



„Upravo sam obznanio jedan pronalazak koji će električarima pokazati kako da proizvedu ogromne električne napone i dejstva. Pomoću njih će se postići čudesni rezultati. Ljudski glas i slika munjevito će se bez žica prenositi oko planete, energija će se prenositi kroz prostor, okeanske razorne oluje postaće bezbedne za plovidbu, transport će biti olakšan, kiše izazvane po potrebi i, možda, osloboditi neiscrpan izvor energije.

Napredak ove vrste će, u vremenima koja dolaze, otkloniti fizički uzrok rata, od kojih je glavni neizmerna veličina ove planete. Postepeno ukidanje razdaljine će ljudima omogućiti bliskiji kontakt i uspostaviti harmoniju njihovih gledišta i stremljenja. Kroćenje prirodnih sila će odagnati bedu i oskudicu i dati jednostavna sredstva za bezbednu i komfornu egzistenciju.“

(Nikola Tesla, „Nauka i pronalasci su značajne sile koje će dovesti do prestanka rata“, *The Sun*, 20. decembar 1914)

Alkalno metalno termoelektrično pretvaranje vanzemaljskog sunčevog zračenja i bežični prenos proizvedene snage do Zemlje – koliko je daleko ostvarenje?

Alkali metal thermoelectric conversion of extraterrestrial solar radiation and wireless transmission of generated power to earth – how far is the realization?

Marija S. TODORVIĆ*, Zorica CIVRIĆ**, Olivera EĆIM-ĐURIĆ***

* Univerzitet u Beogradu, Srbija, i Jugoistočni univerzitet, Nanjing, Kina;

** Muzej nauke i tehnike, Beograd, Srbija, *** Univerzitet u Beogradu, Srbija;

deresmt@eunet.rs, zorica.civric@gmail.com, nera@agrif.bg.ac.rs

Ključne reči:
alkalno metalno termoelektrično pretvaranje – konverzija koncentrisanog sunčevog zračenja; vanzemaljski ciklus snage; kombinovani integrisani sistem; vanzemaljski uslovi

U ovom radu je analizirano alkalno metalno termoelektrično pretvaranje – konverzija (AMTEK) koncentrisanog sunčevog zračenja (KSZ) i njegova primena u terestričnim uslovima, uključujući hibridizaciju sa fosilnim gorivima i kogeneraciju, odnosno efektivnu i efikasnu upotrebu obe forme snage i energije – proizvedene električne i oddate toplotne snage, odnosno energije. Rad obuhvata i istraživanje vizije primene AMTEK-a u vanzemaljskim uslovima kao sistema vanzemaljskog ciklusa snage (ETCS), odnosno kombinovanog integrisanog sistema AMTEK/KSZ/ETCS. Analizirani su termodinamički modeli i merodavni termodinamički parametri sistema AMTEK/KSZ. Parametarska analiza je sprovedena uzimajući u obzir radijaciono-refleksione gubitke i gubitke prelazom i provođenjem toplote. Najzad, u radu je dat pregled idejnih nacrtu, studija istraživanja tehnologija i puteva razvoja vanzemaljskih AMTEK/KSZ/ETCS sistema, kao i najnovijih naučno-tehnoloških prodora i razmatranja genijalnih radova i vizija Nikole Tesle, s posebno otvorenim pitanjem mogućih izgleda za realizaciju i onih još neostvarenih.

Key words:
alkali metal thermoelectric conversion; space power cycle; combined integrated system; extraterrestrial conditions

In this paper Alkali Metal Thermoelectric Conversion (AMTEC) of concentrated solar radiation (CSR) is analyzed and its implementation in terrestrial conditions, including hybridization with fossil fuels and effective and efficient use of both: produced electrical and released thermal energy. Investigated is also a vision of its implementation in extraterrestrial conditions as Space Power Cycle (SPC) – combined integrated system (AMTEC/CSR/SPC). Thermodynamic models and performance relevant parameters of combined AMTEC/CSR system have been analyzed. Parametric system analysis has been performed taking in account radiation-reflective losses and thermal energy losses by convective and conductive heat transfer. Finally, a Solar Space – AMTEC/CSR/SPC power system concepts, studies, technologies research and development roadmaps, as well as the most current breakthroughs are reviewed and discussed with the reference to Nikola Tesla's ingenious works and visions addressing an open question of potential realization of those not yet achieved.

1. Uvod

Poznata rečenica Viktora Igoa „Ništa nije moćnije od ideje koje je vreme došlo“ može da izazove pitanje: „Solarna svemirsko/zemaljska proizvodnja energije i bežični prenos na Zemlju – koliko je daleko realizacija i da li je energetska održivost Zemlje zaista moguće dostići? Rad pod naslovom „Elementi koncepta održivosti u radovima Nikole Tesle“ [10] ispituje praktične rezultate i teorijska pitanja kojima se Tesla bavio i koji bi se mogli pripisati konceptu održivosti pre više od 100 godina.

Teslini patenti i najznačajniji članci u vezi sa energijom analizirani su u potrazi za idejama o održivosti: tehnologija – transformacija i prenos energije, obnovljivi izvori, tehnologije uglja, prerada metala, električna vozila, turbine, životna sredina – integrisana „celina“ planetarnih i ljudskih sistema, šume i čista voda, proizvodnja ozona, društvo – potrebe, po-našanje i zdravlje ljudi [10].

Uloga Teslinog naučnog doprinosa postaje sve važnija sa vremenim stanovišta energije, u kontekstu potrebe za održivim razvojem, kao i u kontekstu održive nauke [10]. Za Teslu Sunce predstavlja glavni izvor koji pokreće sve, te sledi da treba da unapredimo načine dobijanja više energije od Sunca. Tesla razlikuje oblik sunčeve energije koji se dobija od sagorljivih materijala, poput uglja, drveta, nafte, od oblika sunčeve energije koja je sadržana u vodi, vetru i okolini.

