

Dr. sc. Ivan Vlahinić  
Mr. sc. Dubravko Vučetić  
Dr. sc. Anton Šestan  
Visoka pomorska škola u Rijeci  
Studentska 2, Rijeka

Prethodno priopćenje  
UDK: 621.31:629.5.081

## VREDNOVANJE UČINKA REZANJA VRŠNOG OPTEREĆENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE U BRODOGRADILIŠTU

*U radu se analizira prvih deset mjeseci primjene sustava rezanja vršnog opterećenja dodavanjem energije vlastitih izvora u jednome hrvatskom brodogradilištu. Stvorena je egzaktna metoda za određivanje i analizu ušteda koje se postižu primjenom sustava. Metoda se zasniva na modelu optimiranja limita rezanja vršnog opterećenja računalnom simulacijom rezanja uz pretpostavku da se ne utječe na potrošnju električne energije. Učinci sustava su razloženi na uštede koje proizlaze iz ugovaranja snage, uštede zbog optimiranja limita rezanja i uštede zbog predviđanja potrošnje. Posebno je obrađen utjecaj pouzdanosti sustava na njegove učinke. Postojanje dovoljne rezerve snage, sadržane u raspoloživoj snazi vlastitih izvora, umanjuje važnost predviđanja potrošnje. Efikasnost rezanja definirana je kao omjer ostvarene uštede i teoretski moguće uštede izračunate pomoću modela optimiranja.*

*Ključne riječi: električna energija, brodogradilište, vršno opterećenje, rezanje, vrednovanje*

### 1. UVOD

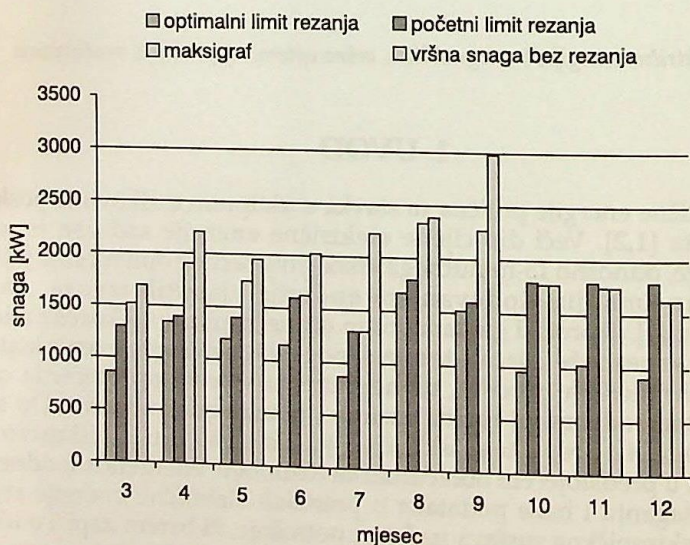
Troškovi električne energije prilična su stavka u ukupnim troškovima poslovanja brodogradilišta [1,2]. Veći dio cijene električne energije sadržan je u cijeni električne snage, odnosno 15-minutnoga vršnog mjesečnog opterećenja [3] koje se može efikasno smanjiti dodavanjem energije vlastitih izvora, najčešće dizelgeneratora [4]. Teoretski gledano, osim cijene kupljene električne energije i goriva, na koju se ne može utjecati, te mjesečnog dijagrama opterećenja koji ovisi o intenzitetu tehnoloških procesa, učinci rezanja vršnog opterećenja ovise o ugovorenoj snazi, odabranoj razini rezanja i pouzdanosti sustava. Do sada je ugovaranje snage bilo prepušteno isključivo ljudskom faktoru. Uz iskustvo i grubi plan aktivnosti u predstojećem obračunskom razdoblju, energetičaru omedavno stoje na raspolaganju i baze podataka o potrošnji električne energije stvorene korištenjem elektroničkog sustava nadzora potrošnje, ili barem zapisi o ukupnoj potrošnji cijeloga brodogradilišta [5]. Za sada se ti podaci ne koriste za automatsko predviđanje potrošnje prema planiranim aktivnostima, ali ni za određivanje ušteda ostvarenih primjenom sustava za rezanje vršnog opterećenja. Zadatak je

ovoga rada da korištenjem modela optimiranja razine rezanja vršnog opterećenja [6] analizira rezultate primjene sustava u jednome hrvatskom brodogradilištu i utvrdi metodu za određivanje njegova učinka.

