

Dr. sc. Ivan Vlahinić, red. prof.  
Mr. sc. Dubravko Vučetić, v. pred.  
Dr. sc. Anton Šestan, doc.  
Visoka pomorska škola  
Studentska 2, Rijeka

Izvorni znanstveni rad  
UDK: 621.316.728:629.5.081

# SMANJENJE TROŠKOVA ELEKTRIČNE ENERGIJE U BRODOGRADILIŠTU NOVOGRADNJI DODAVANJEM ENERGIJE IZ VLASTITIH IZVORA

*Najveća je stavka u troškovima električne energije brodogradilišta mjesečno 15-minutno vršno opterećenje. Obračunsko vršno opterećenje može se uspješno smanjiti korištenjem energije iz vlastitih izvora. Sustav za gospodarenje električnom energijom omogućuje dovoljno točno predviđanje mjesečnog dijagrama opterećenja, što je osnova za optimiranje limita rezanja. Razvijen je model simulacije rezanja vršnog opterećenja i primijenjen na dijagrame snimljene u brodogradilištu novogradnji. Razmatrane su mogućnosti uštede pri korištenju dizel-agregata na lako i teško gorivo u ljetnom i zimskom razdoblju. Rezultati dokazuju opravdanost primjene predložene metode smanjenja troškova električne energije.*

## 1. UVOD

Električna energija nezamjenljiva je u radu tehnoloških sustava [1]. Troškovi električne energije značajna su stavka u ukupnim troškovima poslovanja. Pri nejednolikom dnevnom i mjesečnom tipu opterećenja, karakterističnog za neserijsku proizvodnju, 15-minutno vršno opterećenje čini 60–70 posto ukupnih troškova električne energije. Primjenom sustava za gospodarenje energijom, zasnovanog na usporednom praćenju tokova električne energije i radnih operacija, uz pokazatelje učinkovitosti i organiziranosti proizvodnje, dobiva se mogućnost za veliko smanjenje troškova električne energije na osnovi pravilna ugovaranja i smanjenja 15-minutne vršne snage [2]. Smanjenje vršne snage može se postići preraspodjelom radnih procesa i automatskim isključivanjem dijela potrošnje u mjeri kojom se ne remeti proizvodni proces [3]. Ometanje proizvodnog procesa stvorit će u pravilu dodatne troškove koji premašuju učinak uštede. Obračunska vršna snaga može se bez ometanja proizvodnih procesa

uspješno smanjiti i dodavanjem energije vlastitih izvora [4]. Pravilno dimenzioniranje vlastitih izvora, određivanje optimalnog limita rezanja vršnog opterećenja i ugovaranje energije obavlja se na osnovi mjesečnog dijagrama opterećenja [5].

## 2. ODREĐIVANJE MJESEČNOG DIJAGRAMA OPTEREĆENJA

Mjesečni dijagram opterećenja u sustavima s uhodanom serijskom proizvodnjom uglavnom je predvidljiv jer se periodično ponavlja u skladu s izmjenama proizvodnih ciklusa. Do većih odstupanja dolazi samo tijekom poremećaja u proizvodnji ili elektroenergetskom sustavu.

Kada je riječ o brodogradilištu, mjesečni dijagram opterećenja ima nepravilan oblik i ne sadrži dovoljno elemenata za predviđanje kretanja opterećenja u sljedećem razdoblju. Ipak, korištenjem sustava za gospodarenje električnom energijom može se, simulacijom predviđenih radnih aktivnosti, dobiti dovoljno pouzdan pretpostavljeni dijagram opterećenja za sljedeće ugovorno obračunsko razdoblje. Treba istaknuti da je deterministički pristup neprovediv jer se u velikoj većini radi o intermitiranim opterećenjima na koja, u zavisnosti od niza utjecajnih čimbenika, utječe čovjek. Pri simulaciji potrebno je odvojiti dio opterećenja vezan za trajnu potrošnju, neovisan o radnim operacijama (rasvjeta, opća potrošnja...), čiji dijagram ima tjedni periodični karakter. Preostalo opterećenje vezano je za radne aktivnosti čiji se početak i kraj mogu planirati. U brodogradilištu novogradnji, opseg i vrsta poslova uglavnom su nepromjenljivi tako da se do pretpostavljenog dijagrama opterećenja može doći i statističkom obradom višegodišnjeg praćenja potrošnje, što je manje točno, ali i neusporedivo jednostavnije. Pretpostavljeni dijagram opterećenja osnova je za ugovaranje snage i određivanje limita rezanja vršnog opterećenja.

