Uvod

Električne toplotne pumpe predstavljaju originalno rješenje za provođenje mjera racionalnog korištenja obnovljivih i drugih izvora energije. Mogu biti najrazličitijih kapaciteta i oblika. Kapacitet ovisi o potrebama vojnog objekta, a oblici se prilagođavaju uslovima postavljanja. Bolje je izrađivati sisteme klimatizacije sa više odvojenih termoelektričnih jedinki. Time se znatno smanjuje buka u cijevima kroz koje struji vazduh, a pojednostavljuje se priključivanje na izvor napajanja. Svaka jedinka u sistemu čini potpuno odvojeno postrojenje i radi neovisno o drugim, a sve zajedno obezbeđuju potrebni toplotni kapacitet.

Toplotni kapacitet u funkciji temperature

Za ugradnju električne toplotne pumpe, kao modela za klimatizaciju objekata različitih namjena, potrebno je poznavati nekoliko značajnijih veličina:

— toplotnu snagu koju model može da primi ili preda [W];

— jačinu struje koja se propušta kroz model [A];

— maksimalnu vrijednost temperaturne razlike između toplog i hladnog spoja [°K];

— električnu snagu izvora napajanja [W].

Toplotna snaga koja se može predati zahvaljujući efektu Peltiera proporcionalna je Sebekovom koeficijentu, temperaturi hladne, odnosno vruće strane i jačini električne struje koja se propušta kroz element:

$$Q = \pi I = a \cdot T \cdot I \quad (1)$$

Zbog električnog otpora u elementu se pri proticanju električne struje javlja tzv. Džulova toplota. Tako, u području grijanja, ova toplota uvećava ukupni učinak (ima pozitivan predznak), a u području hlađenja umanjuje ukupni učinak (ima negativan predznak). Polovina Džulove toplote odlazi na toplu, a polovina na hladnu stranu Peltierovog elementa:

$$Q = a \cdot T \cdot I \pm 0,5 I^2 R \quad (2)$$

Zbog prirodnog provođenja toplote kroz spojeve termoelementa dolazi do stvaranja toplote Q_{pp} , koja ima iste predznake kao i Džulova toplota. Ona je proporcionalna koeficijentu toplotne provodljivosti i temperaturne razlike:

$$Q = k (T - T_0) \quad (3)$$

Ukupna toplota koju termoelektrični element može da primi — preda može se predstaviti izrazom:

$$Q = a T I \pm 0,5 I^2 R - k(T - T_0) \quad (4)$$

$$k = (\lambda_1 S_1 / l_1 + \lambda_2 S_2 / l_2) \quad (5)$$

gde su:

λ_1 i λ_2 — koeficijenti provođenja toplote jednog i drugog materijala od kojeg su napravljeni termoelementi [W/mK];

S_1 i S_2 — površine presjeka jednog i drugog materijala [m²];

l_1 i l_2 — dužine jednog i drugog materijala [m].

Za gotove modele električnih toplotnih pumpi uzima se ukupni koeficijent toplotne provodljivosti [1].

Kao što se iz jednačine (1) i (2) vidi, toplotna snaga koju jedan termoelement može da primi — preda u direktnoj je zavisnosti od jačine električne struje:

$$I = a T / R \quad (6)$$

Analizom jednačine (6) vidi se da je jačina električne struje u direktnoj zavisnosti od temperature na hladnoj, odnosno toploj strani. Dobijena vrijednost jačine električne struje omogućava najveće odavanje toplote. Pri tome se dobiju i najveće temperaturne razlike između tople i hladne strane:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\max} &= 0,5 \cdot a^2 \cdot T_0^2 R / R^2 k = \\ &= 0,5 a^2 T_0^2 / R k; a^2 / R k = z \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta T_{\max} = 0,5 \cdot z \cdot T_0^2 \quad (8)$$

Uvrštavanjem jednačine (6) u jednačinu (4) dobijemo jednačinu za maksimalnu toplotu koju Peltierov element može da primi/preda u jedinici vremena:

$$Q_{\max} = (0,5 \cdot a^2 \cdot T_0^2 / R) - k \cdot \Delta T \quad (9)$$

odnosno

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= k(\Delta T_{\max} - \Delta T) = k \cdot \\ &\cdot \Delta T_{\max}(1 - \Delta T / \Delta T_{\max}) \end{aligned} \quad (10)$$

Jednačine (9) i (10) predstavljaju toplotnu snagu koju Peltierov element može da oda u režimu hlađenja [2].

