precizna procena godišnje potrošnje energije za njihov pogon postala je važan deo tehničkih, ekonomskih i ekoloških analiza primene ovih sistema.

Iako postoji mnogo različitih metoda za proračun godišnje potrošnje energije za pogon toplotne pumpe, standard ISO EN 15316-4-2:2017/AC:2017 [7] utvrđuje samo dve i to tzv. metodu stepen dana i tzv. metodu temperaturnih segmenata (eng. bins). U domaćoj praksi isključivo se koristi jednostavnija i manje precizna metoda stepen-dana. Ova metoda koristi prosečne dnevne temperature spoljašnjeg vazduha, što je čini manje preciznom, pa čak i potpuno neadekvatnom kad se koristi za analizu tokom letnjeg perioda [8]. Metoda temperaturnih segmenata, iako spada u grupu kvazistacionarnih metoda, koristi časovne temperature spoljašnjeg vazduha, što obezbeđuje precizniju procenu potrošnje energije za sve vremenske intervale (godina, mesec, dan) tokom sezone grejanja i hlađenja, uz mogućnost obuhvatanja potrošnje energije za rad pomoćnih uređaja i rezervnih grejača [9]. Pri tome, za razliku od metode stepen dana, koja pri određivanju ukupno utrošene energije pretpostavlja da koeficijent grejanja COP i koeficijent hlađenja EER toplotne pumpe imaju stalne vrednosti, metoda temperaturnih segmenata uzima u obzir upravo promenljivost vrednosti ovih koeficijenata u zavisnosti o temperature spoljašnjeg vazduha. Zbog toga, da bi se ona primenila, potrebno je pored poznavanja srednjih časovnih vrednosti temperatura spoljašnjeg vazduha poznavati i kako se menjaju koeficijent grejanja COP, odnosno koeficijentom hlađenja EER toplotne pumpe u funkciji ovih temperatura. Ova zavisnost, u praksi se svodi na poznavanje ovih podataka u karakterističnim, tzv. radnim tačkama, za koju proizvođači toplotnih pumpi daju u svojim katalogima.

Kao što joj sam naziv glasi, metoda temperaturnih intervala zasniva se na prebrojavanju broja pojavljivanja i svrstavanju časovnih temperatura spoljašnjeg vazduha u određene temperaturne intervale. Ovi intervali, ograničeni gornjom θ_{lim} i donjom θ_{lim} graničnom temperaturom intervala, formiraju se

tako da svaki interval obuhvati tzv. radnu tačku, tj. temperaturu pri kojoj je za zimski režim poznat koeficijent grejanja COP , odnosno koeficijent hlađenja EER toplotne pumpe za letnji režim. Kako ova metoda predviđa da u formiranom intervalu temperatura toplotna pumpa uvek radi u tzv. radnoj tački, sa odgovarajućim koeficijentom grejanja COP , odnosno koeficijentom hlađenja EER , jasno je da se povećanjem broja temperaturnih intervala povećava kvalitet proračuna.

Metoda temperaturnih segmenata utvrđena standardom ISO EN 15316-4-2:2017/AC:2017 [7], daje mogućnost izbora dve podmetode: Metode A i Metode B. Izbor podmetode zavisi od vremenskog intervala za koji je potrebno da se odredi potrošnja energije. Metoda A omogućava proračune časovne i dnevne potrošnje energije, dok Metoda B omogućava dnevne, mesečne i godišnje proračune. Zbog namere da se odrede pre svega godišnja potrošnja energije, u ovom radu je predstavljen i za proračunu i analizu korišćena Metoda B.

Za potrebe izračunavanja prema Metodi B, uvodi se i pojam kumulativnog grejnog stepen sata ($DH_{H,j}$ [°Ch]). Ova veličina predstavlja broj sati u kojima se javlja temperatura spoljašnjeg vazduha u temperaturnom intervalu j (NB_{h_j} [h]) pomnožena sa razlikom između temperature vazduha u prostoriji (usvojena kao 20 °C) i temperature spoljašnjeg vazduha:

$$DH_{H,j} = NB_{h_j} \cdot (\vartheta_{gen,out} - \vartheta_{ext}) [°Ch] \quad (1)$$

Analogno jednačini (1), u režimu hlađenja koristi se kumulativni rashladni stepen sat ($DH_{C,j}$ [°Ch]) koji predstavlja broj sati u kojima se javlja temperatura spoljašnjeg vazduha u temperaturnom intervalu j (NB_{h_j}), pomnožena sa razlikom između temperature spoljašnjeg vazduha i temperature vazduha u prostoriji (usvojene kao 24 °C).

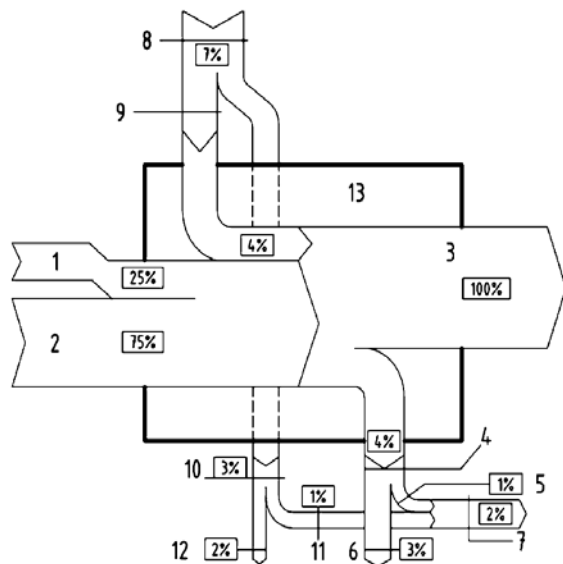
Proračun parametara toplotne pumpe zahteva detaljno poznavanje specifičnih potreba za grejanjem i pripremom sanitarne tople vode. Pored toga, na rezultate proračuna utiče broj i vrsta toplotnih izvora, tip toplotne pumpe i način njenog regulisanja (ON/OFF ili inverter).