## 2. UČINCI KOJI PROIZLAZE IZ UGOVARANJA SNAGE

Mjesečna vršna snaga je stohastička veličina teoretski ograničena samo kapacitetom napajanja. Ovisi o broju brodova u obradi, ali i o vrsti i rasporedu radnih aktivnosti. S današnjom organizacijom proizvodnje nemoguće je točno predvidjeti koji će se tehnološki procesi vremenski preklapati. Povezivanjem sustava organizacije i praćenja proizvodnje sa sustavom gospodarenja energijom mogla bi se mjesečna vršna opterećenja ne samo dovoljno točno predvidjeti već i, preraspodjelom radnih aktivnosti, u velikoj mjeri ublažiti. Mjesečna vršna snaga ugovara se za tri mjeseca unaprijed, što je poseban problem za remontna brodogradilišta jer u tako dugom razdoblju često dolazi do znatnih promjena u ugovorenim terminima i opsegu posla.

U takvim uvjetima pouzdano predviđanje vršnog opterećenja u traženoj točnosti (-15%, +5%) nije ostvarljivo. Za brodogradilište koje ne raspolaže vlastitim izvorima električne energije, najjednostavnije je i najsigurnije ugovarati uvijek istu vršnu snagu koja odgovara iznosu povijesnog maksimuma. Ako nije došlo do povećanja proizvodnih kapaciteta, može se s dovoljnom sigurnošću očekivati da on neće biti premašen u opesegu koji bi znatno povećao troškove električne energije (dopuštena snaga iznosi 105% ugovorene vrijednosti). Na taj način brodogradilište iz mjeseca u mjesec plaća uglavnom istu vršnu snagu, manju

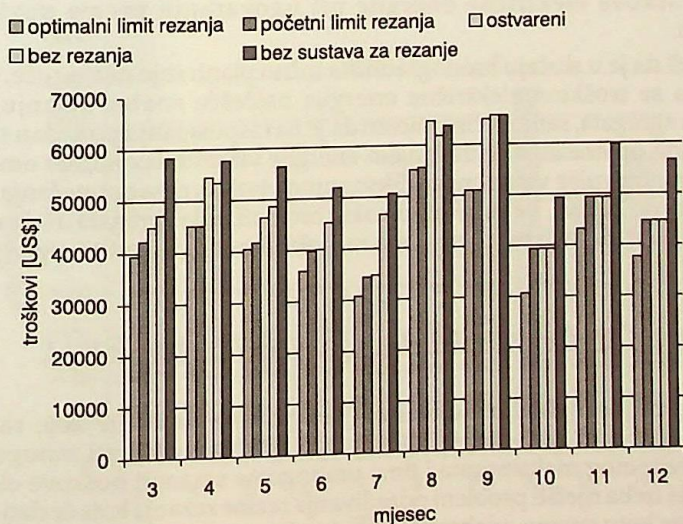


Slika 1. Usporedba optimalnog, početnog i konačnog limita rezanja s vršnim opterećenjem za prvih deset mjeseci korištenja sustava rezanja vršnog opterećenja

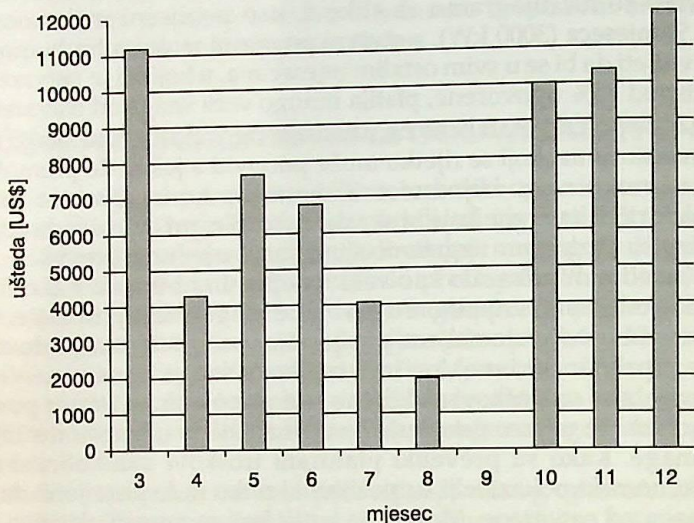
od ugovorene, ali zbog donje granice tolerancije (-15%) najčešće višu od stvarno dosegnute. Ako se na dijagramu sa slike 1. kao povijesni maksimum uzme vrijednost iz 9. mjeseca (3000 kW), a stvarni povijesni maksimum bi mogao biti i viši, može se vidjeti da bi se u svim ostalim mjesecima, u kojima je ostvarena vršna snaga ostala ispod 85% ugovorene, platila mnogo veća snaga od ostvarene.