Električna snaga napajanja termoelektričnog elementa može se odrediti iz izraza:

$$P = a \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R \quad (11)$$

Uvrštavajući vrijednosti jednačina (6) i (8) u jednačinu (11) dobijamo:

$$P = 2k\Delta T_{\max}(1 + \Delta T / \Delta T_{\max}) \quad (12)$$

Jačina električne struje u optimalnom režimu rada izražena je izrazom:

$$I_{\text{opt}} = \Delta T \cdot I / \Delta T_{\max} \quad (13)$$

a toplotnu snagu

$$Q_{\text{opt}} = \Delta T \cdot Q_{\max} / \Delta T_{\max} \quad (14)$$

Regulacija kapaciteta električnih toplotnih pumpi

Kao i kod mehaničkih, tako i kod električnih toplotnih pumpi, zbog promjenljivih vanjskih uslova potrebno je mijenjati toplotni kapacitet. Povećani toplotni kapacitet je potreban u modusu grijanja pri smanjivanju vanjske temperature, kao i zbog pokrivanja gubitaka. U modusu hlađenja kapacitet se povećava, ukoliko se vanjske temperature povećavaju. Potrebni toplotni kapacitet kod električnih toplotnih pumpi reguliše se mnogo jednostavnije nego kod mehaničkih toplotnih pumpi. Toplotni kapacitet je u funkciji jačine električne struje. Na slici 1 dat je prikaz zavisnosti toplotne snage Q i koeficijenta korisnog dejstva od jačine električne struje. U području malih struja i pri njihovom povećavanju dolazi i do povećavanja toplotne snage koja se toplotnom pumpom ostvaruje i do povećanja koeficijenta korisnog dejstva. Pri višim strujama koeficijent korisnog dejstva opada [3].

Pri izradi termoelektrične jedinice vodi se računa da ona može zadovoljiti

Sl. 1 Ovisnost toplotne snage i koeficijenta korisnog dejstva o jačini električne struje

u toplotnim potrebama, uz što viši stepen korisnog dejstva.

Na regulaciju kapaciteta utiču i odgovarajući toplotni gubici u samim vazдушnim kanalima. Na slici 2 prikazan je grafik koji pokazuje kako se povećava toplotni učinak povećavanjem jačine električne struje, odnosno kako se on smanjuje povećavanjem dužine vazдушnih kanala koji za jedan model iznose čak 15%. Ovi gubici mogu se smanjiti upotrebom Vidasila za izolaciju vazдушnih kanala.

Analizom grafika (sl. 1 i sl. 2) zaključuje se da porast toplotnog kapaciteta nije linearan sa porastom jačine

Sl. 2 Ovisnost korisne snage o stalnoj električnoj struji pri promjeni dužine vazдушnih kanala

električne struje. U području viših struja za istu promjenu struje brže se mijenja snaga grijanja nego u području nižih struja.

U području suviše niskih i visokih temperatura raste potreba za toplotom, zbog čega koeficijent korisnog djelovanja naglo opada. Eksperimenti pokazuju da je koeficijent korisnog djelovanja znatno viši u području grijanja nego u području hlađenja (sl. 3).

Sl. 3 Ovisnost koeficijenta korisnog djelovanja o jačini električne struje u području grijanja i hlađenja

Regulacija kapaciteta električnih toplotnih pumpi se, uglavnom, svodi na kontinuiranu regulaciju jačine električne struje koja je u funkciji od potrebnog kapaciteta. Regulacija se izvodi istovremeno na svim termoelektričnim jedinkama modula.

