

PRIMJENA SCROLL KOMPRESORA S MODULACIJOM RASHLADNOG UČINA U TEHNICI HLAĐENJA

APPLICATION OF SCROLL-COMPRESSORS WITH COOLING CAPACITY MODULATION IN REFRIGERATION ENGINEERING

DAMIR ŽILIĆ, ERIC WINANDY i GUY HUNDY,
Emerson Climate Technologies, Zagreb, Hrvatska

U radu je dano objašnjenje principa modulacije rashladnog učina kompresora „digital scroll“. Modulacija učina ostvarena je na mehaničkom principu, razdvajanjem spirala iz zahvata, a upravljanje je ostvareno pomoću PWM (eng. Pulse Width Modulation, hr. modulacija trajanjem pulsa). Opisano je kako se uz pomoć modulacije rashladnog učina i uz pomoć ubrizgavanja pare u procesu kompresije mogu ostvariti najviši, dosad nedostižni, koeficijenti hlađenja i pri tome imati punu mogućnost modulacije rashladnog učina. Scroll kompresori sa modulacijom učina primjenjuju se sa R-404a, R-407c i R410a, što ih čini primjenjivim u tehnici hlađenja, rashladnicima kapljevina, dizalicama topline, VRF sustavima itd. Posebice u rashladnim sustavima s R-404a, ostvarene su uštede energije zahvaljujući mogućnosti kontrole temperature isparavanja u granicama od $\pm 0,5$ K (postoje ispitivanja koja to potvrđuju). U kombinaciji s ubrizgavanjem pare (koje funkcionira i u trenucima smanjenog kapaciteta), ova tehnologija nudi najvišu dostupnu energetska efikasnost u ovome trenutku.

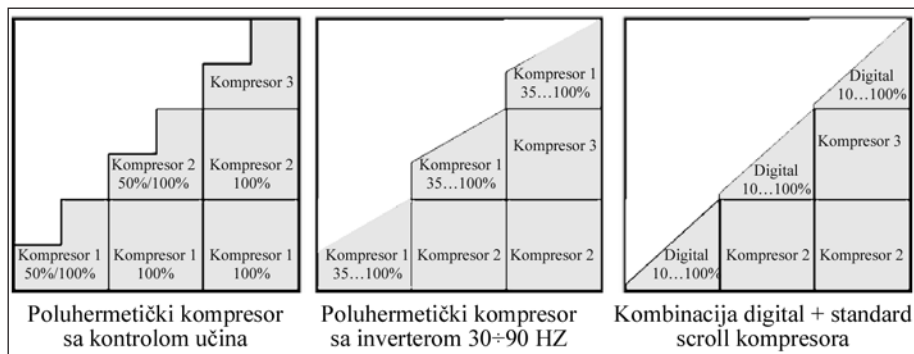
This paper deals with an explanation of the principle of cooling capacity modulation with a digital scroll compressor. Capacity modulation was achieved on the mechanical principle, by separating coils from the main body, and control was achieved by PWM (Pulse Width Modulation). The paper describes how, by cooling capacity modulation and by steam injection during the compression process, it is possible to attain the highest, until recently unattainable cooling coefficients and thereby have full possibility of cooling capacity modulation. Scroll compressors with capacity modulation are used with R-404a, R407c and R410a, which makes them usable in refrigeration engineering, liquid coolers, heat pumps, VRF systems, etc. Particularly with cooling systems with R-404a, energy savings were achieved owing to evaporation temperature control within the limits ± 0.5 K (verified by research). Combined with steam injection (which functions even at the time of reduced capacity), this technology offers the highest available energy efficiency at the moment.