Moglo bi se polemizirati kako nema smisla ugovarati vršnu snagu na razini povijesnog maksimuma, koji se rijetko može ponoviti a još rjeđe premašiti, te da treba odabrati neku nižu vrijednost. Kako nitko ne izračunava uštede na troškovima električne energije koje bi se tako ostvarile, pri ocjeni rada odgovorne osobe bili bi uzeti u obzir samo negativni učinci kada se jednom premaši dopuštena snaga, što bi se odmah pokazalo kao velik i neplanirani trošak. Kako u takvom slučaju pravdati odabranu vrijednost ugovorene snage? Nasuprot tome, odluka o ugovorenoj snazi čvrsto je utemeljena povijesnim maksimumom; poduzeće plaća svaki mjesec otprilike isti iznos na ime troškova snage i nema neočekivanih troškova. Štoviše, ako su troškovi električne energije planirani prema povijesnom maksimumu, svaki se mjesec ostvaruje formalna ušteda u iznosu do 15% cijene ugovorene snage. Kako su preveliki planirani troškovi ukalkulirani u cijenu proizvoda, ekonomski pokazatelji su pozitivni i nitko neće primijetiti da se često plaća veća snaga od ostvarene. Može li se iznos koji se mogao uštedjeti smatrati gubitkom i o kolikom se iznosu radi?

Dijagram prikazan na slici 2., dobijen korištenjem modela optimiranja limita rezanja vršnog opterećenja, pokazuje da bi se uz točno ugovaranje (-15%, +5%) i bez uključivanja agregata ostvarili mnogo manji troškovi (kategorija: "troškovi bez rezanja"). Dijagram na slici 3. prikazuje iznose uštede zbog točna ugovaranja.



Slika 2. Usporedba ukupnih troškova električne energije za prvih deset mjeseci korištenja sustava rezanja vršnog opterećenja



Slika 3. Ušteta zbog ugovaranja snage za prvih deset mjeseci korištenja sustava rezanja vršnog opterećenja

Zbrojeno za deset promatranih mjeseci, u koje je uključen i mjesec s povijesnim maksimumom, u kojem nije bilo uštete ove vrste, ušteta zbog mogućnosti ugovaranja manje snage od povijesnog maksimuma iznosi 68.295 US\$ ili 11,97% ukupnih troškova električne energije pri ugovaranju prema povijesnom maksimumu.

Budući da je u slučaju brodogradilišta točno planiranje nemoguće, može se zaključiti da se troškovi električne energije najčešće znatno smanjuju i bez uključivanja agregata, samom činjenicom da je na raspolaganju pouzdan sustav za rezanje vršnog opterećenja dodavanjem energije vlastitih izvora, što omogućuje ugovaranje mnogo niže vršne snage. Ekstremno visoka vršna opterećenja, ako se i pojave, traju vrlo kratko, pa se uz minimalan broj sati rada agregata može odrezati velika snaga. Limitirajući je faktor samo raspoloživa snaga vlastitih agregata.