Cilj proračuna je određivanje svih vrsta energije, sa posebnim akcentom na energiju potrebnu za pogon toplotne pumpe.

Kako bi se obezbedila tačnost proračuna, neophodno je precizno definisati energetske tokove koji se javljaju kako u zimskom, tako i u letnjem režimu rada podsistema toplotne pumpe, a to su (Slika 1):

- 1 - energija potrebna za pogon toplotne pumpe i pomoćnog grejača $E_{HW,gen,in}$,
- 2 - toplota preuzeta od toplotnog izvora $Q_{HW,gen,in}$,
- 3 - toplotna energija potrebna za grejanje prostora (grejni učinak) $Q_{HW,gen,out}$,
- 4 - ukupni toplotni gubici u podsistemu toplotne pumpe $Q_{HW,gen,ls,tot}$,
- 5 - iskoristivi toplotni gubitak vraćen u grejani prostor $Q_{HW,gen,ls,rbl}$,
- 6 - neiskoristivi toplotni gubitak $Q_{HW,gen,ls,nrbl}$,
- 7 - ukupni iskoristivi toplotni gubici (toplotni gubici podsistema toplotne pumpe i pomoćnih uređaja) $Q_{HW,gen,ls,rbl,tot}$,

- 8 - energija potrebna za pogon pomoćnih uređaja $W_{HW,gen,aux}$,
- 9 - vraćena pomoćna energija u podsistem toplotne pumpe (stvarno iskorišćena) $Q_{HW,gen,aux,ls,rvd}$,
- 10 - ukupni toplotni gubici pomoćnih uređaja $Q_{HW,gen,aux,ls}$,
- 11 - iskoristivi toplotni gubici pomoćnih uređaja $Q_{H,gen,aux,ls,rbl}$,
- 12 - neiskoristivi toplotni gubici pomoćnih uređaja $Q_{H,gen,aux,ls,nrbl}$,
- 13 - podsistem toplotne pumpe.



Slika 1. Energetski tokovi podsistema toplotne pumpe [1]

U letnjem režimu rada, energetski tokovi su isti izuzev ukupnih iskoristivih toplotnih gubitaka u podsistemu toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,rbl}$).

Nezavisno od korišćene metode, potrošnja energije potrebne za pogon toplotne pumpe određuje se na osnovu izraza:

$$E_{HW,gen,in} \cdot COP_{HW,gen} = Q_{HW,gen,out} + Q_{HW,gen,ls,tot} - f_{gen,aux,ls,rvd} \cdot W_{HW,gen,aux} [kWh] \quad (2)$$

gde su:

$COP_{HW,gen}$ - srednja vrednost COP za grejanje i pripremu sanitarne tople vode,

$f_{gen,aux,ls,rvd}$ - udeo iskorišćene toplote od pomoćnih uređaja.

II ODREĐIVANJE ENERGETSKIH POTREBA ZA DEFINISANE TEMPERATURNE INTERVALE

Nakon određivanje temperaturnih intervala i kumulativnog broja grejnih stepen sati i kumulativnog broja rashladnih stepen sati, neophodno je odrediti i pojedine količine toplote potrebne koje toplotna pumpa u ovim temperaturnim intervalima treba da isporuči grejanom, odnosno hlađenom prostoru. Ove vrednosti se određuju preko težinskog faktora toplotne pumpe za režim grejanja $f_{H,j}$ [-] za temperaturni interval j , izražen preko kumulativnog grejnog stepen sata u okviru definisanog vremenskog intervala, kao:

$$f_{H,j} = \frac{Q_{H,gen,out,j}}{Q_{H,gen,out}} = \frac{DH_{H,0h,lim,j} - DH_{H,0l,lim,j}}{DH_{H,tot}} [-] \quad (3)$$

gde su:

$Q_{H,gen,out,j}$ [kWh] - količina toplote potrebna za nadoknadu gubitaka toplote u okviru temperaturnog intervala j ,

$Q_{H,gen,out}$ [kW] - ukupna količina toplote potrebna za nadoknadu gubitaka toplote,

$DH_{H,0h,lim,j}$ [°Ch] - kumulativni grejni stepen sat do gornje temperature temperaturnog intervala j ,

$DH_{H,0h,lim,j}$ [°Ch] - kumulativni grejni stepen sat do gornje temperature temperaturnog intervala j ,

$DH_{H,0l,lim,j}$ [°Ch] - kumulativni grejni stepen sat do donje temperature temperaturnog intervala j ,

$DH_{H,tot}$ [°Ch] - ukupni kumulativni grejni stepen sat do granice grejanja za zimski režim.

S obzirom da prikazana formula uzima u obzir jedino spoljašnju temperaturu vazduha, uvodi se faktor f_{ctrl} , koji uzima u obzir uslove u kojima je smanjena potreba za grejanjem/hlađenjem. Pored toga, prilikom određivanja energetske potreba za grejanjem, uzima se u obzir i iskorišćena toplota $Q_{H,rnd,j}$ koja ima različite vrednosti za svaki temperaturni interval.

Na osnovu dobijenog težinskog faktora dobija se potrebna količina toplote za nadoknadu gubitaka toplote za definisane temperaturne intervale:

$$Q_{H,gen,out,j} = f_{H,j} \cdot Q_{H,gen,out} \text{ [kWh]} \quad (4)$$

Energija potrebna za pogon toplotne pumpe u okviru definisanih temperaturnih intervala koja se, u opštem slučaju, koristi za grejanje prostorija, pripremu sanitarne tople vode i akumulaciju toplote, izračunava kao:

$$E_{H,gen,in,j}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out}) = \frac{\Phi_{gen}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out})}{COP_{gen}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out})} \cdot t_{eff,j} \text{ [kWh]} \quad (5)$$

Koeficijent grejanja za zadate radne uslove toplotne pumpe u okviru temperaturnih intervala ($COP_{gen,k,l}$), izračunava se u skladu sa standardom SRPS EN 14511. Vrednost $COP_{gen,ref}$ -a, dobijena pri nominalnim uslovima rada od strane proizvođača množi se sa odgovarajućim težinskim faktorom $f_{COP,k,l}$ datim u Aneksu navedenog standarda, kako bi bila prilagođena specifičnim uslovima rada. Analogno određivanju $COP_{gen,k,l}$ -a, grejni učinak toplotne pumpe za zadate radne uslove $\Phi_{gen,k,l}$ takođe se izračunava u zavisnosti od temperatura toplotnog izvora i ponora, pri čemu se grejni učinak toplotne pumpe, dobijen pri nominalnim uslovima rada ($\Phi_{gen,Pn,ref}$), množi sa odgovarajućim korekcionim faktorom za grejni učinak $f_{gen,Pn,k,l}$.