## 3. OPTIMIRANJE LIMITA REZANJA

Kako su kWh proizvedeni u vlastitoj električnoj centrali u pravilu skuplji od kupljenih, postoji optimalni limit rezanja pri kojem će ušteda biti najveća. Ušteda se računa prema izrazu:

$$ms = P_c c_p + \int_{t_1}^{t_2} [c_1(t) - c_2] P(t) dt$$

gdje su:

$m_s$  – ušteda (\$)

$c_p$  – cijena kW (\$/kW)

$P_c$  – odrezana vršna snaga (kW)

$t_1, t_2$  – granice obračunskog razdoblja (h)

$c_2$  – cijena proizvedenog kWh (\$/kWh)

$c_1(t)$  – cijena kupljenog kWh (\$/kWh)

$P(t)$  – opterećenje generatora (kW)

$t$  – vrijeme

Optimalni limit rezanja ne ovisi samo o očekivanoj maksimalnoj vršnoj snazi, koja je važna zbog ograničenih kapaciteta vlastitih izvora, već i o količini

proizvedene električne energije koja presudno utječe na troškove. Zbog toga je za određivanje optimalnog limita rezanja potrebno poznavati cijeli pretpostavljeni dijagram opterećenja, a ne samo očekivanu vršnu snagu.

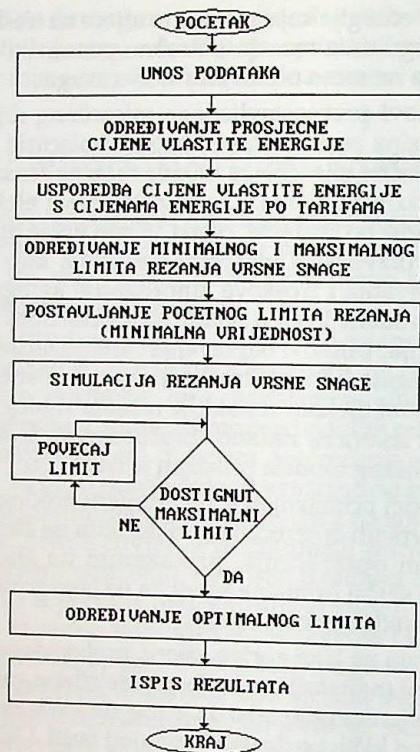
Da bi se na osnovi pretpostavljenoga mjesečnog dijagrama opterećenja odredila optimalna razina rezanja, razvijen je simulacijski model koji izražava ukupne troškove električne energije za moguće razine rezanja i na temelju toga određuje optimalnu razinu rezanja. Ukupne troškove električne energije čine cijena isporučene energije po tarifama, cijena 15 min vršne mjesečne snage i cijena električne energije proizvedene vlastitim izvorima, koja obuhvaća troškove goriva, troškove održavanja i troškove amortizacije agregata. Dok su troškovi goriva vezani za proizvedene kWh u skladu sa specifičnom potrošnjom agregata pri zadanom opterećenju, troškovi održavanja i amortizacije vezani su uglavnom za broj radnih sati agregata. Ukupni troškovi električne energije izračunavaju se numeričkom integracijom tijekom simulacije rezanja vršnog opterećenja dodavanjem energije vlastitih izvora za zadano obračunsko razdoblje. Pojednostavnjeni dijagram toka simulacijskog modela prikazan je na slici 1.

Simulacijski model primijenjen je na primjeru brodogradilišta s mjesečnim dijagramom dnevnih vršnih opterećenja, prikazanim na slici 2., i karakterističnim dnevnim dijagramom opterećenja, prikazanim na slici 3. Razmatrane su mogućnosti uštede, za slučaj primjene agregata na lako gorivo i agregata na teško gorivo za jedan ljetni i jedan zimski mjesec.