### 3. UČINCI OPTIMIRANJA LIMITA REZANJA

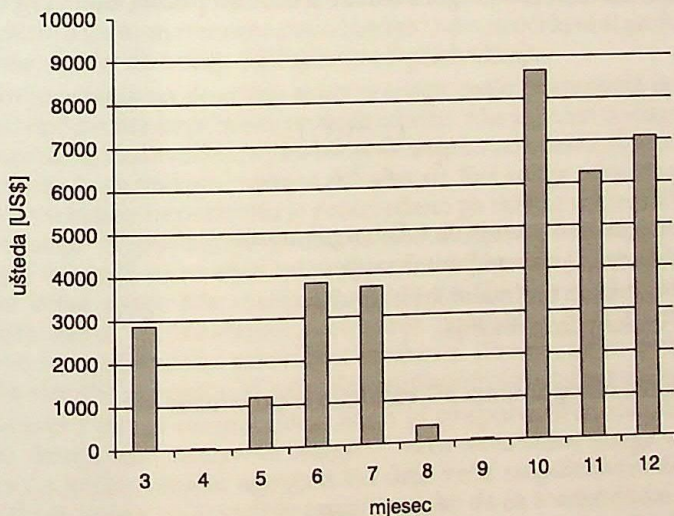
U prethodnom je poglavlju dokazano da će brodogradilište koje raspolaže pouzdanim sustavom za rezanje vršnog opterećenja ugovarati mnogo manju snagu od povijesnog maksimuma i time umnogome smanjiti troškove električne energije. Sada treba riješiti problem određivanja razine rezanja koja će dati najveću uštedu i snage koju prema odabranoj razini treba ugovoriti. Budući da je rezanje na razini nižoj od 85% ugovorene snage besmisleno, a važno je zadržati što veću rezervu do dopuštene snage, snagu treba ugovarati na razini 117,65% početne razine rezanja [6].

Kako je cijena kWh proizvedena vlastitim agregatima viša od cijene kupljenog kWh, postoji optimalna vrijednost limita rezanja pri kojoj će ukupni troškovi električne energije biti najmanji. Optimalni limit ovisi o tarifnom sustavu distributera električne energije, cijeni vlastitoga kWh, mjesečnom dijagramu opterećenja i ugovorenoj snazi.

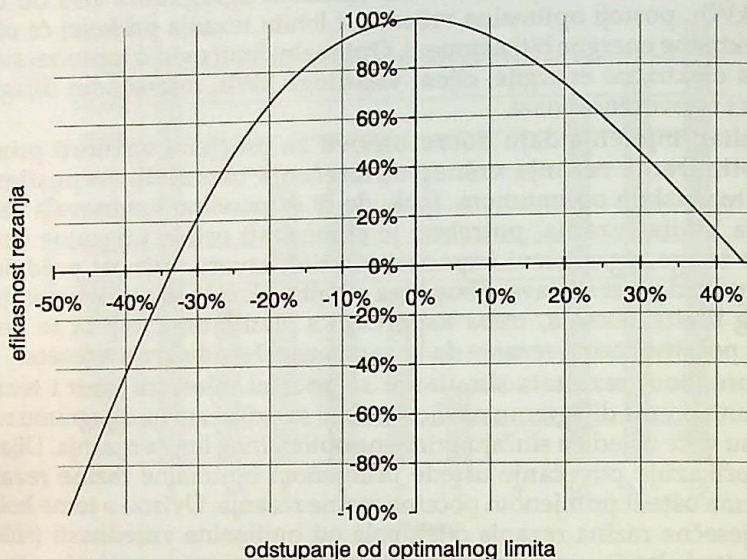
Rezultati mjerenja daju dobru osnovu za procjenu važnosti primjene modela optimiranja rezanja vršnog opterećenja usporedbom postignutih rezultata s teoretskim optimumom. Ipak, da bi se pravilno vrednovala važnost optimiranja limita rezanja, potrebno je eliminirati ostale utjecajne činioce: ugovaranje snage, ograničeni kapacitet vlastitih izvora, točnost predviđanja potrošnje i pouzdanost sustava. Zbog toga rezultate koji bi se postigli primjenom optimalnog limita rezanja, treba usporediti s rezultatima koji bi se postigli primjenom početne razine rezanja da bi se ona zadržala do kraja mjeseca.