Ključne reči: komercijalno hlađenje; kompresor „digital scroll“; ubrizgavanje pare; inverter; modulacija rashladnog učina; ušteda energije

Key words: commercial cooling; digital scroll compressor; steam injection; inverter; cooling capacity modulation; energy saving

1. Uvod

U rashladnim sustavima kompresor se bira tako da ima rashladni učin koji odgovara rashladnom učinku potrošača (isparivača) u projektnim uvjetima. U slučaju smanjenog zahtjeva potrošača (zima, noćni režim rada i sl.), rashladni učin kompresora može biti daleko viši od potrebnog, a i tlak isparavanja će značajno odstupati od željenog. U takvim slučajevima, javlja se potreba za modulacijom učina kompresora koja se u u praksi najčešće ostvaruje višekompresorskim rashladnim agregatima (VKRA), gdje se uključuju/isključuju pojedini kompresori, sa ciljem održavanja tlaka isparavanja što bliže željenom, tj. zadanom tlaku isparavanja. Kod poluhermetičkih kompresora učin je moguće modulirati i isključivanjem pojedinih cilindara ili grupa cilindara, ali modulacija je gruba (stepenasta) i ograničena na veće kompresore (sa 4 i više cilindara). Slijedeća mogućnost je primjena frekvencijskih pretvarača (*invertera*), koji omogućuju kontinuiranu modulaciju promjenom brzine vrtnje pogonskog elektromotora kompresora, ali takvi uređaji su skupi i složeni. Standardni scroll kompresori se ne mogu modulirati (u širem rasponu) pomoću frekvencijskih pretvarača, ali zato digital scroll tehnologija daje jednostavnu i efikasnu modulaciju učina u rasponu od 10% do 100% i pri tome se tlak isparavanja može držati u vrlo uskim granicama.



Slika 1. Utjecaj širine modulacijskog područja na finoću regulacije rashladnog učina

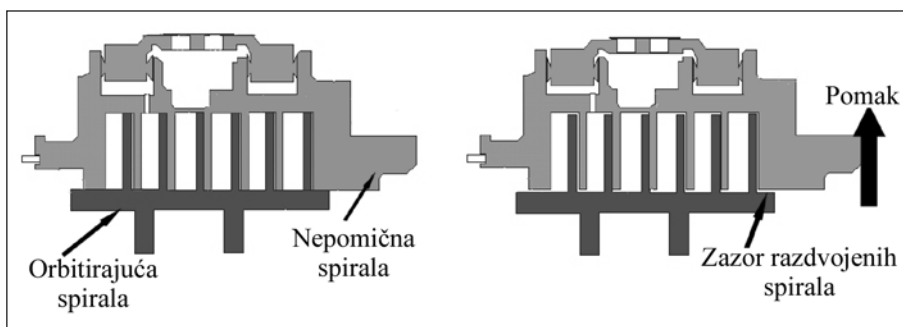
Što je širi raspon moduliranja učina:

- bit će manji broj pokretanja kompresora u jedinici vremena,
- sustav će biti stabilniji,
- preciznija je kontrola tlaka isparavanja,
- preciznija je kontrola temperatura u potrošačima (komore, klima-ormari, vitrine i sl.),

– jednostavnije je izvođenje instalacija sa više potrošača.

2. Princip rada kompresora digital scroll

Modulacija rashladnog učina postignuta je na vrlo jednostavan način. „Copelandovi“ scroll kompresori imaju jedinstvenu karakteristiku, tzv. aksijalne prilagodljivosti (*eng. axial compliance*), a ta karakteristika omogućuje mali aksijalni pomak ne-orbitirajuće spirale (~1 mm), tako da su spirale u stanju mirovanja (i u prvih nekoliko okretaja pri pokretanju) malo razmaknute, tako da se kompresor uvijek pokreće rasterećen. U toku rada kompresora, spirale su u zahvatu i u dodiru sa svojim kontaktnim površinama. Aksijalna i radijalna prilagodljivost služi kao zaštita kompresora od kapljevinskog udara i nečistoća. Ukoliko se u normalnom radu uspije isprovocirati razdvajanje spirala, doći će do prestanka komprimiranja, a elektromotor kompresora će nastaviti rotirati s nazivnim brojem okretaja, orbitirajući pomičnu spiralu kompresora. Ponovnim stavljanjem spirala u zahvat, počinje komprimiranje i kompresor se ponaša kao standardni.