U slučaju agregata na lako gorivo, cijena proizvedenog kWh uvijek je viša od cijene kWh po prvoj (najvišoj) tarifi. Zbog niže cijene goriva, agregat na teško gorivo proizvodi jeftiniju energiju tako da je njegov kWh zimi jeftiniji od kWh po prvoj tarifi, ali skuplji od kWh po drugoj (srednjoj) tarifi. Ljeti je proizvedeni kWh nešto skuplji od kWh po prvoj tarifi.

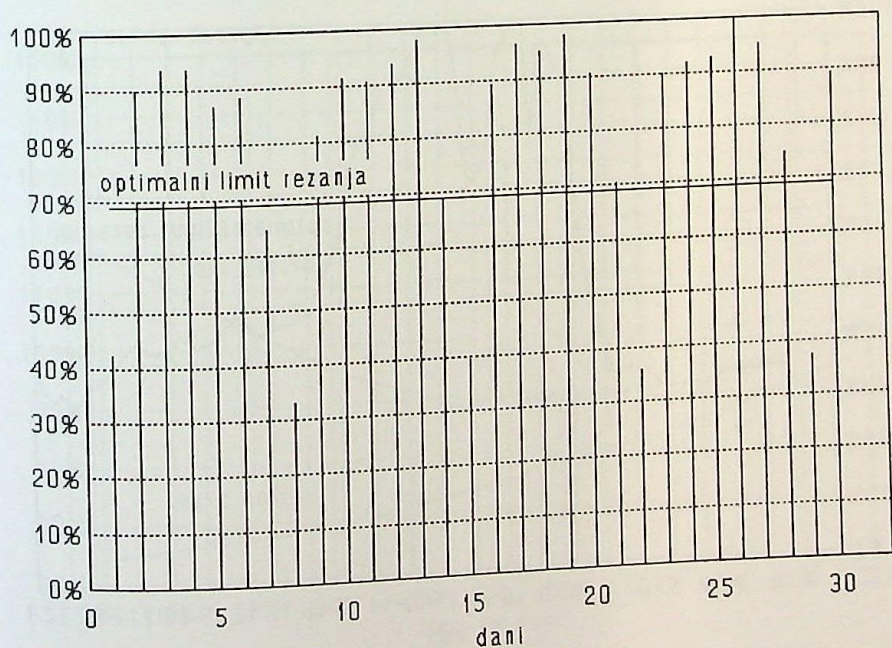
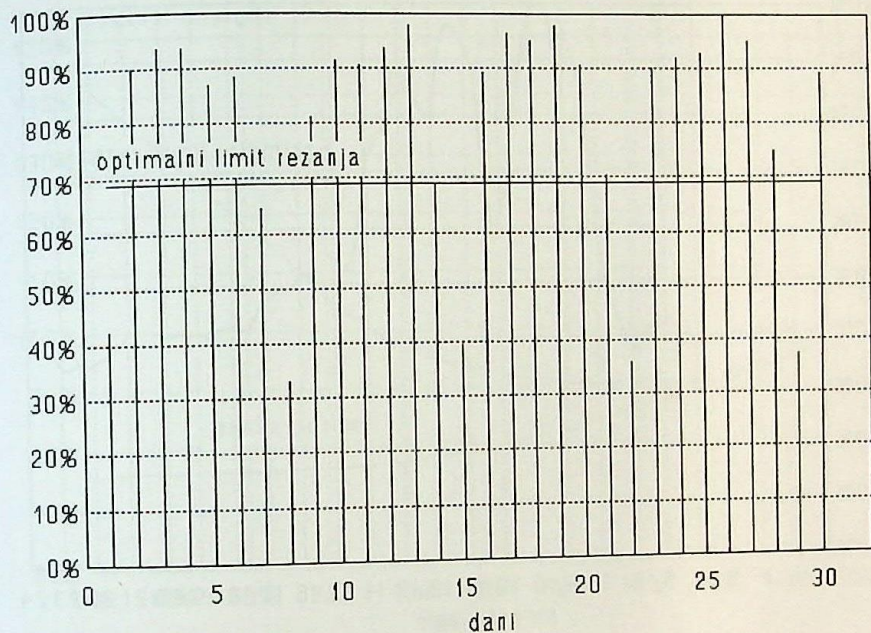
Slika 4. prikazuje ovisnost ukupnih troškova električne energije, izraženih u postotku troškova električne energije bez rezanja vršnog opterećenja, o odabranom limitu rezanja izraženom u postotku stvarne mjesečne vršne snage, uz pretpostavku da se on nalazi unutar dopuštenih granica ugovorenoga, vršnog opterećenja (-15% +5%). U slučaju lakog goriva, optimum se postiže u ljetnom mjesecu pri rezanju na razini 69 posto vršnog opterećenja, pri čemu ušteda iznosi 9,77 posto, odnosno na razini 59 posto u zimskom mjesecu, pri čemu ušteda iznosi 10,73 posto. Radi bolje orijentacije, optimalni limit rezanja ucrtan je i na dijagramima mjesečnog i dnevnog opterećenja, prikazanim na slikama 2. i 3. Može se uočiti znatno niži optimalni limit rezanja, ali i veće uštede u troškovima električne energije u zimskom mjesecu, što je posljedica viših zimskih cijena električne energije i obračunske vršne snage.