S obzirom da u većini slučajeva toplotna pumpa ne radi kontinuirano tokom celog dana, uvodi se efektivno vreme rada toplotne pumpe koji predstavlja ukupno vreme rada toplotne pumpe za određeni temperaturni interval.

$$t_{eff,j} = t_j \cdot \frac{24 - t_{CO}}{24} \text{ [s]} \quad (6)$$

gde je:

t_{CO} [h/dan] - vreme prekida rada toplotne pumpe u toku 24 sata.

Vreme rada toplotne pumpe t_j za zadati temperaturni interval j , izračunava se na osnovu jednačine (7), pri čemu ukupno vreme rada za definisane temperaturne intervale daje dužinu trajanja grejne sezone.

$$t_j = N_{ho,0hlim,j} - N_{ho,0llim,j} \text{ [h]} \quad (7)$$

gde su:

$N_{ho,0hlim,j}$ [h] - kumulativni broj sati do gornje temperature za temperaturni interval j ,

$N_{ho,0llim,j}$ [h] - kumulativni broj sati do donje temperature za temperaturni interval j .

Na osnovu vrednosti za svaki temperaturni interval dobijaju se vrednosti potrošnje navedenih vidova energije za čitavu sezonu grejanja i hlađenja.

Određivanje energetske potreba za pripremu sanitarne tople vode određuje se analogno delu proračuna za grejanje preko težinskog faktora za pripremu sanitarne tople vode.

Energija potrebna za rad pomoćnih uređaja ($W_{H,gen,aux,j}$) čini udeo ukupne energije potrebne za pogon toplotne pumpe.

$$W_{H,gen,aux,j} = (f_{gen,aux} + f_{gen,Pn,aux,el}) \cdot E_{H,gen,in,j} + LR_{sto} \cdot P_{sto,aux} \cdot t_{eff,j} = E_{H,gen,in,j} \cdot f_{gen,Pn,aux,el} \text{ [kWh]} \quad (8)$$

Koeficijent $f_{gen,Pn,aux,el}$ se određuje na osnovu vrste pogonske energije toplotne pumpe (toplotnu pumpu pogoni električna energija $f_{gen,Pn,aux,el}=0$), dok se koeficijent $f_{gen,aux}$ određuje na osnovu lokacije, proizvođača i tipa toplotne pumpe.

Ukoliko se toplota ne skladišti unutar rezervoara za toplu/hladnu vodu, drugi sabirak u jednačini (8) se zanemaruje.

Ukupni gubici toplote u okolinu podsistema toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,tot}$) sastoje se iz gubitaka toplote u okolinu komponente k podsistema ($Q_{H,gen,ls,k}$) i gubitaka svih pomoćnih uređaja u okolinu ($Q_{H,gen,aux,ls}$):

$$Q_{H,gen,ls,tot,j} = \sum_k Q_{H,gen,ls,k,j} + Q_{H,gen,aux,ls,j} \text{ [kWh]} \quad (9)$$

pri čemu se smatra da ukupni gubici toplote pumpe prema okolini iznose 1% u odnosu na grejni učinak toplotne pumpe tokom njenog vremena rada za dati temperaturni interval:

$$Q_{H,gen,ls,k} = 0,001 \cdot Q_{H,gen,in,j}(t) \quad (10)$$

Gubici svih pomoćnih uređaja ka okolini računaju se na osnovu energije potrebne za rad pomoćnih uređaja ($W_{H,gen,aux,j}$) pomnožene sa udelom električne energije odvedene u okolinu ($f_{gen,aux,ls,k}$):

$$Q_{H,gen,aux,ls,j} = \sum_k W_{H,gen,aux,k,j} \cdot f_{gen,aux,ls,k} \text{ [kWh]} \quad (11)$$

Ukupni iskoristivi toplotni gubici u podsistemu toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,rbl,tot}$) za definisani temperaturni interval obuhvataju gubitke toplote koji se mogu iskoristiti kako od strane podsistema toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,rbl}$), tako i od pomoćnih

uređaja ($Q_{H,gen,aux,ls,rbl}$). U odnosu na ukupne gubitke toplote u okolinu, iskoristivi toplotni gubici uzimaju u obzir faktor redukcije temperature ($b_{gen,k}$) i faktor redukcije temperature pomoćne komponente $b_{gen,aux,k}$, koji zavisi od položaja komponente k .

$$Q_{H,gen,ls,rbl,tot,j} = Q_{H,gen,ls,rbl,j} + Q_{H,gen,aux,ls,rbl,j} = \sum_k Q_{gen,ls,k,j} (1 - b_{gen,k}) + Q_{H,gen,aux,ls,j} (1 - b_{gen,aux,k}) \quad (12)$$

Količina toplote preuzeta od toplotnog izvora, odnosno obnovljiva energija (u ovom slučaju vazduh $Q_{H,gen,in,j} = Q_{H,gen,ren,in,j}$) koju koristi toplotna pumpa dobija se kao razlika količine toplote koja se isporučuje potrošačima i zbira električne energije potrebne za pogon toplotne pumpe i energije rezervnih grejača.

$$Q_{H,gen,ren,in,j} = Q_{H,gen,out,j} - (E_{H,gen,in,j} + E_{H,gen,bu,in,j}) \text{ [kWh]} \quad (13)$$