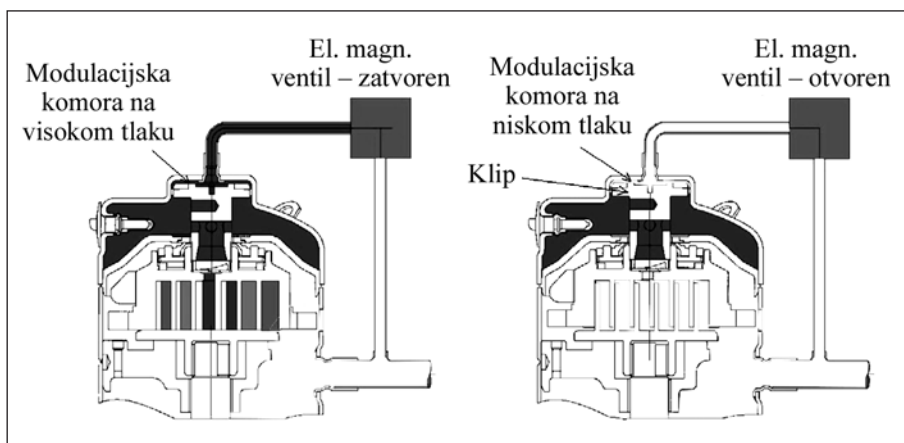
Slika 2. Podizanjem gornje (fiksne) spirale dolazi do razdvajanja spirala i prestanka kompresije

Naizmjenično podizanje i spuštanje gornje spirale, upravljano je PWM signalom. Elektronski kontroler kompresora digital scroll pomoću osjetnika tlaka na usisnom cjevovodu određuje oblik signala PWM, a regulirana veličina je tlak u usisnom cjevovodu (isto kao i kod VKRA).

U trenucima kada nema kompresije, brzina vrtnje elektromotora ostaje konstantna, tako da je i podmazivanje mazivim uljem neometeno.

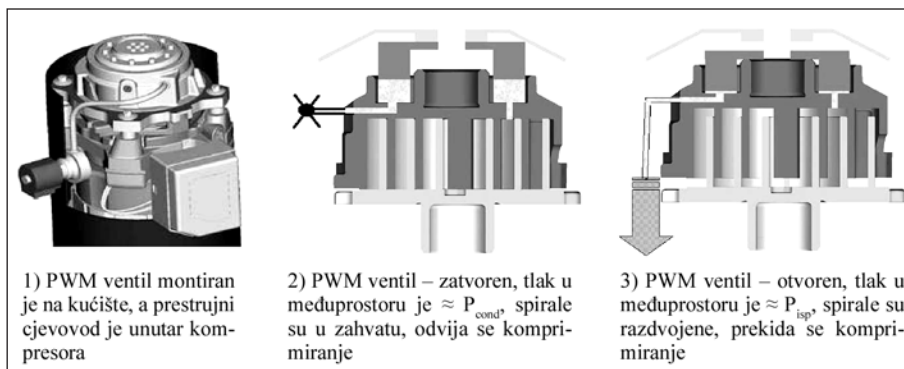
Kod kompresora manjih snaga (3–6 ks, tzv. modeli quantum i quest) modulacija je ostvarena pomoću modulacijskog klipa i PWM ventila, koji je montiran na prestrujni cjevovod s vanjske strane kompresora.

Mehanizam za podizanje gornje spirale dan je na slici 3. Na gornjoj strani spirale učvršćen je klip sa šupljom klipnjačom. Na lijevoj slici prikazan je kompresor u normalnom radu, sa spiralama u zahvatu. Nema razlika tlakova na modulacijskom klipu, elektromagnetski ventil (EMV) je zatvoren. Ukoliko se EMV otvori, dolazi do prestrujavanja plina iz modulacijske komore na usisnu stranu kompresora, dolazi do razlike tlakova na klipu, koji ga pomiču prema gore, a on sa sobom pomiče i fiksnu spiralu. Iako dolazi do prestrujavanja na usisnu stranu, to nije klasični by-pass, zato što dolazi do prestrujavanja vrlo malih količina radne tvari (promjer prestrujnog prvrtu u klipu je ~0,3 mm).