U slučaju teškoga goriva, krivulja troškova električne energije i ljeti je i zimi neprekidno rastuća, pa se optimum postiže uz limit rezanja 0 % to jest samostalnim podmirivanjem potrošnje tijekom razdoblja prve i druge tarife, a isključivanjem agregata noću tijekom razdoblja treće tarife, kada se ne obračunava vršna snaga. Uz takvo vođenje agregata, u obračunu će izostati stavka vršne snage, što će, usprkos uglavnom višoj cijeni proizvedenog kWh, rezultirati znatnom uštedom. Krivulja troškova energije u slučaju teškog goriva, na slici 4b prikazuje uštedu i kada nema rezanja (limit rezanja 100 posto). To se događa zato što se zbog niže cijene vlastitog kWh tijekom razdoblja prve tarife cjelokupna potrošnja pokriva iz vlastitih izvora, dok se limit rezanja u ovom slučaju odnosi samo na drugu tarifu.

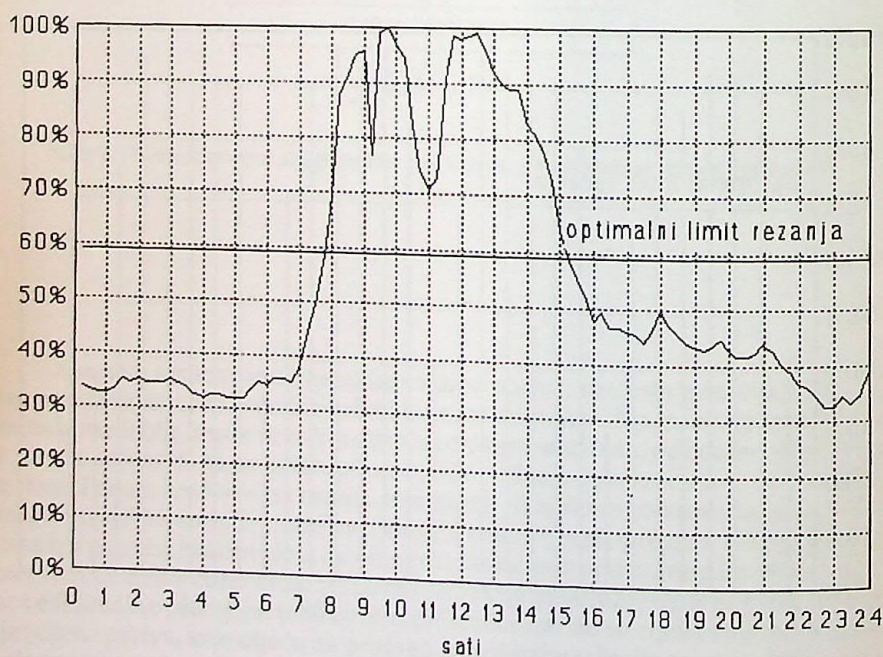
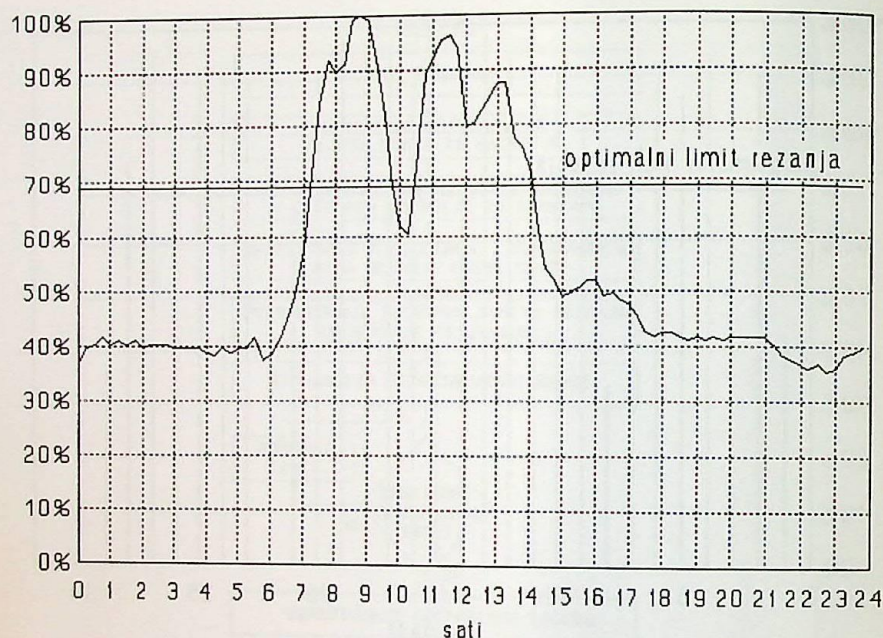