U slučaju kada toplotna pumpa nije u mogućnosti da nadoknadi celokupne gubitke toplote u objektu, izabrana toplotna pumpa mora biti opremljena dodatnim rezervnim električnim grejačem, čija se snaga računa prema sledećoj formuli:

$$Q_{gen,bu,out,j} = Q_{H,gen,out,j} + Q_{W,gen,out,j} - Q_{H,gen,in,j} - Q_{W,gen,in,j} + Q_{gen,ls,j} \text{ [kWh]} \quad (14)$$

gde su:

$Q_{gen,bu,out,j}$ [kWh] - količina toplote koju rezervni grejač treba da preda u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{H,gen,out,j}$ [kWh] - količina toplote potrebna za grejanje objekta u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{W,gen,out,j}$ [kWh] - količina toplote potrebna za pripremu sanitarne tople vode u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{H,gen,in,j}$ [kWh] - količina toplote koja se preda za grejanje prostora za zadate radne uslove u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{W,gen,in,j}$ [kWh] - količina toplote koja se preda za pripremu sanitarne tople vode za zadate radne uslove u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{H,gen,ls,j}$ [kWh] - gubici toplote u okolinu podsistema toplotne pumpe u temperaturnom intervalu j .

III STUDIJA SLUČAJA

1 Ulazni podaci za proračun

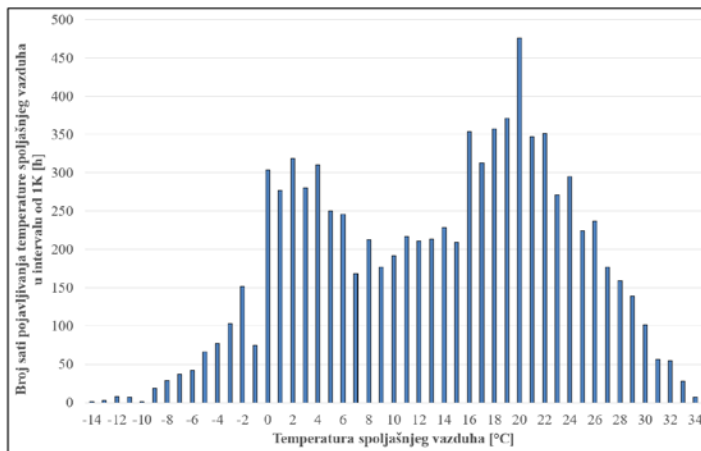
Proračun godišnje potrošnje električne energije za pogon toplotne pumpe prema metodi B predstavljen je na konkretnom primeru objekta Upravne zgrade EPS AD Ogranka „Drinsko-Limske“ HE u Bajinoj Bašti. Objekat se sastoji iz podruma i četiri sprata, pri čemu grejna površina objekta iznosi 2133,44 m². Trenutno snabdevanje energijom za grejanje izvodi se pomoću toplotne podstanice direktnog tipa, povezane na sistem daljinskog grejanja. Grejanje prostorija vrši se pomoću člankastih radijatora, dok se hlađenje u objektu ostvaruje pomoću monosplit sistema. U cilju unapređenja energetske efikasnosti i isplativosti tokom eksploatacije, umesto postojeće toplotne podstanice direktnog tipa predviđena je toplotna pumpa vazduh-voda.

Tabela 1. Prikaz meteoroloških podataka o časovnim temperaturama spoljašnjeg vazduha na osnovu tipične meteorološke godine za Bajinu Baštu

Bin 1K		NB_h _j	NB_h _k	DH _{H,j}	DH _{H,k}	DH _{C,j}	DH _{C,k}
-14	-13	1	1	33	33	0	0
-13	-12	3	4	96	129	0	0
-12	-11	8	12	248	377	0	0
-11	-10	7	19	210	587	0	0
-10	-9	1	20	29	616	0	0
-9	-8	19	39	532	1148	0	0
-8	-7	29	68	783	1931	0	0
-7	-6	37	105	962	2893	0	0
-6	-5	42	147	1050	3943	0	0
-5	-4	66	213	1584	5527	0	0
-4	-3	77	290	1771	7298	0	0
-3	-2	103	393	2266	9564	0	0
-2	-1	152	545	3192	12756	0	0
-1	0	75	620	1500	14256	0	0
0	1	304	924	5776	20032	0	0
1	2	277	1201	4986	25018	0	0
2	3	319	1520	5423	30441	0	0
3	4	280	1800	4480	34921	0	0
4	5	311	2111	4665	39586	0	0
5	6	250	2361	3500	43086	0	0
6	7	246	2607	3198	46284	0	0
7	8	168	2775	2016	48300	0	0
8	9	213	2988	2343	50643	0	0
9	10	177	3165	1770	52413	0	0
10	11	192	3357	1728	54141	0	0
11	12	217	3574	1736	55877	0	0
12	13	211	3785	1477	57354	0	0
13	14	214	3999	1284	58638	0	0
14	15	229	4228	1145	59783	0	0
15	16	209	4437	836	60619	0	0
16	17	354	4791	1062	61681	0	0
17	18	313	5104	626	62307	0	0
18	19	358	5462	358	62665	0	0
19	20	371	5833	0	62665	0	0
20	21	476	6309	0	62665	0	0
21	22	347	6656	0	62665	0	0
22	23	352	7008	0	62665	0	0
23	24	271	7279	0	62665	0	0
24	25	295	7574	0	62665	295	295
25	26	224	7798	0	62665	448	743
26	27	237	8035	0	62665	711	1454
27	28	177	8212	0	62665	708	2162
28	29	159	8371	0	62665	795	2957
29	30	139	8510	0	62665	834	3791
30	31	102	8612	0	62665	714	4505
31	32	56	8668	0	62665	448	4953
32	33	55	8723	0	62665	495	5448
33	34	28	8751	0	62665	280	5728
34	35	9	8760	0	62665	99	5827