Slika 3. Položaj gornje spirale određuje klip koji se pomiče ovisno o razlici tlakova iznad i ispod klipa

Kod kompresora većih snaga (8 i 10 ks, tzv. modeli summit) modulacija je ostvarena kontrolom tlaka u prostoru ispod plivajuće brtve, pomoću PWM ventila koji je montiran na kućište kompresora, a prestrujni cjevovod je unutar kompresora (slika 4).

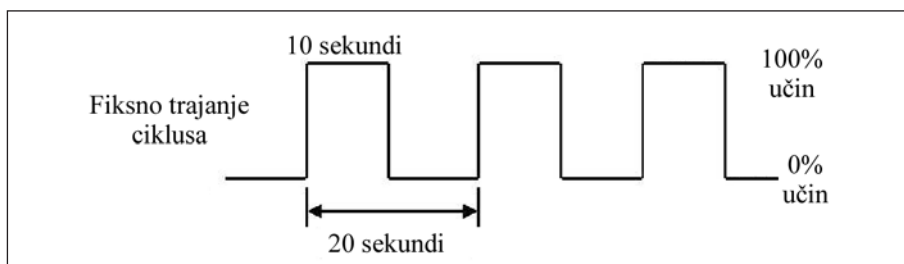


Slika 4. Položaj gornje spirale određuje tlak u međuprostoru ispod plivajuće brtve

Ovo naizmjenično razdvajanje i stavljanje u zahvat događa se u ciklusima od 20 sekundi. Trajanje vremena zahvata, grafički prikazano na slici 5, određuje rashladni učin kompresora. Kod tako kratkih vremenskih ciklusa, a i zbog termičke tromosti sustava, nema velikih odstupanja tlaka isparavanja.

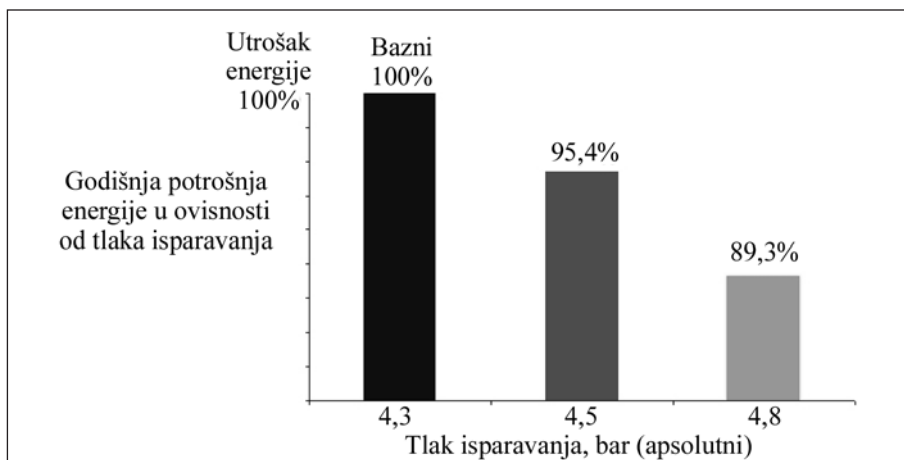
3. Prednosti

Korištenjem kompresora digital scroll odgovarajuće snage, možemo zamijeniti nekoliko kompresora iz VKRA. Zahvaljujući širokom rasponu modulacije, moguće je držati tlak isparavanja unutar užih granica, a time i viši prosječni tlak isparavanja, što dovodi i do energetske uštede.



