

## NOVE ZAHTEVE GLEDE ENERGETSKE UČINKOVITOSTI GENERATORJEV HLADU S CENTRIFUGANIMI KOMPRESORJI

Avtor: Mitja LENASSI, univ.dipl.inž.str.



Razvoj vodno hlajenih generatorjev hladu se je v zadnjih letih osredotočil na izboljšanje energetske učinkovitosti tako pri polni kot pri delni obremenitvi. Tehnološki razvoj krmilnikov spremenljive hitrosti (VSDs – *Variable Speed Drives*) je dosegel mnogotere izboljšave in ti so sedaj našli pomembno vlogo tudi pri vodno hlajenih generatorjih hladu. Uporaba VSD-jev vodi k znatnemu znižanju rabe električne energije pri delnih obremenitvah, ki jo največkrat odraža vrednost integrirane delne obremenitve (IPLV), obrazložene v prvem okvirju. Možne so izboljšave IPLV vse do 30 %. Izboljšave IPLV pa obvezno spremljajo majhna zmanjšanja učinkovitosti pri delovanju pri polni obremenitvi, nazivno do največ 4 %. Zmanjšanje učinkovitosti pri polni obremenitvi je neločljivo povezano z elektronskimi pogonskimi izgubami in s filtri v napajalnih vodih. Na sliki 1 je prikazan primer generatorja hladu s centrifugalnim kompresorjem z že na ohišje prigrajenim VSD-jem.



Slika 1.

Standard ASHRAE 90.1-2010, ki predstavlja svetovno uveljavljeno pravilo stroke za energetske učinkovitosti stavb razen nizkih stanovanjskih,<sup>1</sup> že vključuje poseben dodatek k predhodni izdaji iz leta 2007, ki je sicer začel veljati z januarjem 2010. Dodatek je uvedel dodatno pot (ang. »Path«) zagotovitve skladnosti glede energetske učinkovitosti za vodno hlajene generatorje hladu. Pot A je sedaj tako namenjena primerom uporabe, kjer se pričakuje pretežno obratovanje pri polni obremenitvi, pot B pa je namenjena primerom uporabe pri pretežno delnih obremenitvah.<sup>2</sup> Skladnost generatorja hladu glede energetske učinkovitosti je mogoče doseči po kateri koli od obeh poti, pri tem pa je nujno, da sta izpolnjeni obe zahtevi ene od poti, to je za polno obremenitev (COP) in za integrirano delno obremenitev (IPLV).

ASHRAE 90.1-2010 pri centrifugalnih kompresorjih na novo dodaja še zahteve glede energetske učinkovitosti za velikost/vrsto nad ~2000 kW. V tabeli 1 so za vodno hlajene centrifugalne generatorje hladu podane trenutno veljavne zahteve glede energetske učinkovitosti po eni od dveh poti, znotraj rdečega polja so predstavljene zahteve za pot B.

Spremembe se posredno nanašajo tudi na slovensko TSG-1-004, saj ta dejansko povzema vrednosti COP in IPLV iz istega standarda, izdanega v letu 2004. Tabela 2 prikazuje vrednosti, ki jih za centrifugalne generatorje hladu predpisuje slovenska Tehnična smernica TSG-1-004 v svoji tabeli 2.

Equipment Type	Size Category	Units	Before 1/1/2010		As of 1/1/2010 <sup>c</sup>				Test Procedure <sup>b</sup>
			Full Load	IPLV	Path A Full Load	Path A IPLV	Path B Full Load	Path B IPLV	
Water-Cooled, Electrically Operated, Centrifugal	<528 kW	COP	≥5.000	≥5.250	≥5.547	≥5.901	≥5.504	≥7.815	ARI 550/590
	≥528 kW and ≤1055 kW	COP	≥5.550	≥5.900	≥5.547	≥5.901	≥5.504	≥7.815	
	≥1055 kW and ≤2110 kW	COP	≥6.100	≥6.400	≥6.100	≥6.401	≥5.856	≥8.792	
	≥2110 kW	COP	≥6.100	≥6.400	≥6.170	≥6.525	≥5.961	≥8.792	

Tabela 1.

