

Zoran NIKOLIĆ¹, Vladimir M. ŠILJKUT², Zlatimir ŽIVANOVIĆ³

NEPREKIDNO NAPAЈANJE AUTONOMNIH POTROŠAČA VRŠNE SNAGE 5kW KORIŠĆENJEM HIBRIDNOG (PV I DA) NAPAЈANJA

Apstrakt: U radu je prikazan sistem hibridnog (fotonaponskog i dizelagregatskog) napajanja autonomnih potrošača koji maksimalno koristi fotonaponsko napajanje radi generisanja električne energije a optimalno koristi agregat sa unutrašnjim sagorevanjem, kako bi se minimizirala potrošnja fosilnih goriva. Rešenje je prilagođeno napajanju potrošača tokom cele godine. Na primeru napajanja potrošača vršne snage 5 kW i dnevne potrošnje energije oko 40 kWh detaljnije je objašnjen izbor komponenata ovog sistema. U radu su prikazani rezultati konverzije solarne energije u električnu energiju tokom jedne godine u Beogradu. Objasnen je teoretski dijagram specifične potrošnje dizel agregata kao i metod optimalne potrošnje goriva. U odnosu na postojeće dizel agregatsko napajanje postiže se ušteda od oko 6.500 l dizel goriva godišnje čime se znatno smanjuju eksploatacioni troškovi ove vrste napajanja.

Ključne reči: *hibridno napajanje, mali dizel agregati, fotonaponsko napajanje, energetska ekonomičnost*

1. UVOD

Snaga električnog izvora za napajanje nekog objekta zavisi od procesa rada i života u objektu i navika ljudi koji tamo obitavaju, i određuje se za svaki objekat pojedinačno. Kako je proizvodnja električne energije proces koji direktno utiče na investicione i eksploatacione troškove, generalno se teži ugradnji sistema što manje snage. Ako se na objekat ugradi izvor manje snage nego što je potrebno, sistem neće moći da ispunji predviđene zadatke, tehničke karakteristike biće ispod zahte-

¹ Prof. dr Zoran Nikolić, Institut tehničkih nauka SANU, Knez Mihailova br. 35, 11000 Beograd, SR Srbija, e-mail: zoran.nikolic@itn.sanu.ac.rs

² Vladimir M. Šiljkut, Elektrodistribucija „Beograd”, Masarikova br. 1–3, 11000 Beograd, SR Srbija, e-mail: vladash@edb.rs

³ Prof. dr Zlatimir Živanović, Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, 11000 Beograd, SR Srbija, e-mail: zzivanovic@vin.bg.ac.rs

vanih. Ali ako se snaga izvora predimenzioniše, uvećavaju se investicioni a često i eksploatacioni troškovi izvora električne energije.

Uobičajen sistem neprekidnog napajanje autonomnih potrošača male vršne snage od 5 kW i dnevne potrebne energije 40 kWh obavlja se korišćenjem DA napajanja i poseduju određene nedostatke:

- eksploatacioni troškovi potrošnje fosilnih goriva su visoki i sve manje prihvatljivi
- dostava dizel goriva na izolovana mesta na kojima se nalaze DA stanice tokom zime često predstavlja problem
- redovno održavanje DA je takođe problem
- kada su slabo opterećeni, DA imaju povećanu specifičnu potrošnju goriva kao i emisiju izduvnih gasova
- DA stvaraju buku kao i određene vibracije,

Statistički podaci pokazuju da DA snage 6 kW (7,5 kVA) koji dnevno generišu oko 40 kWh električne energije, potroši oko 8,100 l dizel goriva godišnje. Prosečna dnevna potrošnja iznosi oko 22,2 l dizel goriva.