Slika 5. Jednostavni digitalni signal koji upravlja podizanjem spirale

Postotna ušteda energije, kao rezultat povišenja tlaka isparavanja, dana je na slici 6. Povišenje tlaka isparavanja sa 4,3 na 4,5 bara (što odgovara $\sim 1^\circ\text{C}$) može se uštedjeti cca. 4,6% energije, npr. kod trgovačkog lanca sa 100 prodajnih mjesta, svaki sa agregatom od ~ 30 kW rashladnog učina, moguće je uštedjeti oko 20.000 EUR/godinu (uzimajući prosječne cijene energije na nivou EU). Ostvarit će se i manji broj pokretanja kompresora u jedinici vremena, što je također vrlo bitno, jer utječe na zamor materijala.



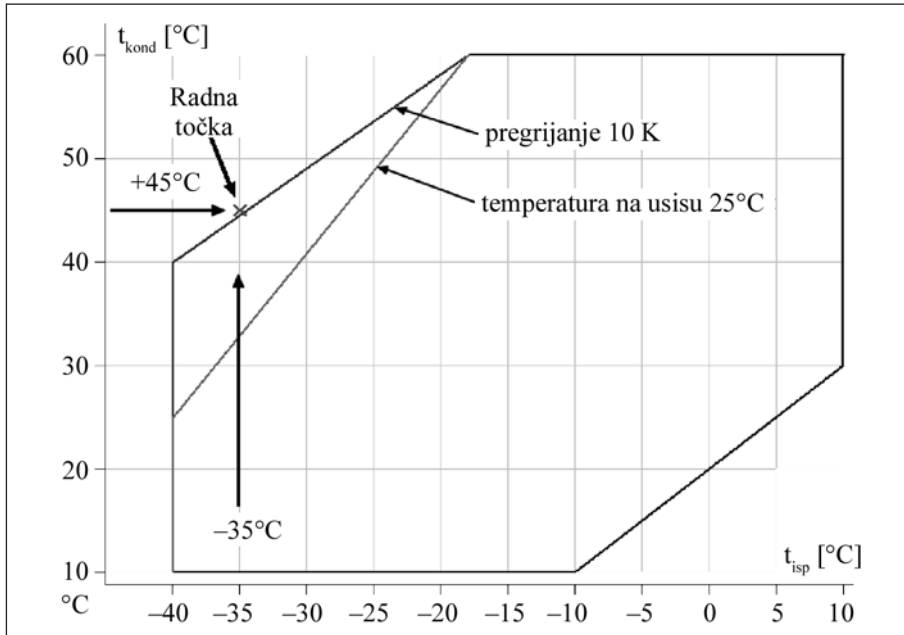
Slika 6. Ušteda energije kao rezultat povišenja tlaka isparavanja

Sve prije navedeno vrijedi za kompresore koji rade u području srednjih tlakova isparavanja (tzv. plus područje), međutim kod sistema koji rade na niskim tlakovima isparavanja prelazi se granica područja primjene (*eng. application envelope*) ovakve koncepcije scroll kompresora (slika 7).

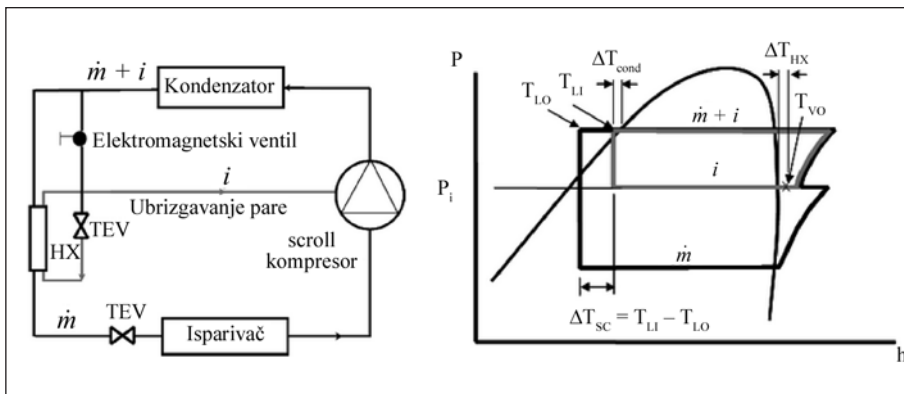
Kod standardnih jednostepenih scroll kompresora temperatura na kraju kompresije je previsoka i izlazi se izvan područja primjene i potrebno je primijeniti neki od načina pothlađivanja (ubrizgavanje kapljevine, pare i sl.). Princip i prednosti od ubrizgavanja pare u scroll kompresorima su poznati od ranije (slika 8).