U skladu sa projektnim uslovima, prema metodologiji iz standarda SRPS EN 12831 određena je potrebna grejna snaga grejnog sistema od 210 kW, odnosno za letnji period, rashladna snaga rashladnog sistema od 221,1 kW. Za definisanje

temperaturnih intervala potrebnih za proračun godišnje potrošnje električne energije za pogon toplotne pumpe bilo je neophodno izabrati odgovarajuću toplotnu pumpu. Za nadoknadu potreba za grejanjem i hlađenjem usvojene su dve redno povezane toplotne pumpe proizvođača Viessmann (tip: VITOCAL 200-A PRO AWO-AC 204.A128), koje rade u temperaturnom režimu 45/40 °C u sezoni grejanja i 7/12 °C u režimu hlađenja. Iako izabrane toplotne pumpe zadovoljavaju celokupne zahteve u režimu hlađenja, njihova snaga pri projektnoj spoljašnjoj temperaturi vazduha u zimskom periodu iznosi 164 kW. Kako bi se izbeglo predimenzionisanje sistema tokom režima hlađenja, a istovremeno osigurala odgovarajuća grejna snaga u periodu kada toplotni gubici premašuju grejnu snagu toplotnih pumpi, predviđeno je korišćenje električnih grejača ugrađenih u same toplotne pumpe, grejne snage od po 25 kW.



Slika 2. Godišnja učestalost pojavljivanja spoljašnje temperature vazduha za Bajinu Baštu tokom tipične meteorološke godine

Jedan od ulaznih podataka proračuna je učestalost pojave spoljašnje temperature vazduha sa korakom od 1 K [10]. Za određivanje kumulativnog grejnog stepen sata za pojedine temperaturne intervale analizirana je tipična meteorološka godina za Bajnu Baštu [11]. Grafički prikaz godišnje učestalosti pojavljivanja časovnih vrednosti temperatura spoljašnjeg vazduha dat je na Slici 2. Ukupan broj sati u kojima se određena temperatura spoljašnjeg vazduha javlja tokom tipične meteorološke godine, zajedno sa grejnim i rashladnim stepen satima za intervale od 1 K, kao i kumulativnim grejnim i rashladnim stepen satima, prikazani su u Tabeli 1.

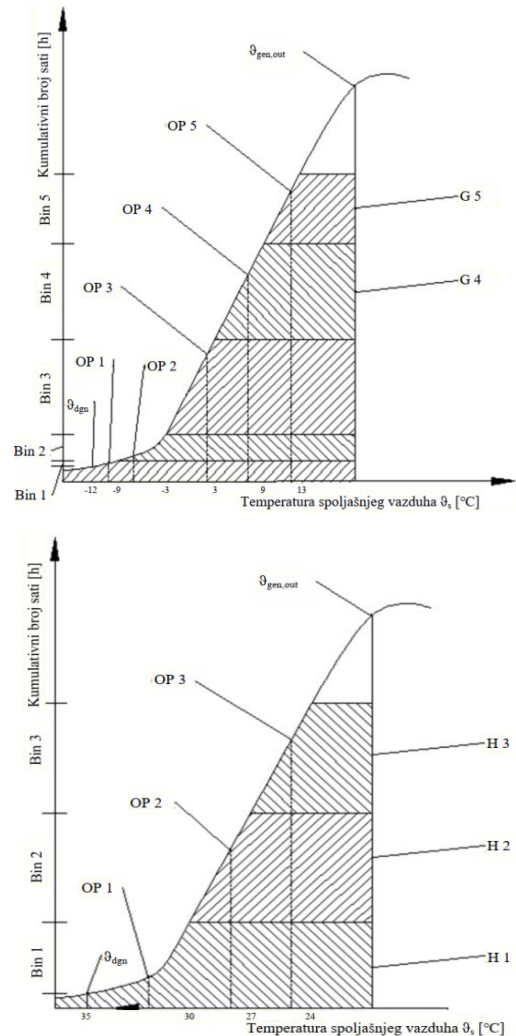
II Definisane temperaturnih segmenata

Radne tačke – temperature izvora toplote, odnosno ponora toplote za koje su poznate vrednosti koeficijenata grejanja (COP), koeficijenata hlađenja (EER), usvojene su na osnovu podataka navedenih u katalogu proizvođača toplotne pumpe. Prema navodima proizvođača, vrednosti ovih koeficijenata grejanja i koeficijenata hlađenja, određen je standardnim metodama.

Na osnovu tabele i dijagrama iz kataloga proizvođača toplotnih pumpi, usvojeno je pet temperaturnih intervala za grejnu sezonu i tri temperaturna intervala za sezonu hlađenja. Temperatura radne tačke svakog intervala postavljena je tako da odgovara vrednostima temperature spoljašnjeg vazduha koje je proizvođač

naveo prilikom određivanja koeficijenta grejanja i grejne snage date toplotne pumpe u režimu grejanja i koeficijenta hlađenja i rashladne snage u režimu hlađenja. U tabeli 2 prikazane su vrednosti grejne i rashladne snage za dve paralelno povezane toplotne pumpe. Gornja i donja granica svakog intervala odabrane su proizvoljno, uz uslov da temperatura radne tačke bude unutar tih granica. Sezona hlađenja definisana je za temperature spoljašnjeg vazduha u temperaturnom intervalu od 24 do 35 °C, dok je granica grejanja usvojena u temperaturnom intervalu od -12 do 12 °C.

Na osnovu temperaturnih intervala prikazanih u prethodnoj tabeli za režim grejanja i hlađenja, konstruisani su dijagrami (Slika 3) koji prikazuju zavisnost kumulativnog broja sati (u kojima toplotna pumpa radi unutar definisanog temperaturnog intervala za zadatu radnu tačku) u funkciji temperature spoljašnjeg vazduha. Uočava se da sa porastom spoljašnje temperature vazduha opada površina ispod krive na gornjem dijagramu, koja predstavlja količinu toplote potrebnu za grejanje objekta u zimskom režimu, dok površina ispod krive na donjem dijagramu, koja predstavlja količinu toplote potrebne za hlađenje objekta, raste (Slika 3).