2. MOGUĆI NAČINI ZA SMANJENJE POTROŠNJE DIZEL GORIVA

Smanjenje potrošnje dizel goriva i – samim tim – smanjenje godišnjih eksploatacionih troškova izvora električne energije, analizirane su i za slučajeve kada su nominalne snage veće od nekoliko MW^[1]. Smanjenje se može postići na više načina:

1. Korišćenje obnovljivih izvora energije

Uprkos postojanje više vrsta obnovljivih izvora, koja se može koristiti praktično i efikasno, za male snage, za sada najviše odgovaraju fotonaponski paneli, koji pretvaraju sunčevu energiju direktno u električnu energiju. Optimalni uslovi za primenu tog snabdevanja analizirane su u mnogim radovima, na primer^[2].

2. Efikasnije korišćenje goriva u DA

U slučaju kada DA radi u optimalnoj radnoj tački, moguće je postići potrošnju dizel goriva od cca 0,3 l po generisanom kWh električne energije. To je oko 40 % manja potrošnja, u poređenju sa prosečnim 0,5 l po električne energije, koliko DA u proseku troše tokom eksploatacije kada direktno napajaju potrošače.

3. Hibridno napajanje potrošača

Optimalni rezultati u uštedi neobnovljivih goriva se mogu postići korišćenjem napred navedenih metoda, efikasnijim korišćenjem dizel goriva u DA i korišćenjem obnovljivih energetskih izvora. Takva rešenja nazivaju se hibridni (PV i DA) sistemi napajanja. Hibridni sistemi poseduju određene prednosti^[3], kojima se u velikoj meri nadoknađuju nedostaci oba sistema, kao što su:

– Poboljšana pouzdanost napajanja i smanjenje zastoja u radu postižu se kombinacijom više izvora napajanja koji obezbeđuju električnu energiju. Fotonaponski paneli zahtevaju manje održavanje od DA i na taj način smanjuju zastoje u toku rada, kao i tekuće održavanje^[4].

– Kontinuirano napajanje se dobija povezivanjem u paralelan rad DA ili PV sa akumulatorskim baterijama, povećana je mogućnost prihvatanja udarnih ili polarnih struja. Na taj način, sistem je manje podložan prekidu isporuke energije.

– Smanjena emisija buke i štetnih gasova dobija se imajući u vidu činjenice da DA rade povremeno i tada emituju u vazduh zagađujuće čestice, kao i buku tokom rada. Time pokazuju bitnu razliku od obnovljivih izvora energije, koji poseduju tehnologije saglasne zaštiti životne sredine.

– Duži vek trajanja dobija se samom činjenicom da DA radi samo po potrebi i to znatno kraće vreme tokom godine. Naizmeničan rad dva dizel električna gregata koji rade u optimalnom režimu eksploatacije, omogućava maksimalan vek trajanja ovih agregata. Pored toga, optimalno pražnjenje akumulatorskih baterija doprinosi njihovom dužem veku trajanja.

– Smanjenje troškova goriva. Obnovljivi izvor energije ili hibridni sistem napajanja se pokazuje kao jako isplativ način za generisanje električne energije, s obzirom na uštede u tekućoj potrošnji fosilnih goriva i nižim troškovima održavanja. Za konvencionalni DA sistem u udaljenoj oblasti, troškovi goriva i transportni troškovi su obično dosta visoki, kao i servisni troškovi. Troškovi obnovljivih izvora energije se prikazuju samo kao investicioni ili kapitalni, tako da su tekući troškovi veoma niski.

3. KORIŠĆENJE FOTONAPONSKOG NAPAJANJA

Ispitivanje mogućnosti proizvodnje električne energije koristeći PV module, sprovedeno je u Srbiji, tokom 2012^[5], kao rezultat su prikazane vrednosti proizvedene mesečne električne energije, mesečno, na izlazima PV panele. Ove vrednosti su prikazani na slici 1. Tokom ispitivanja, 2012. godine u Beogradu, PV paneli nominalne snage 160 W, površine 1 m², bile su fiksno postavljene pod uglom od 35⁰ prema horizontali, i usmerene direktno ka jugu.