Tipovi električnih toplotnih pumpi

Tip električne toplotne pumpe, prije svega, zavisi od sredine kojoj se uzima ili predaje toplota. Te sredine su najčešće vazduh i voda, koje smatramo obnovljivim izvorima toplote. Ovisno o sredinama, u upotrebi su sledeći tipovi električnih toplotnih pumpi:

— voda-voda je tip električnih toplotnih pumpi gdje se hladna strana nalazi u vodi od koje oduzimamo toplotu u modusu grijanja. To su riječne, jezerske, podzemne ili druge vode. Oduzeta toplota se posredstvom električne snage »pumpa« na drugu, vruću stranu. Ona je, najčešće, u struji vode zatvorenog sistema. Temperatura vruće strane je viša od temperature vode, te joj predaje uzetu toplotu od vode na drugoj strani. Ovaj proces odgovara modusu grijanja. U modusu hlađenja proces je obrnut, što se postiže promjenom smjera protoka električne struje kroz električnu toplotnu pumpu;

— voda-vazduh je tip toplotne pumpe kod koje je na primarnoj strani voda od koje se uzima toplota i predaje vazduhu koji je na sekundarnoj strani kao prenosilac toplote u prostoriju koja se grije;

— vazduh-voda je tip električne toplotne pumpe kojom toplotu uzimamo od vazduha koji struji preko hladne strane (sl. 4) i predajemo je vodi koja struji preko izmenjivača na vrućoj strani. U ovom slučaju voda je prenosilac toplote do prostorije koju grijemo. Ovaj tip toplotne pumpe može se koristiti za grijanje vode u rezervoarima (bojlerima), te se mogu preporučiti za pri-

mjenu i na željeznici, u toaletima putničkih vagona i vagonima-restoranima za obezbjeđenje tople potrošne vode;

Sl. 4 Toplotna pumpa tipa vazduh-voda

— vazduh-vazduh je tip električne toplotne pumpe kod koje i sa hladne i sa vruće strane struji vazduh. Ovaj tip pumpi našao je primjenu kod pokretnih objekata klimatizacije, kao što su željeznički putnički vagoni, autobusi, kamioni, avioni i letjelice. Na slici 5 dat je prikaz, odnosno izgled, jedne električne toplotne pumpe koja ima sa obje strane vazdušne izmjenjivače toplote koji su dani tako da se ova pumpa može lako koristiti kao pregradni zid prostorije ili dio stropa.

Sl. 5 Toplotna pumpa tipa vazduh-vazduh

Tipovi pumpi voda-vazduh i vazduh-voda su, u stvari, ista električna toplotna pumpa, samo sa promjenjenim smjerom struje kroz poluprovodničke materijale.

Sistemi električnih toplotnih pumpi

Električne toplotne pumpe mogu se koristiti za klimatizaciju objekata najrazličitijih namjena, kao što su:

- monovalentna, i
- bivalentna postrojenja.

Monovalentna postrojenja podmirivala bi cjelokupne potrebe objekta za toplotom i hladnoćom. To bi iziskivalo izradu toplotnih pumpi velikih snaga, gdje mogu da rade pri velikoj temperaturnoj razlici. Razumije se da bi izrada ovakvih pumpi pri sadašnjoj tehnologiji izrade termoelektričnih materijala bila neekonomična. Drugi razlog su suviše velike dimenzije, što otežava ugradnju.

Pored pomenutih problema, javlja se i problem dužine zagrijavanja objekta prije korištenja. Zbog toga se preporučuje upotreba toplotnih pumpi kao bivalentna postrojenja. Kako kod mehaničkih, tako i kod električnih toplotnih pumpi postoji:

- bivalentno alternativni, i
- bivalentno paralelni sistem rada.

Mnogo je podesniji bivalentno paralelni sistem rada sa drugim grijanjem kao dodatnim.

Snaga grijanja termoelektrične jedinice (TEJ)

Snagu grijanja jednog termoelektričnog elementa možemo dobiti izrazom:

$$Q_g = aIT + 0,5I^2R - k\Delta T$$

Prvi član jednačine daje Peltierovu toplotnu snagu, a drugi Džulovu snagu. Ona iznosi 1/2 ukupne Džulove snage, jer se koristi samo ona toplotna snaga koja se rasporedi na toploj strani

termoelektričnog elementa. Treći član predstavlja gubitak toplotne snage zbog prirodnog provođenja toplote kroz zidove poluprovodnika [5].