Danas u svetu značajan deo prirodne obnovljive energije potiče iz hidroenergetskih izvora, a znatno manja količina iz geotermalnih izvora; međutim, oni i dalje predstavljaju samo mali udeo u ukupnoj energiji. Pored toga, tokom nekoliko prethodnih decenija u novijim sistemima korišćenja obnovljivih izvora energije primenjuje se veliki broj tehnologija sunčeve energije, uključujući fotonaponske sisteme, gorivne ćelije i vetroturbine. Očekivanja su da potpuna komercijalizacija i širenje upotrebe ovih obnovljivih „zelenih“ energetske tehnologije može da pruži značajne doprinose u rešavanju dugoročnih energetske izazova sa kojima se suočava globalna ekonomija. Međutim, ove tehnologije ne mogu da obezbede ogromne količine nove i održive energije koja će biti potrebna u narednim decenijama 21. veka. Slične tehnologije primenjene u svemiru izložene vanzemaljskom sunčevom zračenju možda bi kvantitativno i kvalitativno (sa više eksergije) mogle da obezbede više održive energije za planetu Zemlju.

Zbog toga je od suštinskog značaja za svet da istražuje, razvija, pokaže, komercijalizuje i raširi primenu dostupnije i održivije tehnologije za korišćenje sunčeve energije – proizvodnju svemirske sunčeve energije. Bez obzira na optimističke tvrdnje, postoji i opovrgavanje, te izgleda da u ovom trenutku ne postoji rešenje za ove savremene izazove. Rešenje bi moglo da bude proizvodnja sistema AMTEK za svemirsko pretvaranje ekstraterestrične sunčeve energije u korisnu snagu i bežični prenos na Zemlju. Na taj način smo došli do ključne izjave koju je Nikola Tesla dao 1900. godine u članku „Problem povećavanja ljudske energije“: „Pored napretka u otkrivanju različitih načina za transformaciju sunčeve energije, sledeći napredak u istoriji bio je otkrivanje načina da se energija prenese sa jednog mesta na drugo bez prenošenja materijala koji je izvor energije“ (Nikola Tesla, „Problem povećavanja ljudske energije“, Century Magazine, jun, 1900). Tesla je predlagao da prenos snage, odnosno energije preko velikih razdaljina kakav poznamo, zasnovan na njegovom pronalasku, treba zameniti bežičnim prenosom, čije je principe i metode on takođe razradio pre više od 100 godina.

Krajem 1960-ih, dr Piter Glejzer iz firme „Arthur D. Little“ izumeo je u tehničkom smislu fundamentalno novi solarni pristup globalnoj energiji [11]: Solarni satelit snage – SSS (Solar Power Satellite – SPS). Osnovni koncept SSS-a se sastoji u sledećem: velika platforma pozicionirana u svemiru u visokoj Zemljinoj orbiti neprestano prikuplja i pretvara sun-

čevu energiju u električnu. Ova energija se zatim koristi za pokretanje sistema bežičnog prenosa snage (BPS) i prenosi energiju do prijemnika na Zemlji. Zbog toga što na njega ne utiču doba dana, vremenske prilike ili godišnja doba, koncept SSS-a ima potencijal da dostigne mnogo veću energetske efikasnost od solarnih sistema na zemlji u pogledu iskorišćenja nepromenljivog kapaciteta [12].

2. Prestižna tehnologija koncentrisanog sunčevog zračenja

Solarne tehnologije sazrevaju sve više i nastaju nove mogućnosti usled stalnih unapređenja u projektovanju. Tehnologije koncentrisanog sunčevog zračenja (KSZ) koje kombinujući jeftinije optičke komponente sa nešto skupljim ali malih površina i izuzetno efikasnim uređajima, kao finalni rezultat daju efikasnije uređaje uz postizanje nižih ukupnih troškova.

Grupa (klaster) koncentratore sa rastegnutom membranom i inovativnim prijemnikom sa kavitatom (fokalno pozicionirani visokotemperaturni prijemnik u obliku srca), predstavlja atraktivno rešenje za toplotno pretvaranje i fototermalne aplikacije – nagrađena konstrukcija na takmičenju za projekat „Solar Two Challenge“ (DOE/Southern California Edison 1994 KU Lawrence – Tim Univerziteta Kanzasa u Lawrence-u, [4], slika 1). Koncentrisano sunčevo zračenje, propušteno prekrivkom prijemnika i tečnošću koja se nalazi iza zida prekrivke dospeva na površinu apsorbera prijemnika, neselektivne crne boje uronjenog direktno u tečnost – radni fluid prijemnika. Apsorber apsorbuje propušteno sunčevo zračenje i njegova unutrašnja energija i temperatura rastu a toplota se predaje radnom fluidu koji posle ulaza u prijemnik, i primarnog opstrujavanja prostora između prekrivke i apsorbera, struji kroz integrisanu mrežu kanala apsorbera, zagreva se i dostiže maksimalnu temperaturu na izlazu iz prijemnika. Izuzetno spekularno refleksiona unutrašnja površina zidova prijemnika smanjuje kompleks gubitaka toplotne zračenjem, provođenjem – kondukcijom i konvekcijom rezultujući u efikasnijoj alternativi prijemnika koncentrisanog zračenja od prijemnika visoko izolovanih zatvorenih kućišta.



Slika 1. Grupa koncentratore – heliostata sa rastegnutom membranom i fokalno pozicioniran visokotemperaturni prijemnik

Trenutna termička efikasnost prijemnika jednaka je odnosu toplotne dovedene do radnog fluida prijemnika i korišćenje za isparavanje radnog fluida (na primer natrijuma) i njegovo izotermalno širenje q_{krf} naspram fluksa upadnog koncentrisanog sunčevog zračenja q :

$$\eta = \frac{q_{krf}}{q} = 1 - \sum_{k=1}^m \frac{q_g}{q} \quad (1)$$

gde q_g predstavlja ukupne toplotne gubitke prijemnika – refleksione, zračne – radijacione, konvektivne i konduktivne. Fluks energije koncentrisanog sunčevog zračenja koji upada na osnovu prijemnika predstavlja funkciju površine polja koncentratora A_g pokrivenu heliostatima $A_h = \varphi A_g = \varphi CR A_p$, i dat je sledećim zrazom:

$$q = I_b \varphi CR_e A_p \rho r \quad [W] \quad (2)$$

gde su I_b , CR_e , ρ i r jačina upadnog direktnog sunčevog zračenja, faktor efektivne koncentracije, efikasnost heliostatske površine i njeno reflektivnost ogledala.