<sup>1</sup> V izvirniku se standard imenuje »Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Building«. Nizke stanovanjske stavbe so po ameriški zakonodaji opredeljene kot stavbe s tremi ali manj etažami nad okolico, ki vključujejo tudi spalne namestitve, njihovi uporabniki pa so praviloma stalni (zadržijo se v njih 30 dni in več). Za nizke stanovanjske stavbe sicer velja ASHRAE Standard 90.2-2007.

<sup>2</sup> Običajno obratujejo generatorji hladu v poslovnih stavbah pri delnih obremenitvah, razen v določenih tehnoloških primerih.

Razlika glede predpisane zahtevane energetske učinkovitosti za generatorje hladu pri delnih obremenitvah (vrednost IPLV) za pot B po ASHRAE 90.1-2010 in slovensko smernico TSG-1-004 je precejšnja – za moči nad 1000 kW za **37,4 %** več, pri močeh pod 500 kW pa kar za **47,5 %**!

Vrsta generatorja hladu (GH)	EER	COP	ESEER	COP <sup>(1)</sup>	IPVL
Preskus po:	SIST EN 14511 <sup>3</sup>	SIST EN 14511	Euro vent	ARI 550/560/590	ARI 550/560/590
Vodno hlajeni GH – centrif. kompresor					
do 500 kW	–	–	5,2	5,0	5,3
od 500 do 1000 kW			5,8	5,6	5,9
nad 1000 kW			6,3	6,1	6,4

Tabela 2.

Equipment Type	Size Category	Subcategory or Rating Condition	Minimum Efficiency <sup>a</sup>	Test Procedure <sup>b</sup>
Water Cooled, Electrically Operated, Centrifugal	<528 kW		5.00 COP 5.25 IPLV	ARI 550/590
	≥528 kW and <1055 kW		5.55 COP 5.90 IPLV	
	≥1055 kW		6.10 COP 6.40 IPLV	

Tabela 3.

Tabela 3 prikazuje zahteve za centrifugalne hladilnike tekočin po ameriškem standardu iz leta 2004, ki jih slovenska smernica, kot že zapisano, povzema. Zaradi pomembne spremembe v izhodiščnem standardu, to je ostrejših zahtev glede energetske učinkovitosti za generatorje hladu s centrifugalnimi kompresorji s pretežnim delovanjem pri delnih obremenitvah, se zdi samoumevno upoštevati te zahteve pri načrtovanju in vgraditvi tovrstnih generatorjev hladu tudi pri nas, tehnično smernico pa bi bilo tudi smiselno posodobiti (ne samo v tem pogledu) z zadnjim stanjem tehnike.<sup>3</sup>

Standard 90.1-2010 pa omogoča tudi preračunavanje minimalnih zahtev glede energetske učinkovitosti za generatorje hladu s centrifugalnimi kompresorji za primere, ko ni predvideno delovanje pri standardnih pogojih ARI 550/590, to je z izstopno temperaturo hlajene vode 6,7 °C, vstopno temperaturo hladilne vode 29,4 °C in pretočno količino hladilne vode 0,054 l/s na kW. Preračun za zahtevani najnižji COP in NPLV v teh primerih se izvede po enačbah:

Prilagojena vrednost COP = COP iz tabele 6.8.1C \* K<sub>prilag</sub>  
Prilagojena vrednost NPLV = IPLV iz tabele 6.8.1C \* K<sub>prilag</sub>

$$K_{prilag} = A * B,$$

kjer je

$$A = 0,0000015318 * (LIFT)^4 - 0,000202076 * (LIFT)^3 + 0,0101800 * (LIFT)^2 - 0,264958 * LIFT + 3,930196$$

$$B = 0,0027 * LvgEvap + 0,982$$

$$LIFT = LvgCond - LvgEvap$$

LvgCond = izstopna temperatura hladilne vode pri polni moči (°C)

LvgEvap = izstopna temperatura hlajene vode pri polni moči (°C)

Preračun je mogoč v primerih, ko so delovni pogoji znotraj naslednjih omejitev:

- najnižja izstopna temperatura hlajene vode je 2,2 °C,
- najvišja izstopna temperatura hladilne vode je 46,1 °C,
- LIFT ≥ 11,1 °C in ≤ 44,4 °C.