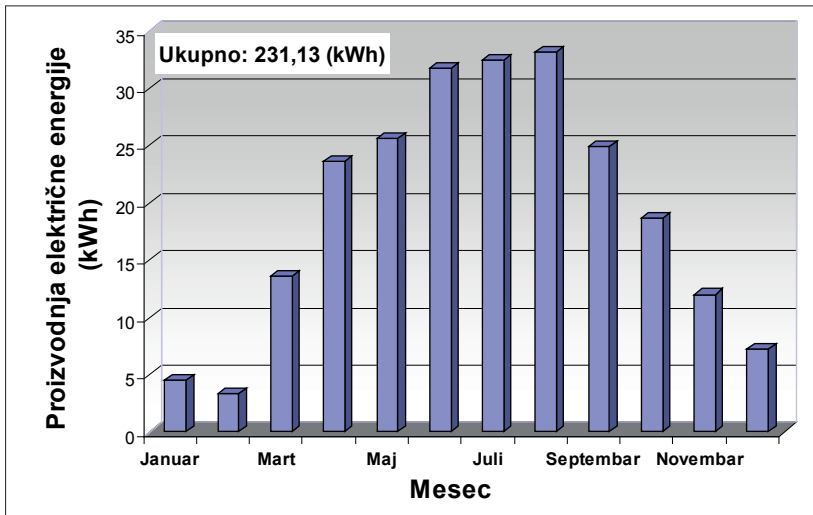
Mesečna proizvodnja električne energije u decembru 2012 iznosila je 7,28 kWh. Minimalna mesečna proizvodnja električne energije bila je u februaru i to samo 3,37 kWh. Mesečna proizvodnja električne energije u junu iznosila je 31,72 kWh. Maksimalna mesečna proizvodnja električne energije bila je u avgustu i iznosila je 33,17 kWh.

Raspoloživo prosečno vreme trajanja za proizvodnju električne energije, T_{PV} , za slučaj PV panela nazivne snage 160 W, tokom tri letnja meseca (Jun, Juli i Av-

gust) u Srbiji iznosi oko 6,6 h. Za vreme tri zimska meseca (Decembar, Januar i Februar) iznosi samo oko 1,06 h.

$$1,06 h \leq T_{PV} \leq 6,6 h \quad (1)$$

Ako se подели ukupna godišnja proizvodnja električne energije proizvedene u PV panelu sa nominalnom snagom PV panela, dobija se ukupan broj raspoloživih sunčanih sati u Srbiji:



Slika 1. Godišnja proizvodnja električne energije PV panela nominalne snage 160 W, orijentisanog ka jugu i postavljenim pod fiksnim uglom 350 prema horizontalnoj osi

$$T_A = \frac{\sum_{i=1}^{12} E_i}{P_{PV}} \quad (2)$$

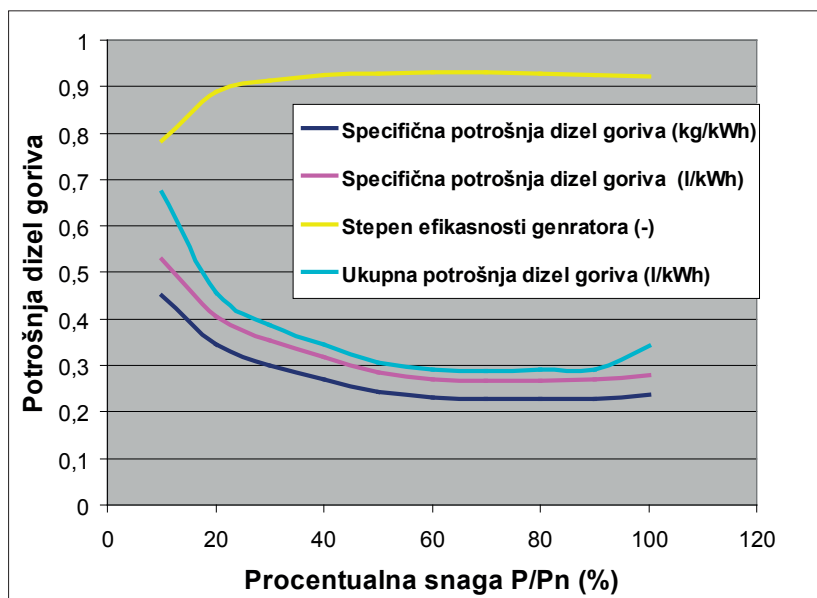
U našem slučaju, ukupna godišnja proizvodnja električne energije iz PV panela iznosi 231,13 kWh, u skladu sa slikom 1. Nazivna snaga PV panela iznosi 160 W. U skladu sa jednačinom (2), ukupan broj raspoloživih sunčanih sati u Srbiji tokom 2012. godine bio je:

$$T_A = 1.444,5 h \quad (3)$$

Ova vrednost je veoma slična podacima dobijenim preko EU Interaktivnih mapa za fotonaponske GIS sisteme^[6], a za lokaciju Beograda, gde su napravljena ova merenja.

4. EFIKASNO KORIŠĆENJE GORIVA U DIZEL AGREGATIMA

Tipična šema specifične potrošnje goriva u dizel motoru prikazana na slici 2, pokazuje da je optimalni rad motora u generatorskom režimu, odnosno, pri konstantnoj brzini obrtanja od 1500 min^{-1} , u rasponu od 70 do 90% nominalne snage motora^[7,8]. Opterećenja iznad ovog opsega snaga se ne preporučuju jer se dizel motor nalazi blizu granice preopterećenje, sagorevanje postaje slabije i povećavaju se uzduvni gasovi. Mala opterećenja su loša za rad motora takođe, jer se specifična potrošnja goriva znatno povećava, sagorevanje goriva postaje slabije, a radni vek motora se skraćuje.



Slika 2. Specifična potrošnja dizel goriva u odnosu na opterećenje agregata

Osnovni zadatak je da se optimizira rad elektrane, a da se smanji potrošnja goriva. Optimalni radni opseg DA može se definisati u skladu sa sledećom relacijom:

$$P_{DA,\min} \leq \Delta P_{DA,opt} \leq P_{DA,\max} \quad (4)$$

gde je $(P_{DA,\min}, P_{DA,\max})$ predstavljaju granice optimalnog opsega dizel motora $\Delta P_{DA,opt}$, koji se može definisati kao:

$$0.6 \cdot P_{DA,n} \leq \Delta P_{DA,opt} \leq 0.8 \cdot P_{DA,n} \quad (5)$$

Osnovna ideja je sledeća: dizel motori treba uvek da rade sa stalnim opterećenjem ili sa stalnom snagom, i to u tački optimalne potrošnje, kao izvor stalnog opterećenja. Trenutna potrošnja goriva DA FC_{gi} , može se izračunati prema jednačini^[9]:

$$FC_{gi}(P_{gi}) = b_{e,gi}(P_{gi}) \cdot P_{gi} \quad (6)$$

Za dizel motore sa malim snagama i srednjim brzinama obrtanja $b_{e,g}$, uobičajeno je da se koristi konveksna kriva uz minimalnu vrednost od cca 80% instalirane snage, odnosno $0,8 P_{n,g}$.

5. OPIS OPTIMALNOG REŠENJA HIBRIDNOG NAPAJANJA

Fotonaponski paneli (PV) predstavljaju osnovni izvor električne energije, dok DA predstavlja pomoćni izvor električne energije koji se koristi u periodima bez dovoljno insolacije. Akumulatorske baterije su skladišta električne energije koje se koriste u oba slučaja napajanja.

Hibridni sistem napajanja je napravljen tako da u potpunosti zadovolji potrebe za električnom energijom u letnjim mesecima iz PV. Tokom zimskih meseci, proizvodnja električne energije se više oslanja na DA, a potrošnja dizel goriva tada značajno raste.