Gubici fluksa energije u stacionarnom stanju mogu se izraziti kao zbir gubitaka reflektivnog zračenja i gubitaka prenosom toplote:

$$q_g = q_r + q_{tg} \quad (3)$$

Gubici zračenjem su dati kao:

$$q_z = \varepsilon \sigma A_p (T_z^4 - T_a^4) \quad [W] \quad (4)$$

Konvektivni gubici q_{kon} i gubici provođenjem – konduktivni gubici q_{pr} su:

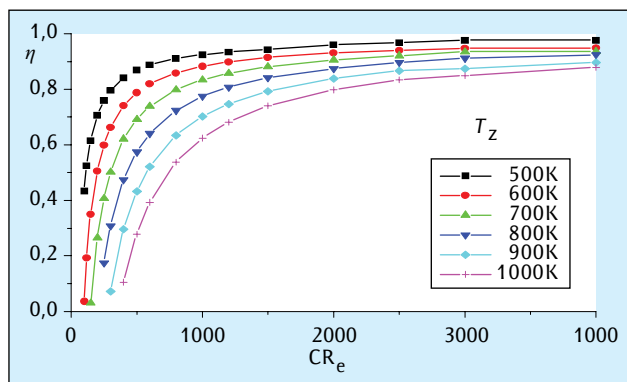
$$q_{kon} + q_{pr} = A_z \left(h + \frac{k_z}{\delta_z} \right) (T_z - T_a) \quad (5)$$

gde su temperatura zida prijemnika, temperatura sredine, površina zidova prijemnika, debljina zida, toplotna provodljivost i koeficijent prelaza toplote konvekcijom označeni sa T_a , T_z , A_z , δ_z , k_z , i h . Tako su ukupni gubici prenosa toplote:

$$\begin{aligned} q_g &= q_z + q_{kon} + q_{pr} = \\ &= \varepsilon \sigma A_p (T_z^4 - T_a^4) + A_z \left(h + \frac{k_z}{\delta_z} \right) (T_z - T_a) \end{aligned} \quad (6)$$

Na dijagramima na slici 2 prikazan je uticaj faktora koncentracije sunčevog zračenja i temperature na simultane gubitke prenosom kratkotalasnog i dugotalasnog zračenja, konvektivnog i konduktivnog prenosa toplote u prijemniku.

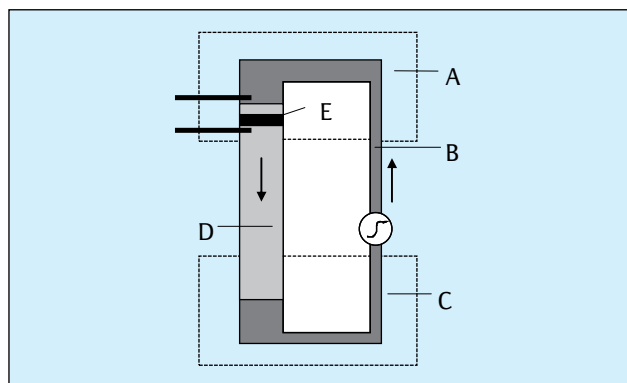
Direktnije, ovu vrstu zavisnosti efikasnosti od faktora koncentracije sunčevog zračenja ilustruje dijagram na slici 3.



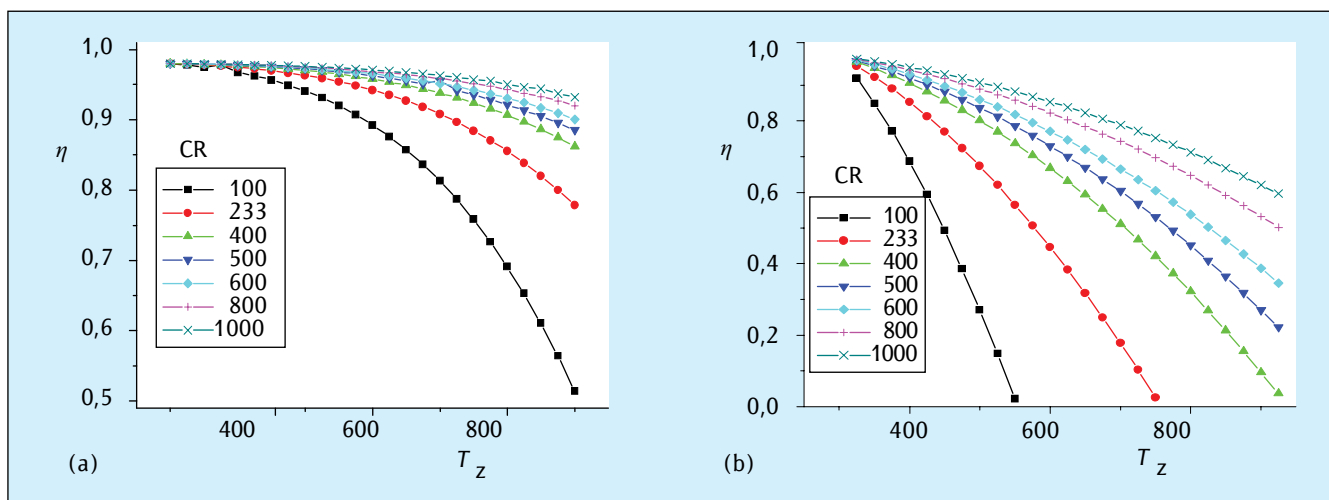
Slika 3. Zavisnost trenutne toplotne efikasnosti od faktora efektivne koncentracije i temperature površine zidova prijemnika

3. Alkalno metalno termoelektrično pretvaranje

Alkalno metalno termoelektrično pretvaranje ili konverzija (AMTEK) [1, 6] vrlo perspektivno [2, 5] rešenje za energetski efikasnu proizvodnju električne energije, nedavno je postalo predmet našeg interesovanja [4, 5]. Ključni element uređaja AMTEK je β -alumina čvrsti elektrolit (beta alumina čvrsti elektrolit – BAČE) koji provodi pozitivne jone natrijuma mnogo bolje nego atomi ili elektroni natrijuma (slika 4).