Usporedbom rezultata simulacije za početni mjesečni limit i teoretski optimalni limit prema dijagramu na slici 1., a koji su prikazani na dijagramu na slici 2., vidljive su veće uštede u slučaju primjene optimalnog limita rezanja. Dijagram na slici 4. prikazuje povećanje uštede primjenom optimalne razine rezanja u odnosu prema uštedi primjenom početne razine rezanja. Ovisno o tome koliko je početna mjesečna razina rezanja odstupala od optimalne vrijednosti (slika 1.), povećanje uštede kreće se od 29 US\$ do 8.668 US\$. Zbrojeno za promatranih deset mjeseci, ukupna ušteta iznosi 34.026 US\$ što čini 7,67% od rezanja s početnim mjesečnim limitom, a 5,96% ukupnih troškova električne energije pri ugovaranju snage prema povijesnom maksimumu.

Budući da je početna razina rezanja vrijednost koja nije eksplicitno određena dijagramom opterećenja poput optimalnog limita rezanja već ovisi o



Slika 4. Ušteta zbog optimiranja limita rezanja za prvih 10 mjeseci korištenja sustava rezanja vršnog opterećenja



Slika 5. Ovisnost efikasnosti rezanja vršnog opterećenja o odstupanju od optimalnog limita rezanja

predviđanju, ugovorenoj snazi, snazi agregata i slobodnoj procjeni energetičara, ovisnost uštede o odabranoj razini rezanja može se egzaktnije vidjeti iz dijagrama na slici 5., na kojem je prikazana efikasnost rezanja kao funkcija odstupanja limita rezanja od optimalne vrijednosti. Efikasnost rezanja  $\eta_r$  ostvarena je ušteda izražena u postotku teoretski moguće uštede u odnosu prema cijeni energije bez rezanja:

gdje je:

$$\eta_r = \frac{c_{br} - c(P_r)}{c_{br} - c_{or}}$$

$c_{br}$  – cijena bez rezanja uz točno ugovaranje

$c(P_r)$  – cijena uz zadani limit rezanja

$c_{or}$  – cijena uz optimalni limit rezanja

$P_r$  – zadani limit rezanja

Odstupanje od optimuma  $\Delta P_r$  računato je po izrazu:

gdje je:

$$\Delta P_r = \frac{P_r - P_o}{P_o}$$

$P_o$  – optimalni limit rezanja

Važno je uočiti da mala odstupanja limita rezanja od optimalne vrijednosti, do kojih mora doći zbog nemogućnosti egzaktnog predviđanja dijagrama opterećenja, bitno ne umanjuju efekte rezanja. Tako, na primjer, odstupanje od +5% od optimalnog limita rezanja prema dijagramu na slici 5., smanjuje efikasnost za samo 2,84%. S porastom odstupanja efikasnost progresivno pada, pa npr. odstupanje od +20% smanjuje efikasnost za 30% (slika 5.). To znači da će i grublje metode predviđanja opterećenja dati vrlo dobre rezultate ako se primijeni optimiranje limita rezanja. Ako se razina rezanja određuje bez egzaktnog postupka, može doći do većih pomaka od optimalne vrijednosti, a to znači i mnogo manje efikasnosti rezanja. Uz to, model optimiranja u kombinaciji s modelom predviđanja daje egzaktnu vrijednost limita rezanja koja se može automatski primijeniti, isključujući tako mogućnost ljudske pogreške.

#### 4. UČINCI PREDVIĐANJA POTROŠNJE

Predviđanje potrošnje nuždan je preduvjet za primjenu modela optimiranja sa svrhom određivanja limita rezanja za sljedeće obračunsko razdoblje. U slučaju kada je snaga vlastitih agregata ograničavajući faktor, predviđanje potrošnje presudno je jer omogućuje točnije ugovaranje električne snage, a ako brodogradilište ne raspolaže sustavom za rezanje vršnog opterećenja, to je jedina mogućnost smanjenja troškova.

Planiranje je mnogo lakše izvesti u brodogradilištima bez oscilacija proizvodnje, pogotovo ako se grade veće serije brodova kao što je to npr. slučaj u nekim japanskim brodogradilištima. Hrvatska brodogradilišta grade uglavnom pojedinačne brodove ili vrlo male serije od nekoliko brodova i to s promjenjivim intenzitetom proizvodnje. Najteže je planirati potrošnju u remontnim brodogradilištima, gdje se i sama proizvodnja teško može točnije planirati jer se termini često pomiču, a tijekom remonta pojavljuju se i novi neočekivani poslovi. U takvim slučajevima dolazi do većeg odstupanja od predviđanja.