Primer izračuna nestandardnih COP in NPLV je predstavljen v okvirju 2. V primeru, da je načrtovano delovanje generatorja hladu s centrifugalnimi kompresorji izven navedenih omejitev, in pa za primere, ko je hlajeni medij mešanica glikola in vode s točko zmrzovanja enako ali nižjo od -2,8 °C, postavljenih zahtev po energetske učinkovitosti ne pokriva ta standard.

<sup>3</sup> ASHRAE Standard 90.1 spada med tiste standarde, ki se posodablja nekajkrat na leto, vsakokrat z objavo potrjenega dopolnila, to pa omogoča, da standard neprestano sledi stanju tehnike. Vsake tri leta izide nova izdaja, ki vključuje vse predhodne dopolnitve in posodobitve. Takšen pristop bi bilo smiselno uvesti tudi za našo TSG.

### Kaj je IPLV?

IPLV (*Integrated Part Load Value*) je v standardu ARI 550/590<sup>4</sup> opredeljen kot številčno merilo kakovosti delovanja pri delni obremenitvi, izračunano na osnovi uteženega delovanja ob različnih delnih obremenitvah pri standardnih pogojih. Enačba za izračun je naslednja:

$$\text{IPLV} = 0,01 * \text{COP}_{100\%} + 0,42 * \text{COP}_{75\%} + 0,45 * \text{COP}_{50\%} + 0,12 * \text{COP}_{25\%}$$

COP (*Coefficient Of Performance*) je opredeljen kot razmerje hladilne moči v W in skupne električne vhodne moči v W pri enem od ocenjevalnih pogojev, izraženo v W/W.

Ocenjevalni pogoji za generator hladu so lahko standardni ali pa nestandardni. Standardni pogoji ocenjevanja, ki služijo izračunu vrednosti IPLV, so naslednji:

	100 % obremenitev	75 % obremenitev	50 % obremenitev	25 % obremenitev
<b>UPARJALNIK</b>				
Izstopna temperatura hlajene vode	6,7 °C	6,7 °C	6,7 °C	6,7 °C
Pretočna količina hlajene vode	0,043 l/s na kW			
Dodatek za dejavnik zamazanosti	0,000018 m <sup>2</sup> * K/kW			
<b>KONDENZATOR</b>				
Vstopna temperatura hladilne vode	29,4 °C	23,9 °C	18,3 °C	18,3 °C
Pretočna količina hladilne vode	0,054 l/s na kW			
Dodatek za dejavnik zamazanosti	0,000044 m <sup>2</sup> * K/kW			

### Kaj je NPLV?

Poleg vrednosti IPLV pozna standard ARI 550/590 tudi vrednost NPLV (*Non-Standard Part Load Value*), ki je opredeljena kot številčno merilo kakovosti delovanja pri delni obremenitvi, izračunano na osnovi uteženega delovanja ob različnih delnih obremenitvah, drugačnih od tistih pri standardnih pogojih:

$$\text{NPLV} = 0,01 * \text{COP}_{100\%} + 0,42 * \text{COP}_{75\%} + 0,45 * \text{COP}_{50\%} + 0,12 * \text{COP}_{25\%}$$

NPLV pride v poštev takrat, kadar je načrtovano obratovanje ob drugačnih pogojih od standardnih. To pomeni, da mora projektant določiti nestandardne pogoje tako za temperature hlajene in hladilne vode, obeh pretočnih vrednosti in dodatkov za dejavnik zamazanosti na strani uparjalnika in kondenzatorja.

**OKVIR 1**

<sup>4</sup>ARI (American Refrigeration Institute) se je leta 2007 preimenoval v AHRI (Air Conditioning, Heating and Refrigeration Institute).