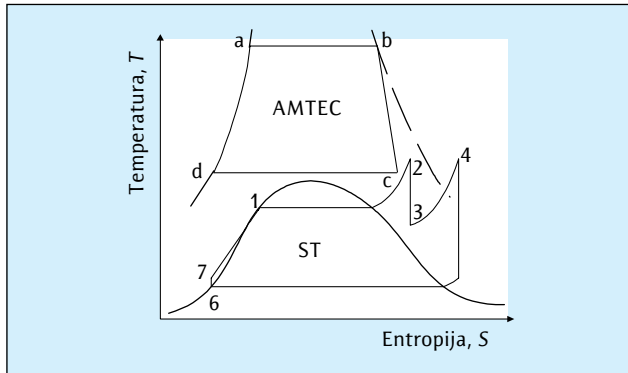
Slika 4. Šema sistema za alkalno metalno termoelektrično pretvaranje – konverziju; A – izvor toplote T_z , B – tečni natrijum, C – toplotni ponor, D – para natrijuma, E – beta-alumina čvrsti elektrolit



Slika 2. Zavisnost gubitaka toplote prijemnika (a – gubici zračenjem, b – ukupni toplotni gubici) od faktora koncentracije sunčevog zračenja i temperature prijemnika

Razlika pritiska natrijuma duž tankog lista BAČE-a vodi jone natrijuma od strane visokog pritiska ka strani niskog pritiska. Tako se pozitivni joni natrijuma akumuliraju na strani niskog pritiska a elektroni se sakupljaju na strani visokog pritiska, što uspostavlja električni potencijal. Korišćenjem odgovarajuće elektrode ovaj električni potencijal se može iskoristiti i električna struja se može voditi kroz opterećenje.

Tečni natrijum u gornjem delu održava se na temperaturi T_2 (900–1300 K) toplotom koja se dovodi iz spoljnog izvora topline (koncentrisano sunčevo zračenje). Donji deo koji sadrži paru natrijuma u fazi kondenzacije i tečni natrijum, u kontaktu je sa toplotnim ponorom temperature T_1 (400–800 K). Na slici 5 je dat termodinamički ciklus ekvivalentan reverzibilnom procesu AMTEK-a.



Slika 5. Termodinamički ciklus ekvivalentan reverzibilnom procesu AMTEK i binarni ciklus AMTEK-a i vanzemaljskog ciklusa snage (AMTEK/ETCS)

Na taj način BAČE predstavlja sredstvo da se mehanička energija, proporcionalna uspostavljenoj razlici pritiska pretvara u električnu energiju – ekvivalentnu hemijskom potencijalu pretvaranja u razliku električnog potencijala. Preciznija studija pokazuje da AMTEK proces predstavlja složeniju interakciju različitih nepovratnih procesa prenosa, kinetički upravljanim interfejsom elektroda specifičnim osobinama materijala BAČE-a. Proces BAČE je moguće opisati kao izotermno širenje natrijuma od pritiska p_2 do pritiska p_1 na temperaturi T_2 .

Mehanički AMTEK je jednostavan sistem bez pokretnih delova, osim pumpe za tečni natrijum. Ako pretpostavimo da se para natrijuma može predstaviti kao idealan gas i ako primenimo Klauzijus-Klapejronovu jednačinu, trenutna ter-

modinamička efikasnost povratnog – reverzibilnog procesa AMTEK-a može se izraziti na sledeći način:

$$\zeta = \frac{W_A}{q_{krf}} = \frac{W_1 - W_2}{L_2 + q_2 + q_3} = \frac{\frac{T_2 - T_1}{T_2}}{\frac{T_2 - T_1}{T_2} \left(1 + \frac{C_p T_1}{L}\right) + \frac{T_1}{T_2}} \quad (7)$$

gde je W_1 maksimalan rad dobijen izoeternim širenjem gasa od pritiska p_2 do p_1 pri temperaturi T_2 , L_2 je toplota isparavanje pri T_2 , q_2 je toplota apsorbovana tokom izotermnog širenja – ekspanzije, a q_3 označava razliku entalpija tečnosti između T_2 i T_1 .

4. Tehnologija koncentrisanog sunčevog zračenja (KSZ) – AMTEK i binarni ciklus KSZ-AMTEK

Termodinamička efikasnost kombinovanog sistema KSZ-AMTEK može se izraziti proizvodom odgovarajuće termičke efikasnosti prijemnika KSZ i efikasnosti povratnog AMTEK procesa ($\eta_u = \eta \zeta$) sledećom jednačinom:

$$\eta_u = \eta \zeta = \left(1 - \frac{q_r + q_2 + q_{kon} + q_{pr}}{I_b \phi CR A_p r}\right) \cdot \frac{\frac{T_2 - T_1}{T_2}}{\frac{T_2 - T_1}{T_2} \left(1 + \frac{C_p T_1}{L}\right) + \frac{T_1}{T_2}} \quad (8)$$

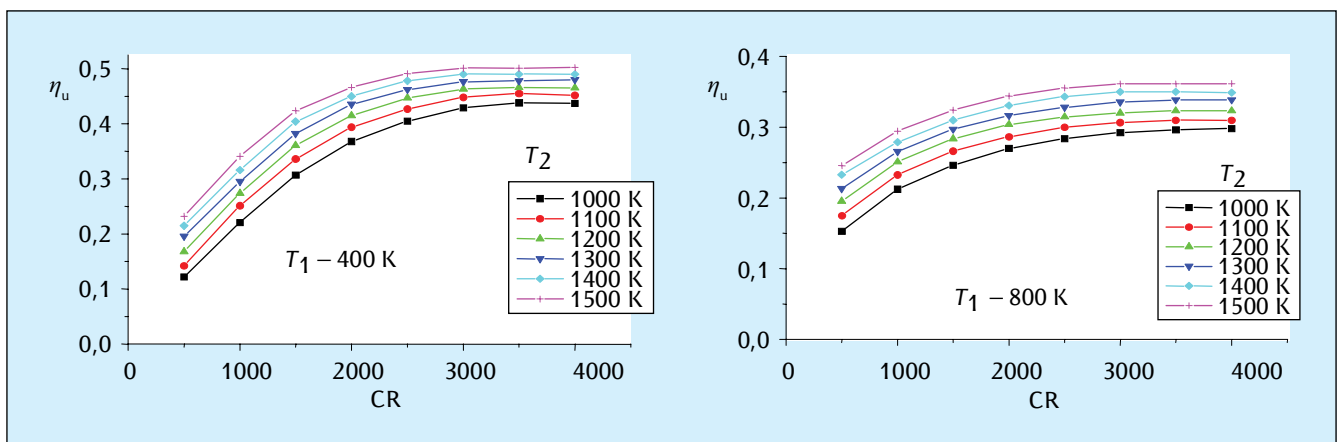
Trenutna termička efikasnost binarnog ciklusa KSZ-AMTEK/ETCS, definisanog kombinacijom ciklusa KSZ-AMTEK i termodinamičkog desnokretnog kružnog procesa s ekspanzijom pare, može se odrediti na sledeći način:

$$\eta_{BCu} = \eta \eta_{BC} \quad (9)$$

$$\eta_{RCC} = \frac{W_{RCC}}{q_{RCC}}; \quad q_{RCC} = q_{AO}$$

$$\eta_{BC} = \frac{W_A + W_{RCC}}{q_{krf}} = \frac{\xi q_{krf} + \eta_{RCC} q_{AO}}{q_{krf}} = \xi + \eta_{RCC} \frac{q_{AO}}{q_{krf}} \quad (10)$$