Da bi se dobila potrebna toplotna snaga, potrebno je upotrijebiti veći broj termoelektričnih elemenata koji će zajedno obezbijediti potrebnu snagu. U tom slučaju dobijamo [6]:

$$Q_g = N(aIT + 0,5I^2R - k\Delta T) \quad (15)$$

Jačina električne struje koja je potrebna za obezbeđenje potrebne snage dobija se izrazom:

$$\begin{aligned} I &= aT_0\Delta T / R\Delta T_m \\ \Delta T_m &= 0,5zT_0^2 \\ I &= 1624 \Delta T / T_0 \end{aligned} \quad (16)$$

gdje je:

- ΔT_m — maksimalna temperaturna razlika koja se može dobiti na stranama poluprovodničkih elemenata [$^{\circ}\text{K}$];
- z — koeficijent efektivnosti koji iznosi 0,00025 [$^{\circ}\text{K}^{-1}$];
- R — električni otpor poluprovodničkih materijala koji iznosi 0,0001 Ω ;
- T — temperatura u objektu [293°K];
- T_0 — vanjska temperatura [$^{\circ}\text{K}$];
- k — koeficijent toplotne provodljivosti koji iznosi 0,062 [$\text{W}/^{\circ}\text{K}$];
- a — termoelektrični ili Peltierov napon koji ima vrijednost 0,0002 [$\text{V}/^{\circ}\text{K}$].

Uvrštavajući pomenute konstante u jednačinu za izračunavanje toplotne snage, dobijamo:

$$Q_g = N \cdot [96,59\Delta T / T_0 + 0,00005 (1624\Delta T / T_0)^2 - 0,062\Delta T] \quad (17)$$

Broj termoelektričnih jedinica N ovisi o toplotnoj potrebi prostorije koja se grije. Kad se za neku prostoriju od-

redi radna temperatura T_0 , onda je za odgovarajuće ΔT iz jednačine (17) lako izračunati potreban broj elemenata.

Snaga hlađenja termoelektrične jedinice

Kao i kod izračunavanja snage grijanja, tako i kod snage hlađenja koristimo se obrascem:

$$Q_h = aIT - 0,5I^2R - k\Delta T \quad (18)$$

s tom razlikom što se kod hlađenja Džulova toplotna snaga smatra gubitkom. Zbog toga se ispred člana te snage stavlja znak minus. Pomenuti obrazac koristi se za izračunavanje snage hlađenja jednog termoelektričnog elementa. Za dobijanje potrebne snage mora se uzeti u obzir N elemenata u serijskom spoju.

$$Q_h = N \cdot (aIT - 0,5I^2R - k\Delta T) \quad (19)$$

Uvrštavajući vrijednosti pojedinih veličina u jednačinu (19) dobijamo:

$$Q_h = N \cdot [96,59\Delta T/T_0 - 0,00005 (1624\Delta T/T_0)^2 - 0,062\Delta T] \quad (20)$$

Imajući u vidu da je T_0 minimalna temperatura, odnosno temperatura do koje se objekt želi hladiti, te da ona iznosi 293°K , imamo:

$$Q_h = N \cdot [96,59\Delta T/293 - 0,00005 (1624\Delta T/293)^2 - 0,062\Delta T] \quad (21)$$

Kao što se iz izraza vidi, snaga hlađenja je u funkciji ΔT . Ovaj se izraz koristi za izračunavanje snage hlađenja bez uticaja sunčevog zračenja.

Električna snaga grijanja i hlađenja TEJ

Da bi se dobila potrebna toplotna snaga termoelektrične jedinice (TEJ) potrebno je uložiti odgovarajuću električnu snagu grijanja. Ona se dobija iz izraza:

$$P_g = N \cdot (aI\Delta T + I^2R) \quad (22)$$

Prvi član predstavlja Peltierovu, odnosno termoelektričnu snagu jednog elementa. Potrebna snaga dobija se spajanjem N elemenata u termoelektričnu jedinku. Jačina struje koja je potrebna za obezbjeđenje odgovarajuće snage dobije se iz izraza:

$$I = aT_0\Delta T/R\Delta T_m \\ I = 1624 \cdot \Delta T/T_0 \quad (23)$$

Pri računanju struje koja je potrebna za obezbjeđenje određene toplotne snage, uzima se električni otpor jednog termoelementa. Kad se određuje električna snaga termoelektrične jedinice, mora se uzeti u obzir otpor termoelementa, spojeva sa obje strane i otpor vodova kojim se vežu elementi. Otpor ovakve jedne cjeline je $0,0007\Omega$ za $N = 1000$.