Slika 1. Pojednostavnjeni dijagram toka optimiranja limita rezanja vršnog opterećenja

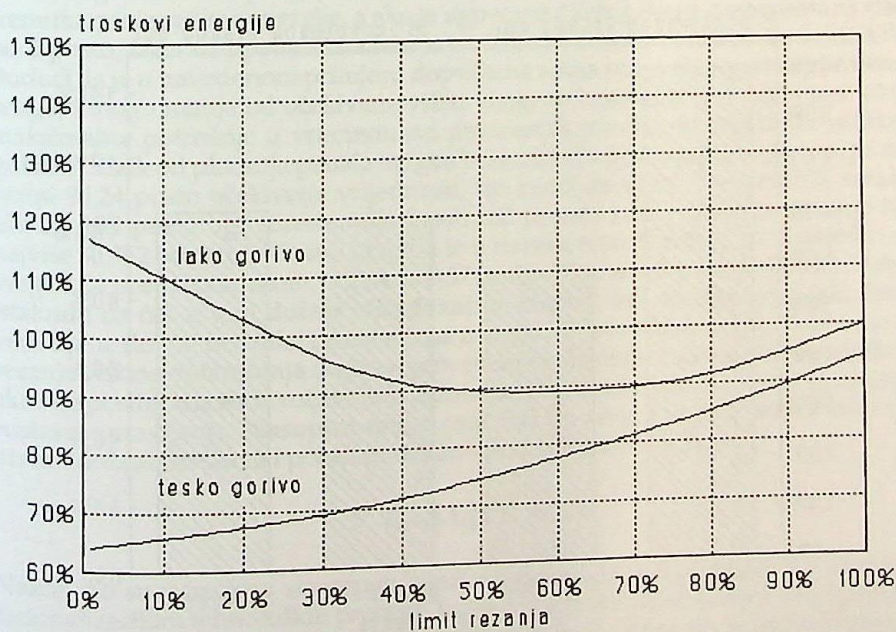
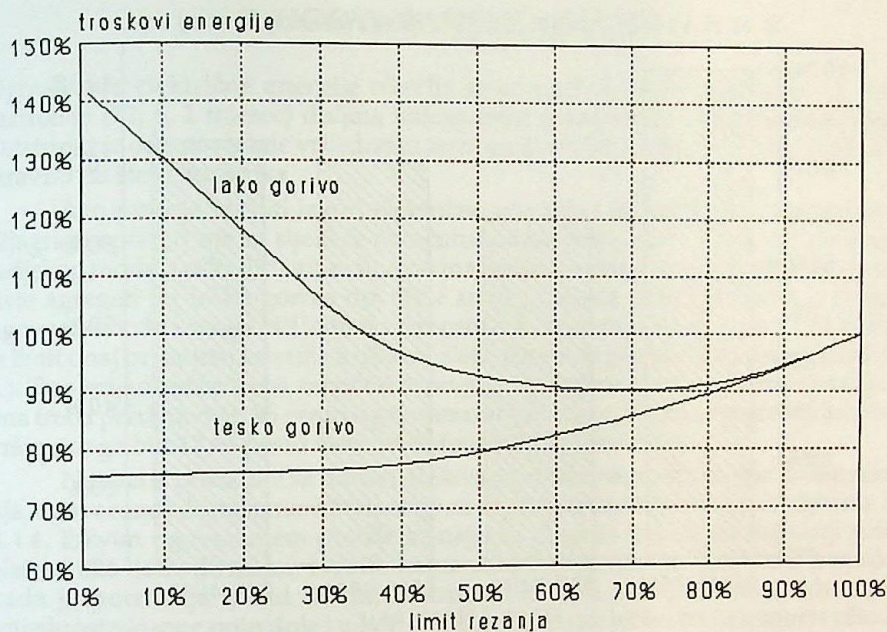
Ako se u simulacijski model kao ulazni podaci, umjesto predviđenog dijagrama opterećenja za sljedeće razdoblje, unesu snimljeni dijagrami opterećenja za protekla razdoblja, može se točno odrediti ostvarena ušteda, odnosno ušteda koja se mogla ostvariti da se pristupilo rezanju vršnog opterećenja s optimalnim limitom. Podaci dobiveni na osnovi snimljenih dijagrama izvanredno su važni u fazi pretprojekta, kada je potrebno odrediti snagu i broj agregata. Ukupna instalirana snaga treba biti dovoljna da omogući dostizanje optimalnog limita rezanja s rezervom za izvanredne situacije, odnosno manje povećanje opsega proizvodnje, kao i eventualne promjene troškovnih čimbenika kao što su cijena električne energije i cijena goriva, koje utječu na promjenu optimalnog limita rezanja. Veće povećanje opsega proizvodnje zahtijevat će i proširenje centrale dodatnim agregatima, što također treba predvidjeti. Uz određivanje potrebne ukupne instalirane snage, simulacijski model kroz simulaciju ispada jednog od agregata u odabranoj konfiguraciji centrale, daje i elemente za određivanje broja agregata.