Slika 3: Prikaz zavisnosti kumulativnog stepena sata od temperature spoljnog vazduha za zimski režim (levo) i za letnji režim (desno)

Tabela 2: Prikaz izabranih temperaturnih segmenata za režim grejanja i režim hlađenja toplotne pumpe

Br. temperaturnog segmenta	Režim grejanja					Režim hlađenja		
	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3	Temp. segment 4	Temp. segment 5	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3
$\theta_{Hlim,j} [^{\circ}C]$	-12	-9	-3	3	9	24	27	30
$\theta_{Hlim,j} [^{\circ}C]$	-9	-3	3	9	13	27	30	35
Temperatura radne tačke [$^{\circ}C$]	-10	-7	2	7	12	25	28	32
$COP/EER [-]$	2,60	2,75	3,33	3,71	4,20	6,25	5,85	5,31
$\Phi_{gen,j} (\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out}) [kW]$	173,2	184,6	230	260	299	342,8	339,4	332,6

Tabela 3. Pregled ulaznih podataka za proračun parametara toplotne pumpe u režimu grejanja i režimu hlađenja za definisane temperaturne segmente

Br. temp. segment	Režim grejanja					Režim hlađenja		
	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3	Temp. segment 4	Temp. segment 5	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3
$DH_j [^{\circ}Ch]$	239	6682	23143	20202	6711	1454	2337	2036
$DH_{tot,j} [^{\circ}Ch]$	56977	56977	56977	56977	56977	5827	5827	5827
$f_j [-]$	0,004	0,12	0,41	0,35	0,12	0,25	0,40	0,35
$t_j [h]$	16	270	1230	1468	797	756	475	250
$t_{eff,j} [h]$	11	191	871	1040	565	347	218	115
$Q_{gen,out,j} [kWh]$	9,7	4712,9	74436,2	77584,3	14001,7	19152,9	19339,9	8888,2

Tabela 4. Pregled izračunatih energija u režimu grejanja i režimu hlađenja toplotne pumpe za definisane temperaturne segmente

Br. temperaturnog segmenta	Režim grejanja					Režim hlađenja		
	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3	Temp. segment 4	Temp. segment 5	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3
COP/EER	2,6	2,75	3,33	3,71	4,2	6,25	5,85	5,31
$Q_{gen,out,j} (\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out}) [kWh]$	9,7	4713	74436	77584	14001	19153	19340	8888
$E_{gen,in,j} (\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out}) [kWh]$	3	1504	22353	20912	3334	3064	3306	1674
$W_{gen,aux,j} [kWh]$	0,45	226	3353	3137	500	460	496	251
$Q_{gen,in,j} = Q_{gen,ren,in,j} [kWh]$	3	2012	52083	56672	10668	16089	16034	7214
$Q_{gen,aux,ls,j} [kWh]$	0,34	170	2515	2353	375	345	372	188
$Q_{gen,aux,ls,rbl,j} [kWh]$	0,10	51	754	706	113	104	112	56
$Q_{gen,ls,k,j} [kWh]$	0,08	41	744	776	140	192	193	89
$Q_{H,gen,ls,rbl,j} [kWh]$	0,02	12	223	233	42	-	-	-
$Q_{gen,ls,tot,j} [kWh]$	0,18	92	1499	1482	253	537	565	277
$Q_{H,gen,ls,rbl,tot,j} [kWh]$	0,13	63	978	939	155	-	-	-

III Prikaz proračunskih veličina po definisanim temperaturnim segmentima

U nastavku su, za prethodno definisane temperaturne segmente, prikazani ulazni i izvedeni proračunski parametri za režim grejanja i hlađenja toplotne pumpe. Za posmatrani objekat, u režimu grejanja, vreme prekida rada toplotne pumpe (t_{co}) tokom 24 sata iznosi 7 sati, dok u režimu hlađenja vreme prekida rada toplotne pumpe iznosi 13 sati. Vrednost koeficijenta $f_{gen,aux}$ za Bajinu Bašu i izabranu toplotnu pumpu iznosi 0,15 za sve temperaturne režime. U studiji slučaja ne razmatraju se priprema sanitarne tople vode niti akumulacija toplote u rezervoarima. Zbog ograničenja grejne snage, je neophodan za temperaturne

intervale 1 i 2. U tom slučaju, količina toplote koju rezervni grejač treba da preda u temperaturnim intervalima 1 i 2 iznosi $Q_{gen,bu,out}=621,07$ kWh.

IV REZULTATI

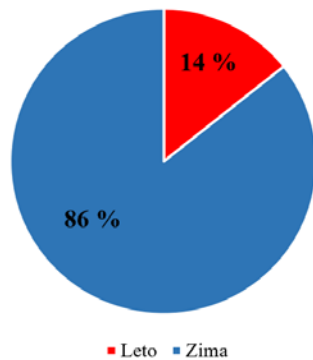
Određivanje ukupne potrošnje energije za rad toplotne pumpe za ukupni temperaturni interval, koji obuhvata energiju potrebnu za pogon toplotne pumpe ($E_{H,gen,in}$), energiju za pogon pomoćnih uređaja ($W_{H,gen,aux}$), energiju koju grejači predaju tokom njihovog rada ($E_{H,gen,bu,in}$), ukupne iskoristive toplote gubitke u podsistemu toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,rbl}$) i količinu toplote preuzetu od toplotnog izvora ($Q_{H,gen,ren,in}$) izračunava se

množenjem energije ili gubitaka za jedan sat sa brojem sati rada toplotne pumpe za definisani temperaturni interval. Sabiranjem vrednosti za svaki temperaturni interval dobijaju se vrednosti potrošnje navedenih vidova energije za čitavu sezonu grejanja i hlađenja.

Ukupne energetske potrebe toplotne pumpe za zimski i letnji režim prikazane su u Tabeli 5 i Tabeli 6.