Povećanje rashladnog učina i COP-a, ostvareno je pothlađivanjem kapljevine (ΔT_{HX}) u razmjenjivaču topline (HX). Pregrijana para se potom uvodi u kompresijski prostor, miješa sa radnom tvari u procesu kompresije i tako nastala mješavina

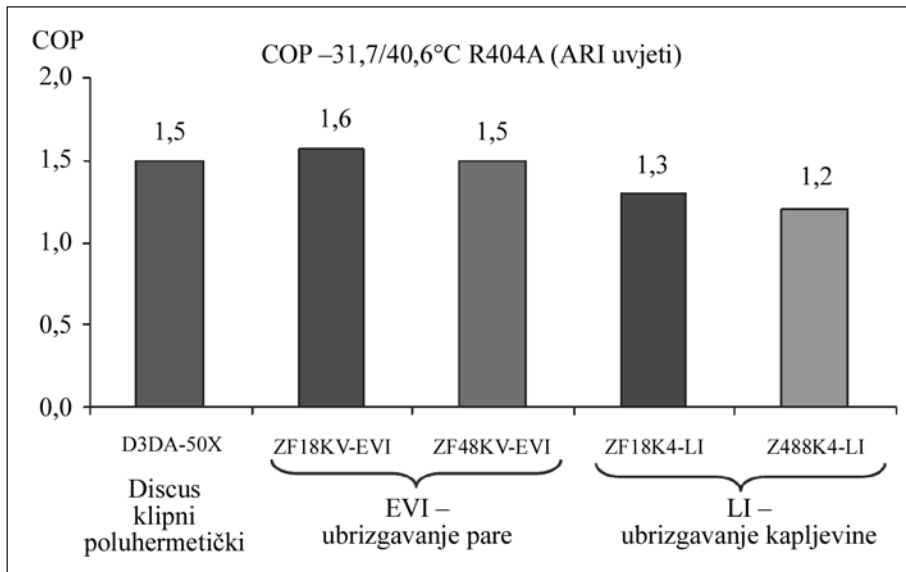
se nastavlja komprimirati. Temperatura na kraju kompresije je bitno niža (nego što bi bila bez ubrizgavanja pare). Osim toga, COP scroll kompresora sa ubrizgavanjem pare viši je nego kod poluhermetičkih klipnih kompresora ili kompresora s ubrizgavanjem kapljevine (slika 9).



Slika 7. Radna točka standardnog kompresora na niskim tlakovima isparavanja



Slika 8. Shema i P-h dijagram rashladnog kruga sa kompresorom s ubrizgavanjem pare (EVI). ΔT_{cond} – pothlađenje na kondenzatoru, T_{LI} – temp. kapljevine na ulazu u pothlađivač, T_{LO} – temp. kapljevine na izlazu iz pothlađivača, ΔT_{SC} – pothlađenje u pothlađivaču, ΔT_{HX} – pregrijanje na pothlađivaču, T_{VO} – temp. pregrijane pare na izlazu iz pothlađivača



Slika 9. Usporedba COP-a kod scroll kompresora sa ubrizgavanjem pare i kapljevine sa poluhermetičkim klipnim kompresorom

Međutim, sada je to dostupno u kombinaciji i sa digital scroll modulacijom, tako da kod modela ZFD18KVE nadmašuje bilo koji frekvencijski modulirani poluhermetički kompresor od 10 ks i pri tome ima šire područje modulacije (10–100%).