Princip rada komponenata hibridnog sistema je sledeći:

U normalnom radnom režimu potrošači se napajaju preko invertora i akumulatorskih baterija. Tokom dana, PV dopunjuju akumulatore i napajaju potrošače preko invertora. Nominalna snaga PV treba da bude tolika da makar u letnjem periodu za 20% bude veća od dnevne potrošnje imajući u vidu i ukupne gubitke od 24,5%.

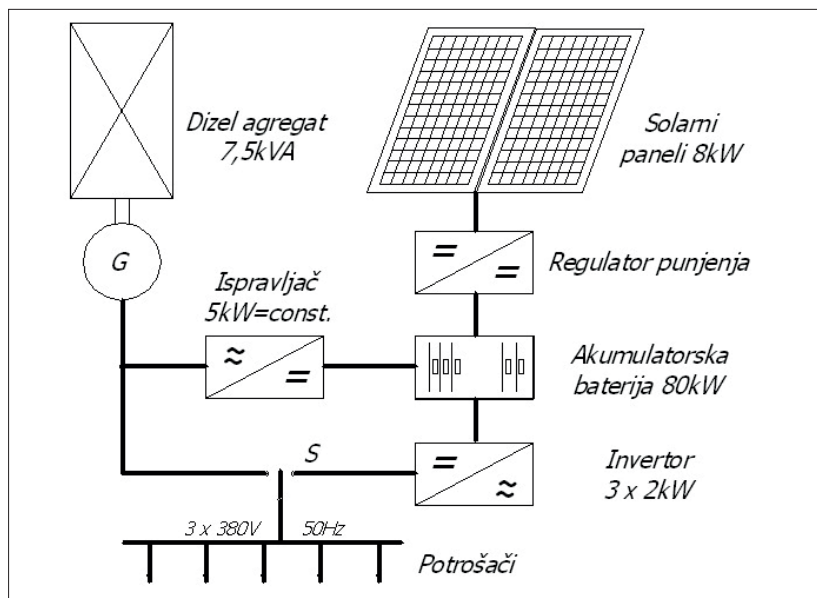
$$P_{PV,n} = \frac{E_d}{T_{PV,leti}} \cdot \frac{1}{1 - g_{ukupno}} \quad (7)$$

U našem slučaju, nominalna snaga PV iznosi 8 kW.

Akumulatori imaju mogućnost skladištenja dvodnevne potrošnje energije ili oko 80 kWh, tako da se nominalni kapacitet može izračunati iz jednačine.

$$Q_n = \frac{2E_d}{U_{b,n}} \quad (8)$$

Tokom letnjeg perioda PV mogu stvoriti više energije nego što se potroši tako da se akumulatorske baterije neće prazniti više od 50% napunjenosti. Ovo sa jedne strane ostavlja mogućnost prevazilaženja perioda sa kišnim danima za potrebnom električnom energijom a sa druge strane omogućava i duži vek trajanja aku-



Slika 3. Jednopolna shema hibridnog sistema za autonomno napajanje električnom energijom vršnom snagom do 5 kW i dnevnom energijom od 40 kWh

mulatorske baterije. Dozvoljeno je pražnjenje baterije do 30% DoD. Tada se uključuje DA koji konstantnom snagom dopunjuje akumulatorske baterije.

Snaga DA treba da je usklađena sa snagom potrošača, tako da maksimalna snaga potrošača bude jednaka optimalnoj snazi opterećenja DA kada mu je potrošnja po proizvedenom kWh minimalna ili oko 80% nominalne snage. U našem slučaju DA treba da ima nominalnu snagu 7,5 kVA (6 kW) koji konstantnom snagom od oko 5 kW dopunjuje akumulatorske baterije.