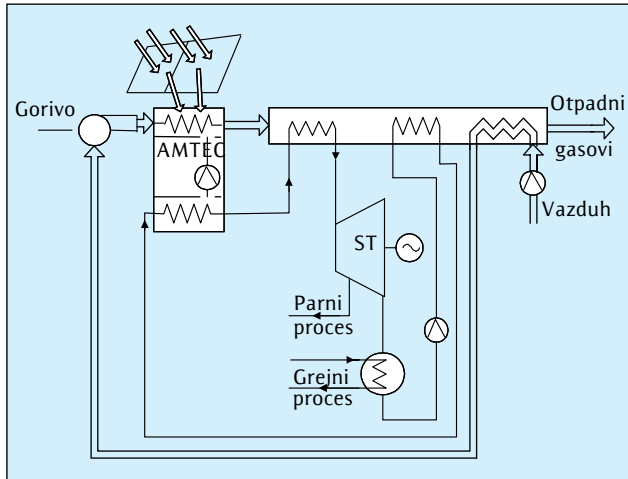
gde su efikasnost i tehnički rad kružnog parnog ciklusa, tehnički rad ciklusa AMTEK i toplota koju odaje AMTEK označeni sa η_{RCC} , W_{RCC} , q_{AO} .



Slika 6. Zavisnost termičke efikasnosti kombinovanog ciklusa KSZ-AMTEK od faktora efektivne koncentracije sunčevog zračenja, temperature pare i temperature kondenzatora

Rezultati sprovedene termodinamičke analize su vrlo impresivni. Dobijene vrednosti merodavnih termičkih efikasnosti procesa KSZ-AMTEK i KSZ-AMTEK/ETCS (slika 7) prikazane na slikama 6 i 8 znatno su veće od odgovarajućih vrednosti bilo koje postojeće konvencionalne elektrane (izračunate za kružni ciklus sa ponovnim zagrevanjem – temperaturom pregrejane pare od 450 °C, temperaturom kondenzacije od 150 °C, i efikasnošću ETCS od 36%).

Ova činjenica jasno opravdava potrebu da se uvećaju napori u istraživanju i razvoju u merodavnim fundamentalnim, primenjenim i tehničkim oblastima.



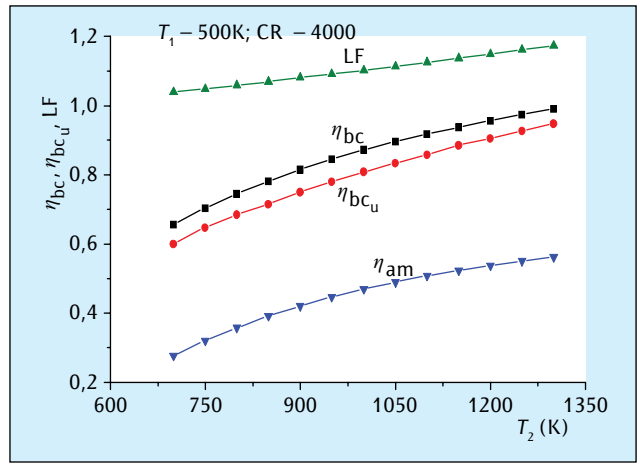
Slika 7. Šema hibridnog binarnog sistema KSZ-AMTEK/ETCS za kogeneraciju električne i toplotne energije

5. Hibridizacija i razvoj svemirsko/zemaljske solarne tehnologije AMTEK

Za širenje upotrebe sunčeve energije danas je obavezno posedovati sisteme koji su u stanju da u svakom trenutku u potpunosti mogu isporučiti snage odgovarajuće potrebama opterećenja. Najbolji način da se to danas učini jeste putem hibridizacije sa prirodnim gasom ili naftom. Konkretno, za različite hibridne solarne sisteme predviđene su i kratkoročne i srednjoročne primene. Ovakvi sistemi, naročito oni zasnovani na tehnologijama alkalno metalnog termoelektričnog pretvaranja više su konkurentni i više odgovaraju mnogim raznovrsnim primenama i rastućim međunarodnim tržištima od monotipskih tehnologija. Šema hibridnog kombinovanog sistema KSZ – AMTEK/ETCS prikazana na slici 7, idealna je za kogeneraciju električne i toplotne energije. Na primer, efikasnosti binarnog ciklusa date na slici 8 dobijene su za temperaturu kondenzatora parnog ciklusa od 150 °C – nivoa temperature koji se može koristiti čak i kao procesna toplota ili u sistemima daljinskog grejanja.

Pregled trenutnih lokalnih uslova potvrđuje da je tehnička ekspertiza odgovarajuća i da su donekle dostupne neophodne tehnologije (uključujući tehnologiju koncentrisanog sunčevog zračenja i FN – fotonaponsku tehnologiju), ali finansijska situacija i ekonomsko stanje predstavljaju ozbiljne prepreke i ne idu naruku unaprednju novih programa, niti u domenu proizvodnje i energetskog inženjeringa niti u domenu ulaganja uopšte.