## Primer izračuna zahtev za nestandardna COP in NPLV:

Generator hladu s centrifugalnim kompresorjem hladilne moči 2110 kW, pot A, tabela 6.8.1C:

- COP pri polni moči = 6,170
- IPLV = 6,525

Nestandardni delovni pogoji:

- Izstopna temperatura hladilne vode pri polni moči  $L_{vg}Cond = 37\text{ °C}$
- Izstopna temperatura hlajene vode pri polni moči  $L_{vg}Evap = 7\text{ °C}$

Preračun zahtevane energetske učinkovitosti:

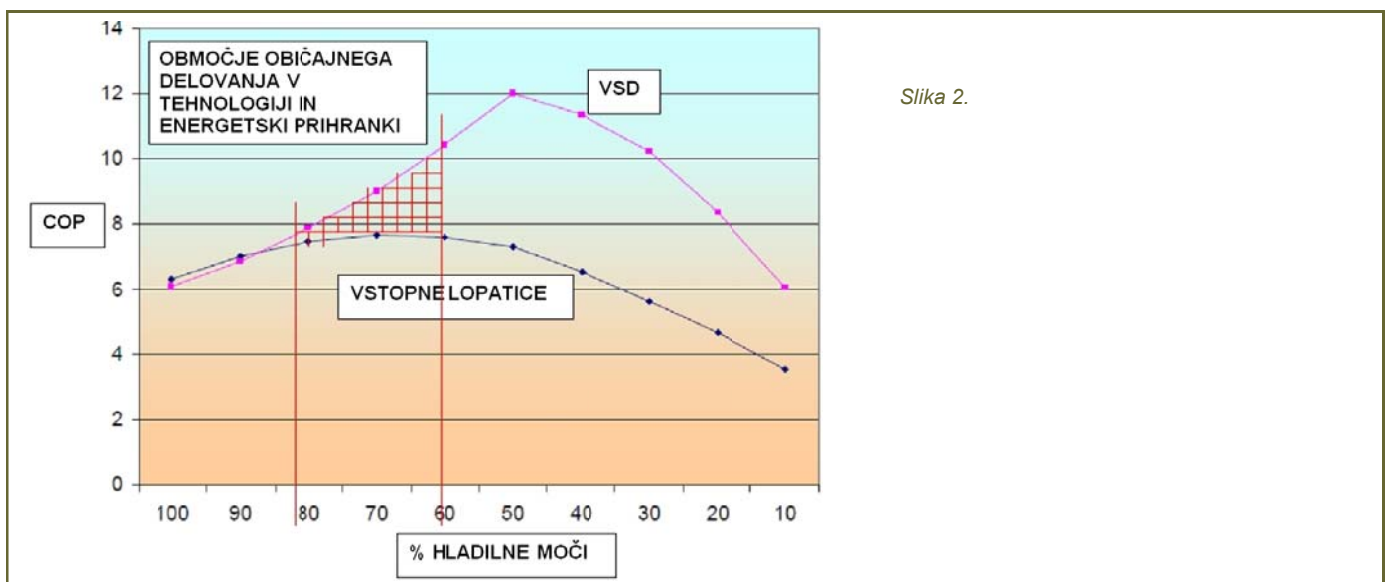
- $LIFT = 37 - 7 = 30\text{ °C}$
- $A = 0,0000015318 * (30)^4 - 0,000202076 * (30)^3 + 0,0101800 * (30)^2 - 0,264958 * 30 + 3,930196 = 0,9275$
- $B = 0,0027 * 7,0 + 0,982 = 1,0009$
- $K_{prilag} = 0,9275 * 1,0009 = 0,9283$
- Prilagojena vrednost COP pri polni moči =  $6,170 * 0,9283 = 5,7279$
- Prilagojena vrednost NPLV =  $6,525 * 0,9283 = 6,0572$

OKVIR 2

Kako pa je z VSD v primerih tehnološke uporabe, kjer IPLV morda ni najprimernejši pokazatelj? Ocene kažejo, da v veliki večini primerih ti sistemi obratujejo z več generatorji hladu. Tako je obratovanje posameznega generatorja hladu pod 50 % precej neobičajno, najbolj pogosto je obratovanje med 55 in 75% nazivne hladilne moči.