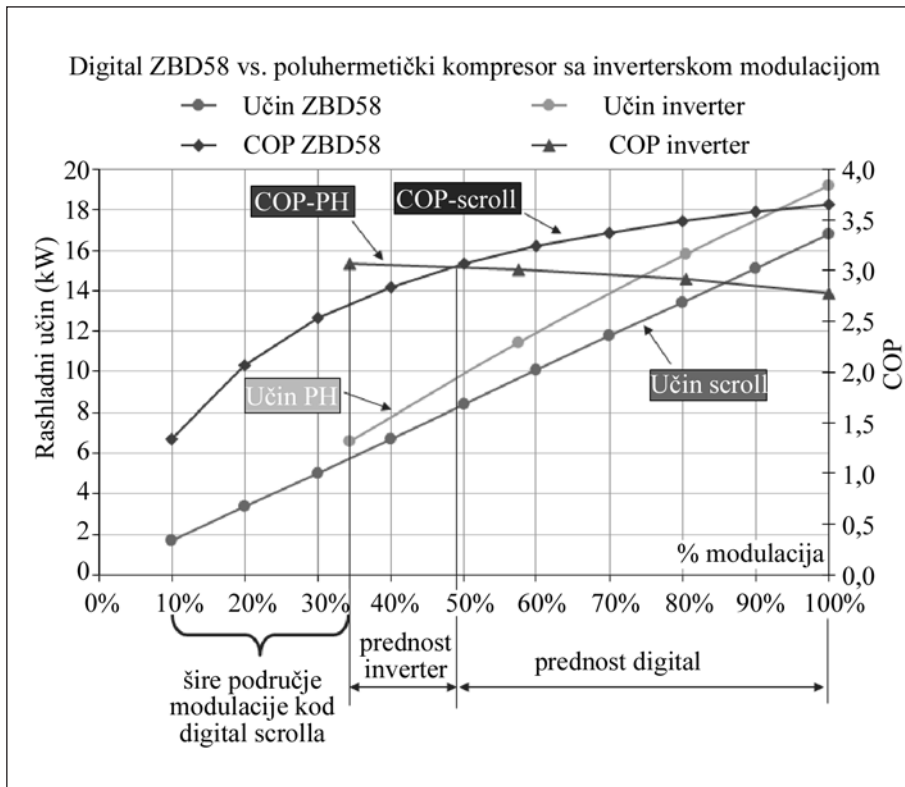
Do dolaska kompresora digital scroll, jedini praktični način kontinuirane modulacije učina bio je upotreba frekvencijskih pretvarača. Međutim, frekvencijski pretvarači imaju pogonske gubitke čineći te kompresore manje efikasnim od scroll kompresora u području iznad ~50% nazivnog učina (slika 10). Osim toga, poluhermetički kompresor reguliran frekvencijskim pretvaračem ima suženo područje primjene, što nije slučaj kod kompresora digital scroll, koji zadržava identično područje primjene kao i standardni kompresor.

Osim toga, frekvencijski pretvarači mogu pojačati rezonantne frekvencije kod nekih brzina vrtnje. Puno je jednostavnije i jeftinije primijeniti tehnologiju digital scroll, kada se od agregata zahtjeva kontinuirana modulacija učina.

4. Iskustva iz prakse

Kako bi se u praksi provjerila prednost kompresora s ubrizgavanjem pare (EVI), provedeno je uspoređivanje sa sustavom s „klasičnim“ agregatom. Prvo ispitivanje (2005. g.) provedeno je na jednom prodajnom mjestu poznatog britanskog lanca, gdje su uspoređivani agregati sa kompresorima s ubrizgavanjem kapljevine i ubrizgavanjem pare. Mjerenja su vršena na nekoliko točaka, svake 3 minute, tokom 14 mjeseci, gdje je dobiveno 269.000 pojedinačnih očitavanja. Tim mjerenjima, potvrđena je, između ostalog, i preciznost softvera *select* za odбир i kalkulaciju, kao i energetska ušteda, tako da je kompresor s EVI proglašen kao „compressor of choice“ za taj lanac.