Ako je ostavljena dovoljna rezerva snage, malo odstupanje početne razine rezanja od optimuma neće bitno umanjiti uštedu. Ako je rezerva snage, sadržana u snazi generatora, nedovoljna, a potrošnja naraste iznad očekivanja, početna razina rezanja morat će se tijekom mjeseca povećavati. Sva snaga odrezana u pojasu od stare do nove razine nepotrebno je proizvedena pa razlika u cijeni kWh smanjuje učinke rezanja. Nepovoljnije je ako se neočekivana potrošnja pojavi krajem mjeseca jer to znači da se cijeli mjesec rezalo na preniskoj razini, da bi na kraju mjeseca bila manja od očekivane. Pri premaloj instaliranoj snazi ušteda na cijeni snage bila manja od očekivane. Pri prevelikoj instaliranoj snazi generatora može uz izostanak planiranja potrošnje doći do prekoračenja dopuštene snage i znatna povećanja troškova. Zbog toga je u slučaju malog kapaciteta vlastitih agregata, točnost planiranja potrošnje od presudnog značenja.

Postoje i drugi razlozi zbog kojih je preporučljivo da sustav rezanja raspolaže dovoljnom rezervom snage: 1. veća instalirana snaga trebala bi biti povezana i s većim brojem agregata što daje veću raspoloživost izvora; 2. normalno je da se opseg proizvodnje povećava tako da će s vremenom trebati i veća snaga za rezanje; 3. u uvjetima potpuna nestanka napona mreže zbog kvara na električnom sustavu ili redukcije potrošnje, vlastiti izvori mogu dati dovoljno snage za rad brodogradilišta čime se sprječavaju golemi gubici koji bi nastali

zaustavljanjem proizvodnje, ali i povećava sigurnost radnika na objektu. Iz navedenih razloga instalirana snaga vlastitih agregata u praksi se nikada ne može smatrati prevelikom. Dovoljnim rezervama snage može se smatrati stalna raspoloživa snaga koja odgovara razlici povijesnog maksimuma i početnog (optimalnog) limita rezanja.

Ako postoje dovoljne rezerve snage, utjecaj predviđanja potrošnje treba vrednovati samo kroz smanjenje troškova električne energije optimiranjem razine rezanja vršnog opterećenja, kao što je to učinjeno u trećem poglavlju. Najbolji rezultati postizat će se kada se sustav gospodarenja energijom poveže sa sustavom planiranja, organizacije i praćenja proizvodnje, što će omogućiti dinamično kratkoročno i dugoročno predviđanje potrošnje te preraspodjelu radnih aktivnosti s ciljem niveliranja dijagrama opterećenja, a u mjeri u kojoj se ne remeti proizvodni proces.

## 5. UČINCI POUZDANOSTI SUSTAVA

Pouzdanost sustava rezanja vršnog opterećenja presudna je za njegovu primjenu. Budući da se velike uštede mogu postići jedino uz ugovaranje mnogo niže snage od planirane, računajući na energiju vlastitih izvora, samo jedan otkaz sustava može pokvariti cjelogodišnji trud. U takvoj situaciji panično isključivanje potrošnje izazvalo bi, zbog zastoja u proizvodnji, i veće troškove od sama prekoračenja dopuštene snage. Veći broj ispada sustava sasvim odbacuje opravdanost njegove primjene. Na raspoloživost sustava presudno utječu broj agregata i kvalitetno riješeno upravljanje. Razuman izbor bio bi sustav s minimalno tri agregata od kojih dva daju dovoljnu rezervu snage, a treći je rezerva za slučaj kvara odnosno redovita održavanja.

Analiza snimljenih dijagrama pokazala je niz grešaka i kvarova na sustavu, koji su rezultirali podizanjem limita rezanja tijekom mjeseca i kada je bila na raspolaganju dovoljna snaga agregata. Iz dijagrama na slici 1. može se vidjeti da je početni limit rezanja u 5 od 10 promatranih mjeseci povećavan. U zadnja tri mjeseca, zbog previsoko ugovorene snage, rezanja nije ni bilo, dok je cijeli 7. mjesec karakterizirala iznimno niska potrošnja pa je agregat samo jednokratno ručno uključen, prije pojave vrlo visokoga vršnog opterećenja. Samo je u 6. mjesecu sustav donekle ispravno funkcionirao, povisivši početni limit za podnošljivih 22 kW.