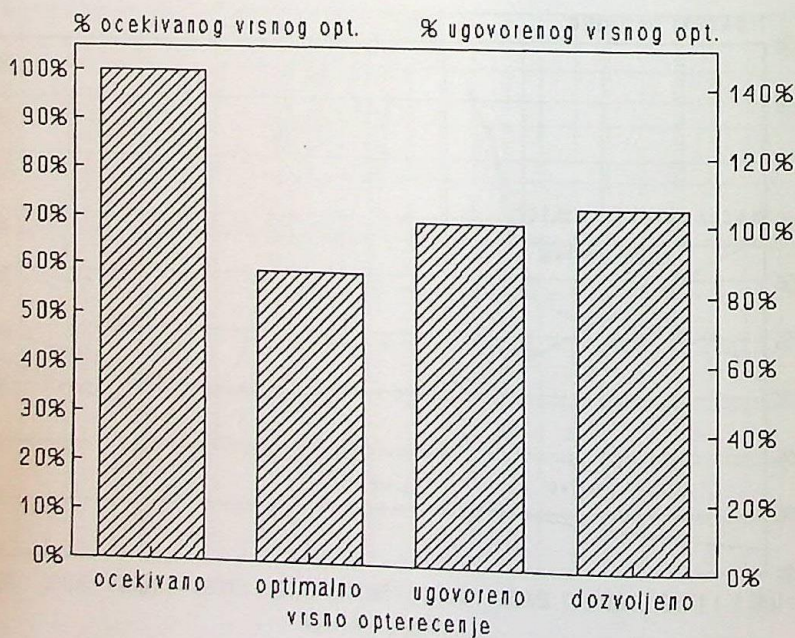
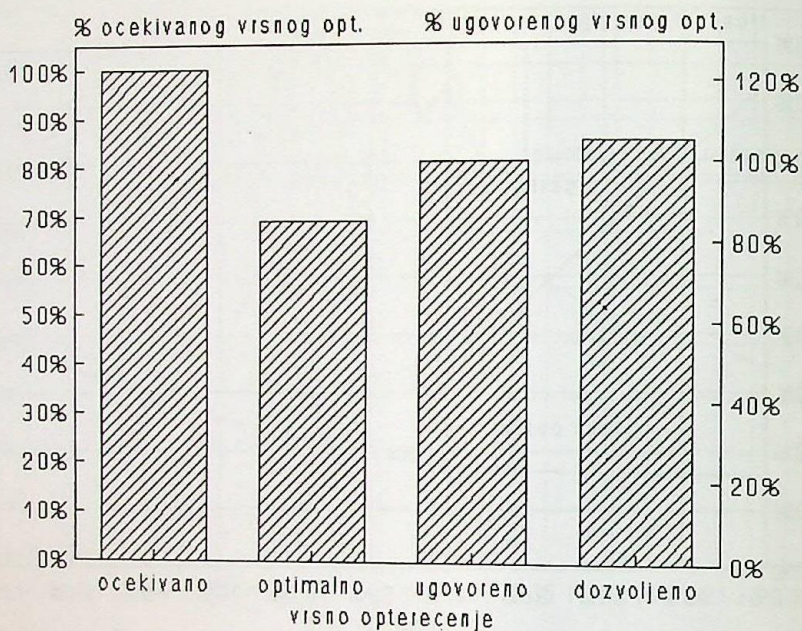
Slika 2. Mjesečni dijagram dnevnih vršnih opterećenja:  
a) ljetni mjesec  
b) zimski mjesec