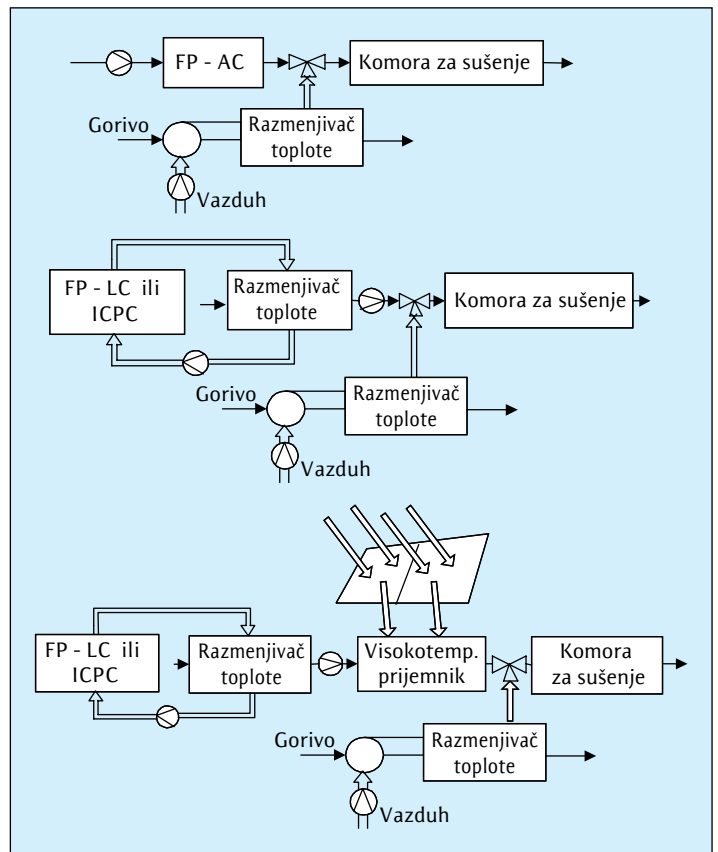
Međutim, decentralizovana proizvodnja energije rukovodena potražnjom i integracija OIE u lokalnu energetsku strukturu treba da bude shvaćena kao mogućnost doprinosu poboljšanju osnovnog snabdevanja energijom i uslovima života zajedno sa stvaranjem male industrije koja će obezbediti radna mesta i sprečiti migracije u urbane cen-



Slika 8. Zavisnost termodinamičke efikasnosti KSZ-AMTEK i KSZ-AMTEP/ETCS od temperature T₂

tre. Pored mogućeg uticaja na razvoj decentralizovane proizvodnje energije, primene kombinovanih hibridnih solarnih sistema KSZ-AMTEK mogu da obuhvataju vrlo perspektivne generalno autonomne sisteme za industriju (na primer – električna energija za samonapajajuće konvektivne solarne sušare, slika 9).

Koncept energetskog sistema koji koristi vanzemaljsko sunčevu zračenje AMTEK integrisan sa naprednim satelitima sa sistemom za globalno pozicioniranje razvili su Johnson i dr. [23]. Njegove glavne komponente su dva simetrična generatora koja sadrže parabolične koncentratore/reflektore i solarne prijemnike projektovane da proizvedu dovoljno elek-



Slika 9. Šeme samonapajajućih i samoregulišućih konvektivnih solarnih sušara – dodavanjem jedinica KSZ-AMTEK

trične energije od apsorbovanog sunčevog zračenja, i napredna ćelija AMTEK sa višecvnom parnom anodom koja ima efikasnost pretvaranja od 24%.

Rezultat analize integracije i karakteristika ovog sistema pokazao je da solarni energetski sistem AMTEK može da predstavlja vrlo dobru opciju za proizvodnju svemirske energije i da je veličina solarnog sistema AMTEK znatno manja od solarnog FN sistema, i njegova masa bi takođe mogla da bude konkurentna masi energetskog sistema sa FN baterijom [23]. Pored toga, solarni sistem AMTEK bi mogao da bude robusniji i stabilniji, te bi stoga mogao da bude atraktivan za proizvodnju svemirske energije i za slanje na Zemlju, ali studija [23] se bavila proizvodnjom svemirske energije samo za potrebe svemirskih vozila, a ne i prenosom proizvedene energije do Zemlje.

Teoretsku optimizaciju projektnih parametara radialne ćelije AMTEK analizirali su Hendricks i Huang [24], sa ciljem da utvrde optimalne projektne parametre i postignu bolje karakteristike ćelije za velike energetske zahteve svemirskih misija. Analiza projektnih parametara je pokazala da bi se efikasnost mogla povećati dramatično, sa strogo kontrolisanim parazitnim gubicima i uvođenjem BAČE cevi veće površine, zaključujući da bi se projektom optimizacije energetske efikasnosti mogla postići znatno veća energija sistema nego projektom maksimiranja snage po jedinici površine BAČE-a, uz istovremeno smanjenje troškova i složenosti ćelija.

Pored nezavisnih metoda za proizvodnju toplotne energije od direktnog sunčevog zračenja, takođe su u velikoj meri proučavani kaskadni sistemi koji kombinuju nekoliko metoda za proizvodnju energije za dobijanje više proizvedene energije [19]. Kaskadni sistemi mogu da imaju znatno veću efikasnost i stoga znatno veću proizvodnju električne energije. Međutim, različite faze se moraju dobro poklapati, naročito njihovi nivoi temperature, što je važno uzeti u obzir u okviru prilaza optimizaciji sistema.

Na primer, budući da termionski pretvarač ima vrlo visoku temperaturu odavanja toplote koja je vrlo blizu temperature izvora toplote za AMTEK, moguće je postići veću proizvodnju energije tako što će se ove dve vrste pretvarača postaviti kaskadno. U radu [19] pokazano je da bi efikasnost Cs-Ba termionskog sistema AMTEK mogla da bude 7–8% veća od efikasnosti Cs–Ba termionskog-termoelektričnog kaskadnog sistema. Zbog toga visokotemperaturni Cs–Ba termionski-AMTEK kaskadni sistem može da bude vrlo atraktivan za proizvodnju snage toplotnim pretvaranjem sunčeve energije i omogućio bi razvoj izuzetno efikasnog, kompaktnog energetskog sistema.

Za dalji razvoj solarnog programa AMTEK i njegovu efektivnu tehničku izvodljivost, potrebno je tragati za pouzdanim i isplativim rešenjima koja bi obuhvatala što je moguće preciznija ispitivanja raznolikosti potražnje i kapaciteta skladištenja fokusiranjem modularnih jedinica male do srednje veličine kapaciteta snage, od 1 MW do 20 MW.

U zaključku u vezi sa solarnom tehnologijom AMTEK, treba istaći sledeće potrebe istraživanja i razvoja:

- termodinamička studija inovativnih kombinovanih i kaskadnih ciklusa/sistema;
- fundamentalno istraživanje prenosa toplote na različitim sistemima AMTEK-a, merodavnim materijalima i strukturama;
- istraživanje inženjeringa, razvoj i standardizacija srodnih tehničkih sistema i komponenata;
- studije slučajeva: profili opterećenja, skladištenje, dinamika u vezi sa kogeneracijom i hibridizacijom;
- optimizacija po različitim scenarijima politike cena, uključujući optimizaciju isporuke i odgovarajući uopšteni postupak.