DA se isključuje kada energija uskladištena u baterijama dostigla 80% svoje nominalne vrednosti ili kad dostigne vrednost od oko 64 kWh. U slučaju kvara obnovljivog izvora električne energije, DA može direktno da napaja potrošača.

5. GODIŠNJE UŠTEDE DIZEL GORIVA

Ako se pretpostavi da srednje dnevne potrošnje električne energije iznosi 40 kWh, tokom cele godine će ukupna godišnja potrošnja iznositi oko 14.600 kWh. Uz pretpostavku da će biti 1.444,5 h sa suncem, PV ukupne snage od 8,4 kW može generisati korisnu električnu energiju od cca 9,161 kWh po godini. Pretposta-

čili smo da ukupni gubici u sistemu su 24,5%, u skladu sa EU Interaktivne mape za PV GIS-a^[18].

Preostalih 5.439 kWh je potrebno dobiti od DA. Uzimajući u obzir specifične potrošnje dizel goriva za 0,3 l/kWh, moguće je odrediti godišnju potrošnju dizel goriva od cca 1.632 l. Korišćenjem predloženog, hibridnog sistema napajanja potrošača, godišnje uštede će iznositi cca 6.468 l dizel goriva. Potrošnja goriva se tokom godine jako razlikuje tako da je u zimskom periodu znatno veća nego tokom letnjih meseci kada je minimalna.

6. VEK TRAJANJA HIBRIDNE ELEKTRANE

Dizel agregati male snage imaju vek trajanja do 20.000 radnih sati, sa radovnim servisima. Ako samo DA napaja potrošače vek trajanja mu iznosi oko 2 godine i 3,5 meseca neprekidnog rada.

Kada se nalazi u hibridnoj konfiguraciji, DA će godišnje raditi:

$$T = \frac{E_{DA}}{P_n} = \frac{5.439 kWh}{6 kW} = 906,5h \quad (8)$$

Tako da mu vek trajanja iznosi oko 18 godina.

PV imaju vek trajanja preko 25 godina, mada tada dolazi do postepenog smanjenja nivoa konverzije zračenja sunca u električnu energiju, za oko 15%.

Iz dijagrama pražnjenja olovnih akumulatora sa gelom, kada se prazne akumulatori do 50% DOD vek trajanja iznosi oko 3000 ciklusa ili 8 godina i 3 meseca, posle čega ih je potrebno menjati.

7. ZAKLJUČAK

Može se zaključiti da rešenje hibridnog sistema napajanja potrošača vršnom snagom 5 kW i dnevnom potrošnjom električne energije od 40 kWh sa PV i DA napajanjem predstavlja znatno pogodnije napajanje sa određenim prednostima u odnosu na DA napajanje imajući u vidu sledeće prednosti:

1. Za prosečnu dnevnu potrošnju električne energije od 40 kWh, godišnja potrošnja dizel goriva će iznositi 1.632 l što je za skoro 80% manje od godišnje potrošnje napajanja sa DA od 8,100 l.

2. PV će, uzimajući u obzir ukupne gubitke od 24,5%, uspeti da generiše 9,161 kWh korisne električne energije.

3. Projektovani vek trajanja hibridne elektrane iznosi 25 godina, mada će posle svakih 8 godina i 3 meseca biti potrebno da se zamene akumulatorske baterije a posle 18 godina i DA.

4. Zagadenje životne sredine proizvodima sagorevanjem dizel goriva će se značajno smanjiti i postati minimalno.

5. Održavanje sistema će biti minimalna, jer će DA raditi u generatorskom režimu, u optimalnoj radnoj tački, kao izvor stalne snage pri čemu će i vek trajanja DA biti najduži.

ZAHVALNOST

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije, preko projekta broj TR 36035, TR 35041 i TR 35042.