Slika 3. Karakteristični dneveni dijagram opterećenja:  
a) ljetni mjesec  
b) zimski mjesec



Slika 4. Optimiranje limita rezanja vršnog opterećenja:  
a) ljetni mjesec  
b) zimski mjesec



Slika 5. Usporedba očekivanog, optimalnog, ugovorenog i dopuštenog vršnog opterećenja (lako gorivo):  
 a) ljetni mjesec; b) zimski mjesec

#### 4. UGOVARANJE ENERGIJE

Ugovaranje električne energije obavlja se unaprijed za određeno vremensko razdoblje (12, 6, 1 mjesec) duljina kojega ovisi o karakteru potrošnje korisnika. Odstupanje od ugovorene vrijednosti vršnog opterećenja veće od -15% i +5%, ide izravno na štetu korisnika.

Ako postoje vlastiti izvori električne energije i sačinjen je pretpostavljeni dijagram opterećenja za sljedeće obračunsko razdoblje, može se na osnovi simulacijskog modela odrediti optimalna razina rezanja vršnog opterećenja. Ako se koriste agregati na teško gorivo dovoljne snage, tada će optimalni limit rezanja i ugovorena vršna snaga biti jednaki i iznositi 0 %. U slučaju lakog goriva, optimalni je limit onaj pri kojem krivulja troškova električne energije postiže minimum (slika 4.). Tom vrijednošću treba započeti rezanje u sljedećem obračunskom razdoblju i ona treba predstavljati 85 posto ugovorene vršne snage, što znači da će ugovorena vršna snaga biti 17,65 posto veća od optimalnog limita rezanja.

Na slici 5. prikazani su odnosi očekivane vršne snage, optimalne razine rezanja, ugovorene i dopuštene vršne snage za konkretan slučaj obrađen na slikama 2., 3. i 4. Takvim ugovaranjem postiže se najveća moguća ušteda uz najmanji rizik. Naime, ako dođe od makar i kratkotrajna otkazivanja vlastite centrale u trenutku kada je potrošnja iznad limita, mjerna garnitura zabilježit će neodrezanu vrijednost ukupne potrošnje i u tom obračunskom razdoblju bit će umjesto uštede ostvaren gubitak. Ukupni gubitak činit će razlika u cijeni između kupljene i do toga trenutka proizvedene energije, a ako je ugovorena vršna snaga premašena za više od 5 posto, tada su i penali izraženi kroz trostruko veću cijenu za dodatne kW. Budući da je u navedenom primjeru dopuštena vršna snaga (105 posto ugovorene snage) mnogo manja od očekivane vršne snage, otkazivanje centrale u trenutku maksimalne potrošnje u vremenu od petnaestak minuta dovelo bi do velikog gubitka. Rizik od plaćanja penala mogao bi se izbjeći ugovaranjem vršne snage na razini 95,24 posto očekivane vrijednosti, što znači da bi se i bez centrale ostalo unutar 105 posto ugovorene vrijednosti, ali je tada smisleno samo rezanje na najviše 80,952 posto očekivane snage, a to u navedenom primjeru znači uštedu od svega 8,04 posto u zimskom, odnosno 8,57 posto u ljetnom mjesecu (slika 4.). Treba istaknuti da će i u tom slučaju otkazivanjem centrale biti ostvaren gubitak, zbog veće cijene do tog trenutka proizvedene energije. Iz navedenoga proizlazi da se u rezanje vršnog opterećenja dodavanjem energije vlastitih izvora ne treba upuštati ako nije postignuta zadovoljavajuća razina pouzdanosti i raspoloživosti agregata i sustava upravljanja. Nasuprot tome, pravilno izveden i vođen sustav brzo će vratiti uložena sredstva i pokazati se kao vrlo profitabilno ulaganje.