Pored toga, u zaključku o potrebama istraživanja i razvoja AMTEK-a treba navesti da je detaljnom analizom svih poznatih tehnologija proizvodnje toplotne energije od direktnog sunčevog zračenja, koju su obavili Yue-Guang Deng i Jing [19], solarna tehnologija AMTEK označena kao najnaprednija u poređenju sa termoelektričnom, magnetohidrodinamičkom i termionskom. Da bi se materijalizovao njen ogroman potencijal i u potpunosti iskoristile njene prednosti, potrebno je, prema ovim autorima [19], uzeti u obzir aspekte koji su u suštini preciznije definicije specifičnih istraživačkih zadataka navedenih stavki (b) i (c) na sledeći način:

- „optimizacijom projekta strukture i u najvećoj mogućoj meri smanjenjem gubitaka toplote zračenjem toplote i kondukcijom;
- traganjem za odličnim materijalima za elektrode i boljim tehnikama proizvodnje elektrode od poroznog materijala, kako bi se poboljšala gustina proizvedene struje i smanjio efekat polarizacije elektroda;
- zamenjivanjem natrijuma kalijumom kao radnim fluidom pod određenim uslovima, mada su pravilan projekat sistema i odgovarajući radni uslovi vrlo važni zbog određenih problema, kao što je isušivanje u fitilju isparivača, koje može lakše da se desi kod AMTEK-a baziranog na kalijumu; i
- povećavanjem temperature visokotemperaturne strane AMTEK-a, mada temperatura ne bi trebalo da bude više visoka jer se može javiti propadanje materijala elektrode na visokoj temperaturi.“

6. Vanzemaljsko pretvaranje sunčeve energije i prenos na Zemlju

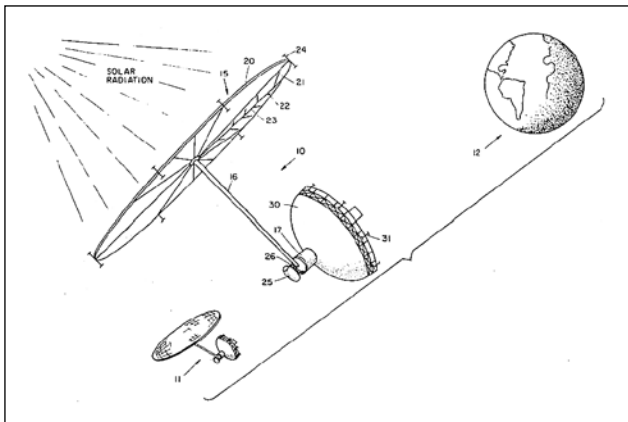
Najnoviji dokumenti o statusu proizvodnje i prenosa vanzemaljske solarne snage predstavljani su avgusta meseca 2011. godine pod naslovom „Prva međunarodna procena mogućnosti svemirske solarne snage, problema i potencijalnih pravaca napretka“ od strane Međunarodne akademije za astronautiku [11].

Satelit solarne snage – SSS (solar power satelite – SPS) opisao je američki naučnik Piter Glejzer u svom inventivnom američkom patentu iz 1973. godine. Njegov metod se zasnivao na prenošenju energije na velika rastojanja (od svemira do površine Zemlje) putem mikrotalasa od vrlo velike antene (od jednog kvadratnog kilometra) na satelitu do mnogo veće antene, sada poznate pod nazivom rektena, na Zemlji (ilustracija je na slici 10). Zbog toga što ne zavisi od doba dana, vremenskih uslova ili promene godišnjih doba, koncept SSS-e ima potencijal da postigne mnogo veću energetsku efikasnost od sistema solarne energije na zemlji (s obzirom na neprekidnost iskorišćenja projektovanog kapaciteta).

Koncept satelita solarne snage (SSS) bio je predmet brojnih studija nacionalnih sistema i napora za razvoj tehnologije od 1970. do 2010. godine (uključujući SAD, Kanadu i Evropu, kao i stalno istraživanje i razvoj tehnologije u Japanu i aktivnosti skorijeg datuma u Kini i Indiji) [12]. Zbog značajnog napretka u svemirskoj solarnoj snazi koji bi bio od velike koristi za humana i robotizovana istraživanja svemira, kao i za druge primene u svemiru, ova studija [12] je takođe ukazala na takve mogućnosti i vrednovala potencijal za sinergije između ovih dobrobiti za svemirske misije i svemirsku solarnu snagu za tržišta na zemlji.

Tri izuzetno perspektivna koncepta platforme SSS-a ispitivana su u studiji IAA [12]. Sva tri ispitivana slučaja su bili koncepti geostacionarnih SSS-a sa bazom u orbiti Zemlje, i to:

- ažurirana verzija mikrotalasnog bežičnog prenosa snage
- modernizovana verzija mikrotalasnog bežičnog prenosa snage 1979 SSS koncept referentnog sistema, koji obuhva-



Slika 10. Ilustracija koncepta solarnog satelita snage (SSS), 1973 US Patent No. 5019768

ta velike diskretne strukture (npr. solarni niz, transmitter itd.) koje montira posebno svemirsko postrojenje;

- koncept modularnog elektrodiodnog niza laser WPT SSS-a, koji obuhvata samosklapajući ŠPS laser-termičkog modula srednje veličine; i
- koncept izuzetno modularnog mikrotalasnog bežičnog prenosa snage SSS „sendvič strukture“, koji uključuje veliki broj vrlo malih solarnih-mikrotalasnih termičkih modula koje bi roboti sklapali u orbiti.

Nekoliko alternativnih konceptata za svemirsku solarnu snagu takođe je identifikovano, ali nije analizirano [12] (koncept Space Solar Power – SSP – u niskoj Zemljinoj orbiti „Sunčana kula“, lunarna solarna snaga itd.).

Radovi [16–22] predstavljaju pregled razvoja unapređenja uređaja za svemirsko-zemaljsku generaciju snage AMTEK-a.