Tabela 5. Ukupne energetske potrebe toplotne pumpe (zima)

Veličina	Oznaka	Potrošnja
Energija potrebna za pogon toplotne pumpe	$E_{H,gen,in}$	48106 kWh
Ukupni iskoristivi gubici toplote u podsistemu toplotne pumpe	$Q_{H,gen,ls,rbl,tot}$	2134 kWh
Ukupni gubici toplote ka okolini podsistema toplotne pumpe	$Q_{H,gen,ls,tot}$	3325 kWh
Količina toplote preuzeta od toplotnog izvora	$Q_{H,gen,ren,in}$	121438 kWh
Energija potrebna za rad pomoćnih uređaja	$W_{H,gen,aux}$	7216 kWh
Energija potrebna za rad rezervnih grejača	$Q_{gen,bu,out}$	621 kWh
Potrebna grejna snaga grejnog sistema	$Q_{H,gen,out}$	210,4 kW



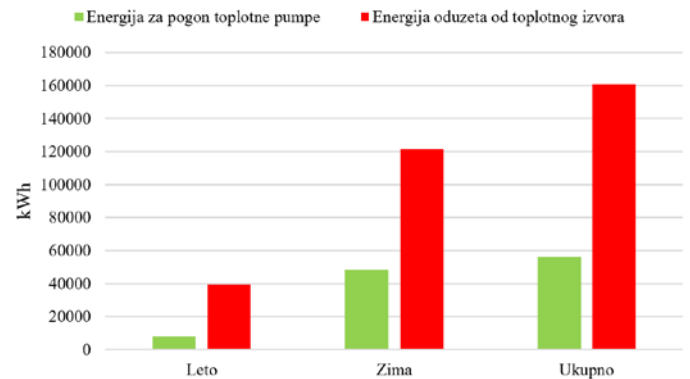
Slika 4. Udeo potrošnje energije za pogon toplotne pumpe tokom zimskog i letnjeg režima rada u ukupnoj energiji potrebnoj za pogon toplotne pumpe tokom cele godine

Tabela 6. Ukupne energetske potrebe toplotne pumpe (letno)

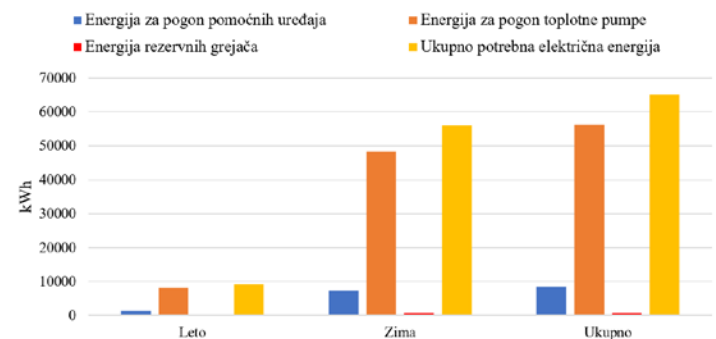
Veličina	Oznaka	Potrošnja
Energija potrebna za pogon toplotne pumpe	$E_{C,gen,in}$	8044 kWh
Ukupni dobici toplote podsistema toplotne pumpe od okoline	$Q_{C,gen,ls,tot}$	1379 kWh
Količina toplote preuzeta od toplotnog izvora	$Q_{C,gen,ren,in}$	39337 kWh
Energija potrebna za rad pomoćnih uređaja	$W_{C,gen,aux}$	1207 kWh
Potrebna rashladna snaga rashladnog sistema	$Q_{C,gen,out}$	221,2 kW

Na Slici 4 je prikazan udeo potrošnje energije za pogon toplotne pumpe tokom zimskog i letnjeg režima rada u ukupnoj energiji potrebnoj za pogon toplotne pumpe tokom cele godine, pri čemu se 86% ukupne energije potrebne za pogon toplotne pumpe odnosi na zimski, a 14% na letnji režim rada. Ovaj odnos je

posledica činjenice da je broj radnih sati toplotne pumpe veći u zimskom nego u letnjem režimu, kao i da je prekid rada objekta duži u letnjem nego u zimskom režimu rada.



Slika 5: Potrošnja energije za pogon i energija oduzeta od strane toplotnog izvora



Slika 6: Ukupno potrebna električna energija (za pogon toplotne pumpe, pomoćnih uređaja i rezervnog grejača)

Tabela 7. Ukupne godišnje energetske potrebe toplotne pumpe

Na Slici 5 i Slici 6 je vizuelno prikazan odnos potrošnje svih relevantnih vrsta energije u letnjem i zimskom režimu, a u Tabeli 7. ukupne godišnje energetske potrebe toplotne pumpe

Veličina	Oznaka	Potrošnja
Energija potrebna za pogon toplotne pumpe	$E_{gen,in}$	56150 kWh
Ukupni iskoristivi gubici toplote u podsistemu toplotne pumpe	$Q_{gen,ls,rbl,tot}$	2134 kWh
Ukupni gubici toplote podsistema toplotne pumpe	$Q_{gen,ls,tot}$	4704 kWh
Količina toplote preuzeta od toplotnog izvora	$Q_{gen,ren,in}$	160775 kWh
Energija potrebna za rad pomoćnih uređaja	$W_{gen,aux}$	8423 kWh
Energija potrebna za rad rezervnih grejača	$Q_{gen,bu,out}$	621 kWh
Proračunata količina toplote u jedinici vremena za nadoknadu gubitaka toplote objekta (toplotni gubici)	$Q_{H,gen,out}$	210,4 kW
Proračunata količina toplote u jedinici vremena, koju je tokom leta potrebno odvesti iz prostorije (toplotno opterećenje)	$Q_{C,gen,out}$	221,2 kW

VI ZAKLJUČAK

U radu su predstavljene teorijske osnove, koncept i metodologija proračuna godišnje potrošnje energije potrebne za pogon toplotne pumpe po tzv. metodi temperaturnih segmenata (eng. bins). Proračun je sproveden na konkretnom primeru objekta Upravne zgrade EPS AD Ogranka „Drinsko-Limske“ HE u Bajinoj Bašti, ali tako da su uzete u obzir samo potrebe grejanja i hlađenja ovog objekta, a ne i priprema sanitarne tople vode.