Za tehnološke hladilne sisteme z večjimi generatorji hladu, opremljenost vsakega od njih z VSD zagotavlja največje prihranke energije in/ali operativno prožnost, vendar je lahko bolj gospodarno (ali vsaj manj investicijsko obremenilno), da se uporabi VSD samo za vodilni generator hladu, to je samo za tistega, za

katerega se pričakuje (ali se določi), da bo obratoval pri delnih obremenitvah (tako imenovani "swing chiller"). Namreč, generatorji hladu, ki obratujejo največ časa pri nižjih temperaturah hladilne vode kondenzatorja (na primer v prehodnem obdobju in/ali tudi pozimi z nižjim »tlačnim dvigom«) in/ali zmanjšano obremenitvijo, nudijo možnost največjih prihrankov za stroške energije. Slika 2 prikazuje primerjavo različne energetske učinkovitosti delovanja generatorja hladu moči 2000 kW z nižano temperaturo hladilne vode pri delnih obremenitvah (po AHRI), z uporabo VSD ali z uporabo krmiljenja kota vstopnih lopatic. V okvirju 3 sta predstavljena ob primerjavi z vozečim avtomobilom načina delovanja obeh vrst regulacije hladilne moči.



Slika 2.

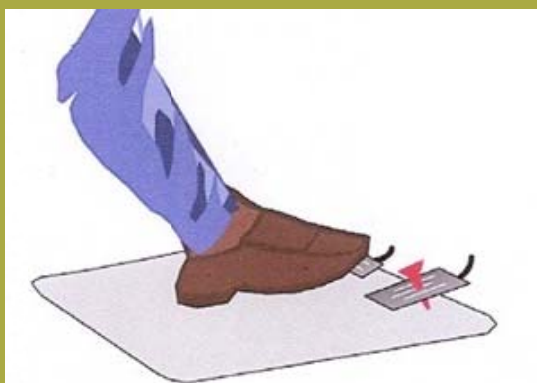
### Primerjava regulacije hladilne moči preko spreminjanja kota vstopnih lopatic in VSD<sup>5</sup>

Primerjava z vozečim se avtomobilom predstavlja primeren način za predstavitev delovanja generatorja hladu po načinu spremenljive hitrosti vrtenja in spreminjanjem kota vstopnih lopatic. Pri tem predstavlja stopalka za plin elektromotor kompresorja in stopalka zavor nastavljive vstopne lopatice. (slika 3).



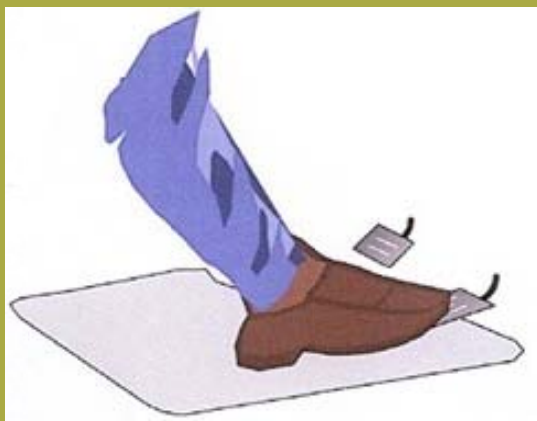
Slika 3.

Pri regulaciji z vstopnimi lopaticami se za zagotavljanje potrebne hladilne moči elektromotor vrti z nespremenljivo hitrostjo, vstopne lopatice pa z zapiranjem vstopa zmanjšujejo količino posesanega hladiva. Ob primerjavi z avtomobilom to pomeni, da je stopalka za plin prikovana k tlom, doseganje potrebne hitrosti pa se vrši s pritiskanjem na stopalko zavor. (slika 4).



Slika 4.

Pri regulaciji z VSD se hladilna moč zagotavlja s spreminjanjem hitrosti vrtenja elektromotorja, vstopne lopatice pa se uporabijo zgolj izjemoma. Ob primerjavi z avtomobilom to pomeni, da se stopalka za plin pritiska ali popušča, odvisno od zahtevane hitrosti vožnje, stopalka zavore pa se uporablja izjemoma. (slika 5).



Slika 5.

<sup>5</sup> Povzeto po delavnici o optimizaciji generatorjev hladu in energetski učinkovitosti z naslovom »Variable Speed Drive Centrifugal Chillers«.