Na ovome mjestu umjesto analize grešaka, koje se moraju i mogu otkloniti, važnije je analizirati njihove posljedice. Na dijagramu prikazanom na slici 2., usporedbom troškova električne energije s početnom razinom rezanja i stvarno ostvarenih troškova, jasno se vidi opseg gubitaka nastalih isključivo zbog nepouzdanosti sustava. Zbrojeno, za prvih sedam mjeseci (u zadnja tri nije ni bilo rezanja), oni iznose 40.633 US\$ i znače povećanje troškova električne energije od 13,11%

## 5. ZAKLJUČAK

Visoka cijena obračunske vršne snage i nemogućnost njezina dovoljno točnog predviđanja umnogome povećavaju troškove električne energije u brodogradilištu. Sustav rezanja vršne snage dodavanjem energije vlastitih izvora, daje odlične rezultate koje je, međutim, teško vrednovati. Usporedba troškova prije i nakon uvođenja sustava ne daje relevantne pokazatelje zbog promjenjiva intenziteta proizvodnje. Ispravno vrednovanje učinka sustava rezanja može se provesti samo na osnovi simulacije rezanja korištenjem modela optimiranja limita rezanja vršnog opterećenja.

Ušteda postignuta primjenom sustava za rezanje vršnog opterećenja, može se podijeliti na tri dijela: uštedu koja proizlazi iz ugovaranja snage, uštedu koja proizlazi iz optimiranja limita rezanja i uštedu koja proizlazi iz točnog predviđanja potrošnje. Velika instalirana snaga vlastitih agregata, umanjuje značenje predviđanja potrošnje. Na učinke sustava rezanja vršnog opterećenja presudno utječe njegova pouzdanost. Gubici koji mogu nastati zbog grešaka i kvarova na sustavu, višestruko premašuju mogućnosti uštede.

Analiza podataka sakupljenih tijekom prvih deset mjeseci primjene sustava rezanja vršnog opterećenja dodavanjem energije u brodogradilištu, pokazala je da su unatoč slabom predviđanju potrošnje i niskoj pouzdanosti sustava, postignute velike uštede. Dovoljno točno predviđanje potrošnje može se ostvariti razvojem metoda planiranja potrošnje, koje bi se temeljile na podacima dobivenim pomoću sustava gospodarenja energijom, ali i bazama podataka stvorenima u sustavu planiranja, organizacije i praćenja proizvodnje.

## 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, 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, Ljubljana 1997.
- [4] I. Vlahinić, V. Tomas, D. Vučetić, The Computerised Electrical Energy Management System For Industrial Production Systems, Korema, Dubrovnik 1998.
- [5] I. Vlahinić, D. Vučetić, V. Tomas, Peak Load Cutting Limit Determination in Harbours and Shipyards, ICTS, Trst-Patras 1998.
- [6] I. Vlahinić, D. Vučetić, A. Šestan, Smanjenje troškova električne energije u brodogradilištu novogradnji dodavanjem energije vlastitih izvora, Pomorstvo, 13, Rijeka, 1999.

*Summary*

EVALUATION OF ELECTRIC POWER PEAK LOAD CUTTING EFFECTS IN SHIPYARD

*In this article the first ten months of peak load cutting system application in one Croatian shipyard are analysed. The system is based on adding the power of own power sources. The exact method for the determination and analysis of savings achieved by system application is developed. The method is based on the load cutting limit optimisation model using computerised cutting simulation, on supposition of not influencing electric energy consumption. The effects achieved by the system are divided into savings achieved from electric power negotiations, savings from load cutting limit optimisation and savings by load forecasting. The influence of the system reliability on achieved effects is specially elaborated. The existence of the sufficient power reserve, comprehended in the available power of own power sources, diminishes the importance of the load forecasting. Load cutting efficiency is defined as the ratio between the performed savings and the theoretical savings calculated by the optimisation model.*

*Key words: electric power, shipyard, peak load, cutting, evaluation*