Slično ispitivanje provedeno je i u Francuskoj (2007. g.), samo ovaj puta su se uspoređivali kompresori s EVI sa i bez digital scroll modulacije, kako bi se istražila



Slika 10. Usporedba COP-a kod digital scrolla i poluhermetičkog kompresora sa inverterom

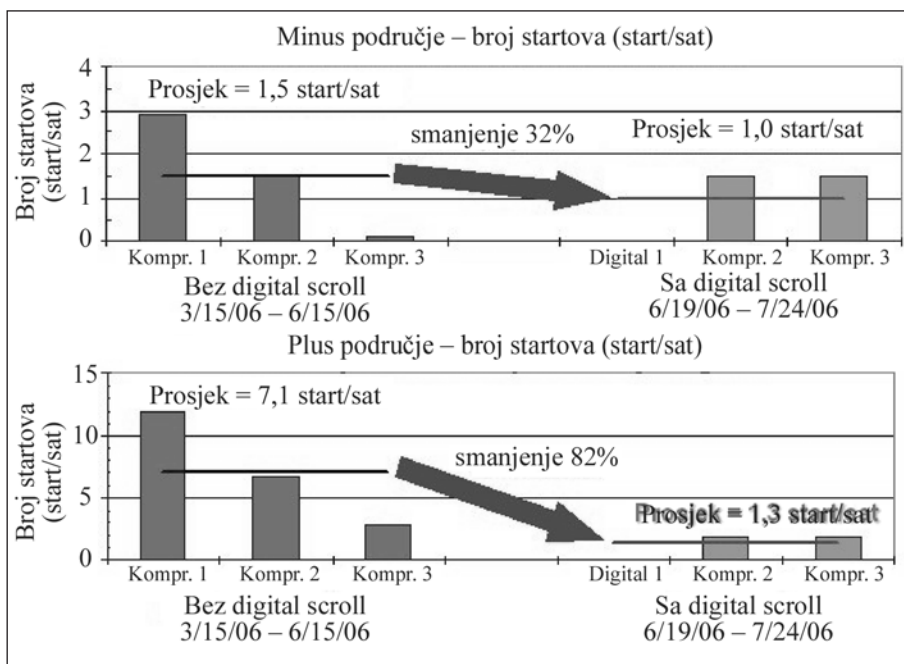
mogućnost daljnje uštede energije. U ovome slučaju, rashladni agregat za nisko područje isparavanja sastojao se od tri kompresora ZF18KVE (nemodulirani kompresor s EVI). Vršena su mjerenja tokom tri mjeseca. Zatim je vodeći kompresor zamjenjen s ZFD18KVE (EVI kompresor s digital scroll modulacijom). Digital scroll kompresor sa svojom mogućnošću smanjenja učina odmah je smanjio broj startova kompresora na minus području za 32% (slika 11).

Na plus području učinjeno je slično i instaliran je ZBD45K4E (digital scroll umjesto standardnog, oba bez ubrizgavanja pare) i broj startova smanjen je za iznenađujućih 82%.

Manji broj startova nije rezultirao samo smanjenim zamorom materijala, već i daleko boljom kontrolom temperature isparavanja i posljedično višom energetsom efikasnošću.

5. Zaključak

Modulacija rashladnog učina u rasponu od 10% do 100% sada je dostupna i na scroll kompresorima. Bazirana je na jednostavnom i vrlo pouzdanom mehaničkom principu, koji ne donosi rezonantne vibracije, niti električne smetnje.



Slika 11. Smanjenje broja startova primjenom kompresora digital scroll

6. Literatura

- [1] **Winandy, E. and G. Hundy**, 2005, *Vapour Injected Scroll Compressors in Commercial Refrigeration: Concept and Performance Evaluation*, IIR International Conference on Commercial Refrigeration, Vicenza, 2005.
- [2] **Winandy E. and G. Hundy**, 2005, *Scroll Compressors with Vapour Injection in Heat Pumps and Commercial Equipment*, Institute of Refrigeration, 2005–6.

kgg