Uvrštavajući odgovarajuće vrijednosti konstanta u izraz (22), izraz za dobijanje odgovarajuće električne snage TEJ dobija oblik:

$$P_g = N \cdot [0,3248 \Delta T^2/T_0 + (1624 \Delta T/T_0)^2 \cdot 0,0007] \quad (24)$$

Kao što se iz izraza vidi, potrebna električna snaga termoelektrične jedinice je u funkciji temperaturne razlike ΔT .

Koeficijent korisnog dejstva električnih toplotnih pumpi

Koeficijent korisnog dejstva električnih toplotnih pumpi je odnos dobijene toplotne snage i uložene električne snage. Kod uređaja za klimatizaciju potrebno je da se odredi koeficijent korisnog dejstva u režimu grijanja i u režimu hlađenja.

U režimu grijanja potrebna toplotna snaga je u funkciji razlike temperature koju treba postići u objektu i vanjske temperature (ΔT). Koeficijent korisnog dejstva ima oblik:

$$K_g = Q_g/P_e \quad (25)$$

Najnepovoljniji režim rada TEJ je u slučaju kada je objekt prazan. Tada je potrebno savladati najveće temperaturne razlike. U slučaju kad u objektu borave ljudi, nastaju povoljniji režimi rada TEJ. To je zbog toga što zbog oslobađanja toplote ljudi opada potreba za toplotom, što uzrokuje savlađivanje manje temperaturne razlike i manje angažovanje električne snage.

Zbog uticaja sunčevog zračenja u određenim periodima u režimu grijanja, dolazi do smanjenja toplotnih potreba objekta za toplotom. Kao i kod prethodnog, tako i kod ovog slučaja, smanjuje se angažovana električna snaga potrebna za obezbeđenje odgovarajuće toplotne snage TEJ, jer je smanjena potreba za toplotom.

U režimu hlađenja koeficijent korisnog dejstva je nepovoljniji, zbog toga što za istu temperaturnu razliku koju treba postići u režimu hlađenja treba angažovati veću električnu snagu. Razlog je Džulova toplota koja je u režimu hlađenja štetna, a u režimu grijanja korisna. Zbog toga je uvijek za isto ΔT snaga hlađenja manja od snage grijanja. Koeficijent korisnog dejstva može se napisati u obliku:

$$K_b = Q_b / P_e \quad (26)$$

Najveću temperaturnu razliku moguće je savladati u najpovoljnijem re-

žimu rada, što važi i za režim grijanja, s tom razlikom što je ono što je u režimu grijanja povoljno u režimu hlađenja je nepovoljno. Tako je u režimu hlađenja najpovoljniji režim rada TEJ kad je objekt prazan. Nepovoljniji režimi nastaju u slučaju povećanja broja ljudi koji oslobađaju određenu toplotnu snagu, čime raste potreba za hladnoćom. To uzrokuje veće angažovanje električne snage. To se odnosi i na uticaj sunčevog zračenja.

Zaključak

Toplotni kapacitet električnih toplotnih pumpi ovisi o tipu pumpe, kao i o vrsti objekta klimatizacije. Određuje se na osnovu potreba za hladnoćom objekta, jer su one znatno veće od potreba za toplotom. Moguća je kontinuirana regulacija kapaciteta promjenom jačine struje u funkciji vanjske temperature, što kod postojećih klimapostrojenja nije moguće.

Rad električnih toplotnih pumpi je potpuno automatizovan. Ako se ima namu da im nije potrebno nikakvo održavanje, niti osoblje za rukovanje i upravljanje, onda je jasno kolike su im prednosti nad ostalim sistemima klimatizacije.

Literatura:

- [1] T. E. Pannkoke: »How the heat pump conserves energy resources«, Chicago, Illinois, 1983.
- [2] V. S. Martinovskij: »Cikli shemi i karakteristiki termotransformatorov«, Energija, Moskva, 1979.
- [3] J. G. Stockholm, P. Sternat: »Prototype thermo-electric air conditioning of a passenger railway coach«, Texas, 1982.

- [4] J. I. Bernard, L. P. Soulet, J. Willaime: »Les nouvelles voitures a compartiments VU75 de la SNCF«, Paris, 1975.
- [5] P. Sternat: »Le conditionnement d'air des nouvelles voitures a compartiments de la SNCF«, Paris, 1981.
- [6] G. Savanović: »Primjena električnih toplotnih pumpi za klimatizaciju željezničkih putničkih vagona«, magistarski rad, ETF Sarajevo.