#### 5. ZAKLJUČAK

Nakon što su iscrpljene sve mogućnosti smanjenja troškova električne energije racionalizacijom tehnoloških procesa, kompenzacijom jalove snage i smanjenjem vršne snage i cijene energije preraspodjelom radnih operacija te isključivanjem manje važnih trošila, dodatna ušteda može se ostvariti primjenom rezanja vršnog opterećenja dodavanjem energije vlastitih izvora. Na financijske rezultate te mjere odlučujuće utječu: točnost predviđanja potrošnje, izbor limita rezanja, ugovaranje vršne snage te pouzdanost i raspoloživost agregata i sustava upravljanja.

Optimalna razina rezanja i ugovorna vrijednost vršne snage određuje se za sljedeće obračunsko razdoblje pomoću simulacijskog modela na osnovi pretpostavljenog dijagrama opterećenja. Brodogradilište novogradnji ima opterećenje stohastičkog karaktera. Pretpostavljeni dijagram može se odrediti na osnovi plana aktivnosti i korelacijskih odnosa potrošnje električne energije i radnih operacija, dobivenih praćenjem tokova energije pomoću sustava za gospodarenje energijom.

Za brodogradilišta novogradnji najprimjerenije je korištenje dizel-agregata, za koje postoji osposobljeni kadar potreban za rukovanje i održavanje, a često i vlastita proizvodnja. Trenutačni odnosi cijena pokazuju da se najbolji rezultati postižu u slučaju teškog goriva i to podmirivanjem cjelokupne potrošnje iz vlastitih izvora tijekom razdoblja prve i druge tarife.

Financijska sredstva uložena u sustav za rezanje vršnog opterećenja dodavanjem energije vlastitih izvora relativno se brzo vraćaju kroz ostvarenu uštedu i poboljšavaju poslovne rezultate brodogradilišta.

#### LITERATURA

- [1] I. Vlahinić, Š. Milošević, Istraživanje potrošnje električne energije za potrebe projektiranja brodogradilišta, Teorija i praksa brodogradnje, Opatija 1980.
- [2] I. Vlahinić, Š. Milošević, Prilog povećanju efikasnosti poslovanja brodogradilišta uvođenjem računalnog praćenja opterećenja i potrošnje električne energije, Pomorski zbornik, Rijeka 1996.
- [3] I. Vlahinić, V. Tomas, D. Vučetić, The Computerised Electrical Energy Management System for Industrial Production Systems, Korema 98, Dubrovnik 1998.
- [4] I. Vlahinić, D. Vučetić, V. Tomas, Contribution to the Better Efficiency of a Harbour's Business Results by Introducing Computer Monitoring of the Electric Energy Load and Consumption, ISEF 97, Ljubljana 1997.
- [5] I. Vlahinić, D. Vučetić, V. Tomas, Peak Load Cutting Limit Determination in Harbours and Shipyards, ICTS 98, Trst-Patras 1998.

### Summary

## ELECTRIC ENERGY COST REDUCTION IN SHIPYARDS BY USING OWN POWER SOURCES

*The greatest item regarding the electric energy cost in shipyards is the monthly 15 minutes peak load. The accounting peak load can be efficiently reduced by using own power sources. The electric energy management system enables a sufficiently accurate foreseeing of the monthly load diagram, that is the basis for the load cutting limit optimisation. The load cutting simulation model is developed and applied on the load diagrams recorded in a shipyard. The savings possibilities in case of diesel generators on diesel and heavy fuel oil in the summer and winter period are discussed. The results justify the proposed electric energy cost reduction method.*