SKRAĆENICE

T_{PV}	Srednje dnevno raspoloživo vreme za proizvodnju električne energije (h)
T_A	Godišnje raspoloživo vreme za proizvodnju električne energije (h)
$P_{DA,min}$	Donja granica optimalnog opsega rada dizel agregata (kW)
$P_{DA,max}$	Gornja granica optimalnog opsega rada dizel agregata (kW)
$\Delta P_{DA,opt}$	Optimalni opseg rada dizel agregata (kW)
$P_{DA,n}$	Nominalna snaga dizel agregata (kW)
$FC_{gi}(P_{gi})$	Trenutna potrošnja goriva dizel agregata (kg / h)
$b_{e,gi}(P_{gi})$	Specifična potrošnja dizel motora (kg / kWh)
P_{gi}	Trenutna snaga generatora (kW)
$P_{PV,n}$	Nominalna snaga fotonaponskih panela (kW)
E_d	Dnevna potrošnja električne energije (kWh)
ξ_{ukupno}	Ukupni gubici od PV do potrošača
Q	Nominalni kapacitet baterije (Ah)
$U_{b,n}$	Nominalni napon baterije (V)
$T_{DA,A}$	Vreme rada dizel agregata tokom godine (h)
$E_{DA,A}$	Energija koju dizel agregata generiše tokom godine (kWh)
$P_{DA,opt}$	Optimalna snaga dizel agregata (kW)
DA	Dizel agregat
PV	Fotonaponski paneli

EU	Evropska unija
GIS	Geografski informacioni sistem
DoD	Dubina pražnjenja baterije

LITERATURA

- [1] Rehman S, Al-Hadhrami L. M, Study of a solar PV–diesel–battery hybrid power system for a remotely located population near Rafha, Saudi Arabia, *Energy*, 2010; 35, 12: 4986–4995.
- [2] Shen W. X, Optimally sizing of solar array and battery in a standalone photovoltaic system in Malaysia, *Renewable Energy*, 2009; 34, 1: 348–352.
- [3] Baharuddin A, Kamaruzzaman S, Mohdazhar A. R, Mohd Y. O, Azami Z, Ahmad M, Hybrid Photovoltaic Diesel System in a Cable Car Resort Facility, *European Journal of Scientific Research*, 2009; 26, 1:13–19.
- [4] Kamaruzzaman S, Mohd Y. O, Performance of a Photovoltaic Diesel Hybrid System In Malaysia, *ISESCO Science and Technology Vision*, 2005; 1,37–39.
- [5] <http://www.piko-solar-portal.de/PlantViewCharts.aspx>
- [6] Photovoltaic Geographical Information System, European Commission Joint Research Centre, Ispra, Italy, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [7] Marintek Neste generasjon innenriksferjer – optimalt fremdriftssystem, Marintek report MT23 A01–008, 2001, 790455.70.01.
- [8] Wood A. J, Wollenberg B. F, Power generation, operation, and control, J. Wiley & Sons, New York, 1996.
- [9] Logenthiran T, Srinivasan D, Optimal selection and sizing of distributed energy resources for distributed power systems, *J. Renewable Sustainable Energy* 2012; 4, 053119

UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY OF THE AUTONOMOUS CONSUMERS WITH 5KW PEAK POWER BY USE OF A HYBRID (PV AND DA) POWER SUPPLY

Abstract: The hybrid system (PV and diesel aggregates) power supply of autonomous consumers with maximal use of the photovoltaic power for generating electricity and optimal use of the internal combustion engine, in order to minimize the consumption of fossil fuels, is presented in this paper. The solution is adjusted to power supply customers throughout the whole year. As an example, in detail is explained the choice of the components of the system of power supply the consumers with peak power of 5 and daily energy consumption of 40 . The results of converting solar energy into electricity in a last year in Belgrade are presented in this paper. The theoretical diagram of specific energy consumption of diesel aggregates as well as the method of optimal fuel consumption is explained, too. In regard to existing diesel generator supply, saving of about 6,500 diesel fuel per year, significantly reduce the operating costs of this type of power supply.

Key words: *hybrid supply, small diesel aggregates, photovoltaic supply, energy efficiency*