Kako ova metoda, za razliku od metode stepen dana, po segmentima temperatura uzima u obzir promene koeficijenta grejanja *COP*, odnosno koeficijenta hlađenja *EER*, u zavisnosti od temperature spoljašnjeg vazduha i tokom sezone grejanja i sezone hlađenja, jasno je da ona daje kvalitetnije i preciznije proračune potrošnje energije potrebne za pogon toplotne pumpe.

Pored toga, na osnovu rezultata datog proračuna može se primetiti da je potrebno značajno više električne energije za pogon toplotne pumpe u zimskom u odnosu na letnji režim iz razloga što potrošnja električne energije za pravilno dimenzionisanu toplotnu pumpu najviše zavisi od broja sati u toku sezone (grejanja ili hlađenja). Za ovaj konkretan slučaj potrošnja električne energije je skoro pet puta veća u zimskom režimu u odnosu na letnji režim, usled većeg broja sati rada toplotne pumpe u zimskom režimu, kao i dužeg prekida u radu objekta u zimskom u odnosu na letnji režim.

ZAHVALNICA

Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-136/2025-03/ 200105 od 04.02.2025. god

LITERATURA

- [1] Ostrovski, N. Toplotne pumpe - mogućnosti i perspektive, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 11, No. 3-4, pp. 25-29, 2009.
- [2] Banjac, M., Kulić, F., Genić, S., Stamenić, M., Čantrak, Đ., Ilić, D., Janković, N., Miliwojević, A., Otović, M., Zlatanović, I., Gvozdenac Urošević, B., Urošević, D., Adžić, V., Josipović, S., Jošić, P., Galić, R., Vasilev, M., Petrović, B., Kovačević, S. *Priručnik za obuku energetskih savetnika*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2025.

- [3] Guo, J., Yan, D., Zhang, Q. Data-driven heat pump retrofit analysis in residential buildings, *Applied Energy*, Vol. 370, 123999, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123999>
- [4] Tang, Y., Li, J., Xu, X. Numerical study on carbon emissions and economics of a heat pump & thermal energy storage system, *Energy*, Vol. 302, 131862, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131862>
- [5] Zuberi, M.J.S., Hasanbeigi, A., Morrow, W. Techno-economic evaluation of industrial heat pump applications in US pulp and paper, textile, and automotive industries, *Energy Efficiency* Vol. 16, 19, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10089-6>
- [6] Josijević, M., Gordić, D., Vukašinović, V., Nikolić, J., Živković, D. Tehno-ekonomska analiza zamene električnog kotla toplotnom pumpom vazduh-voda za zagrevanje stambenog prostora, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 4, pp. 42-47, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-4.421>
- [7] SRPS EN 15316-4-2:2017, *Energetske performanse zgrada – Metoda za proračun zahteva energetskog sistema i efikasnosti sistema – Deo 4-2: Sistemi za proizvodnju topline za grejanje prostora, sistemi toplotnih pumpi, moduli M3-8-2, M8-8-2*, Institut za standardizaciju Srbije, 2017. https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:56969 [pristupljeno 26.02.2025]
- [8] Petrović, B., Gojak, M. Analytical Assessment of Cooling Degree-Days for Estimating Energy Consumption in Building Sector During Cooling Season in Belgrade, in *Proc. SimTerm 2024*, Niš, Serbia, pp. 188-196, 22-25 October, 2024. <https://doi.org/10.5937/SimTerm24188P>
- [9] Dović, D., Horvat, I., Rodić, A., Soldo, V., Švaić, S. *Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama; Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [10] Naldi, C., Dongellini, M., Morini, G.-L., Zanchini, E. Comparison between hourly simulation and bin-method for the seasonal performance evaluation of electric air-source heat pumps for heating, in *Proc. Proceedings of BSA 2015, the Second IBPSA-Italy conference on "Building Simulation Applications"*, Bolzano, pp. 252-262, 04-06 February, 2015. https://publications.ibpsa.org/proceedings/bsa/2015/papers/bsa2015_9788860460745_32.pdf [pristupljeno 28.02.2025]
- [11] Photovoltaic Geographical Information System, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html [pristupljeno 03.03.2025]

AUTORI

Branislav Petrović - istraživač pripravnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, bpetrovic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-2429-0642](https://orcid.org/0000-0002-2429-0642)

Marija Vasilev - asistent, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mvasilev@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6156-2451](https://orcid.org/0000-0001-6156-2451)

Miloš Banjac - prof. dr, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mbanjac@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-8659-8581](https://orcid.org/0000-0001-8659-8581)

Calculation of Annual Energy Consumption of a Heat Pump by the Bin-method

Abstract - Heat pumps are electrical devices that transfer thermal energy from the environment into a heated space. Thanks to their ability, compared to electric resistance heaters, to deliver three to six times more thermal energy to the conditioned space, heat pumps represent an unrivaled solution in heating technology in terms of efficiency. When the thermal energy source is outdoor air — as in the case of air-to-air heat pumps — their efficiency directly depends on the temperature of the outdoor air. Therefore, the assessment of the total energy consumption of a heat pump must be based on a methodology that takes into account the variation of this temperature. According to Standard EN 15316, two methods are defined for determining the total energy consumption of a heat pump: the degree-day method and the temperature-bin method. In domestic practice, only the simpler and less accurate degree-day method is used. The temperature-bin method, although more reliable, has remained almost unknown, probably due to the need for hourly outdoor air temperature data.

To present and bring this method closer to engineering practice, the paper describes the theoretical background and outlines the main steps of the method, while its application is demonstrated through a case study of the EPS AD office building in Bajina Bašta. By grouping actual hourly outdoor air temperature data into temperature bins and linking

them with the operating points of the heat pump, while including the operation of auxiliary equipment and backup heaters, the total annual electricity consumption was determined. The obtained consumption of 56,150 kWh of electricity — of which 86% occurs in the heating and 14% in the cooling mode — clearly indicates the dominant influence of winter hours on total energy use.

Index terms - Bin-method, Energy analysis calculation method, Heat pump, Annual energy consumption