Pretvarač AMTEK je bio u razvoju u programu ARPS – AMTEK Radioisotope Power System (ARPS) (saradnja između DOE i NASA) [22]. Cilj programa bio je da se razvije nova generacija sistema za pretvaranje toplotne u električnu energiju koja bi se koristila u sondama u dalekom svemiru. Povoljna karakteristika AMTEK-a za rad u svemiru jeste ta što on nema pokretne delove. Radioizotopima pogonjen AMTEK proizvodi električnu energiju interakcijom njegove dve glavne komponente: radioaktivnog izvora toplote (gorivo i osigurač) i termoelektričnog generatora. Radioaktivni materijal koji se koristi za gorivo spontano se dezintegriše u različite oblike atoma šireći se uz rasipanje toplote koju AMTEK pretvara u električnu energiju. Glavni ugovarač bila je firma Lockheed Martin Corporation, sa firmom Advanced Modular Power Systems, Inc. (AMPS), odgovornom za razvoj AMTEK pretvarača [22].

Pregled najnovijeg razvoja tehnologija za proizvodnju svemirske solarne energije dat je u japanskom radu [13], a raniji pregledi svih relevantnih poznatih tehnologija dati su u radovima [17, 19–21]. Posebno značajni radovi koji se tiču bežičnog prenosa snage/energije proizvedene u svemiru do Zemlje jesu oni koji se bave širokim opsegom spektra metoda i tehnologija za prenos energotalasa, kao što su [6, 14–16, 18].

Prepoznajući tzv. „spin-off“ uticaj novih tehnologija, naročito onih koje potiču iz svemirskog programa kao što je solarne energija, Kina je nedavno otkrila plan da gradi i u orbitu lansira stanicu – solarnu energanu za komercijalnu upotrebu do 2040. [19]. Kineski plan, koji je izradio jedan on njihovih svemirskih pionira Wang Xiji, ambiciozan je i kao cilj posmatra različite aspekte primene svemirske solarne energije, projekata i ključnih tehnologija koji bi ovu opciju mogli da učine ekonomski izvodljivom i u prvom trenutku i održivom do 2020. godine.

Podrobno govoreći o istraživanju koje je vršila Kineska akademija nauka, Wang je na četvrtom Forumu kineskog samita o energiji i ekologiji izjavio: „Razvoj stanice – solarne energane u svemiru fundamentalno će promeniti način na koji ljudi eksploatišu i dobijaju energiju. Ko god preuzme vođstvo u razvoju i korišćenju čiste i obnovljive energije i u svemirskoj i vazduhoplovnoj industriji, biće svetski lider.“

Dok bi vodeća uloga Kine u SBSP-u (Space Based Solar Power) mogla da obezbedi okvir saradnje u Aziji, postoji jak imperativ i za Indiju i druge ekonomije koje se razvijaju i koje su ugrožene nestašicama energije da se udruže i realizuju san o korišćenju SBSP-a.

Ostale zemlje, poput Japana, takođe vrše značajna istraživanja u ovoj oblasti. Japanska Agencija za istraživanje vazdušno-svemirskog prostora čitavu deceniju obavlja istraživanje o SBSP-u u saradnji sa preduzećima za vrhunsku tehnologiju, poput firme Mitsubishi. Saradnja između ovih zemalja bi takođe olakšala finansiranje ovako ambicioznog projekta.

Stvarni početak realizacije SBSP-a povezan je sa daljim razvojem postojeće svemirske i bežične industrije, razvojem srodnih novih grana koje će nastati iz sadašnjeg istraživanja o SBSP i koje mora da bude potpora stalnom opstanku SBSP-a i odgovarajućih stanovišta energetske i ekološke sigurnosti.

7. Status bežičnog prenosa energije

Približavajući se zaključnim napomenama u ovoj studiji, pogledali smo zaključke studije [12] koji su relevantni za tehnologiju bežičnog prenosa energije (BPE).

Izveštaj [12] je najnoviji opsežan dokument u kome je prikazan status tehnologije bežičnog prenosa energije. Pripremljena metodologija primene spremnosti i analize rizika je upotrebila kao merodavne indikatore zrelosti tehnologija i rizika sledeće veličine: nivo spremnosti tehnologije i skalu stepena težine istraživanja i razvoja.

Ključne tehnologije koje bi mogle biti takođe primenjene u proizvodnji solarne snage uz korišćenje platformi solarnih satelita snage (SSS), pored različitih vrsta fotonaponskih ćelija, obuhvataju Sterlingove motore, motore sa Rankinovim ciklusom itd. Međutim, izložena studija potvrđuje izuzetno povoljne karakteristike solarnog AMTEK-a uz pozivanje na dinamički sistem prikazan u [12].

Glavne oblasti tehnologije u kategoriji upravljanja i distribucije energije obuhvataju sledeće: visokonaponske energetske kablove, modularnu/inteligentnu konverziju energije i napredne opcije upravljanja energijom (npr. superprovodnici).

Nastavljajući sa rezimiranim rezultatima studije [12], možemo se složiti sa komentarom, koji se pominje u „Novosti, pogledi i kontakti iz globalne energetske industrije“ koji glasi: „*Džinovski skok za svemirsku solarnu energiju – solarne energija ulazi u svemirsko doba zahvaljujući raketnoj brzini kojom se razvija tehnologija*“ i dalje: „*Prošlo je samo 30 godina od kako su na Zemlji sagrađena prva komercijalna solarna postrojenja – što je kratak period u poređenju sa dužinom vremena u kojem su fosilna goriva zadovoljavala globalne potrebe za električnom energijom – ipak, brzina tehnološkog razvoja nam je omogućila da realno razmišljamo o lansiranju u svemir u ovom radu razmatranih konstrukcija za vanzemaljsko korišćenje obnovljive sunčeve energije u ne tako dalekoj budućnosti.*“

Da, možemo da „realistički razmišljamo o puštanju ovih konstrukcija za obnovljivu energiju u svemir“, ali i dalje je potrebno ići putem nauke i tehnologije, da bismo dostigli celovit i u potpunosti funkcionalni bežični prenos energije iz vanzemaljskog prostora do Zemlje na način na koji ga je vizionarski sagledao Nikola Tesla. Da bi se skratio taj put, bilo bi od ključnog značaja integrisati sadašnje pristupe u istra-

živanju i razvoju neposrednije sa jezgrom Teslinih suštinski inventivnih ideja.

Istraživanja u oblasti visokofrekventnih naizmeničnih struja i bežičnog prenosa energije Tesla je započeo pre 125 godina, 1889. godine. Upuštajući se u neočekivano ponašanje ovih struja u poređenju sa niskofrekventnim naizmeničnim strujama, potkrepljeno mnogim eksperimentima, Tesla je postepeno sve više bivao uveren da se ove struje mogu koristiti za efikasno osvetljenje, u medicini i u bežičnom prenosu električne energije. Kasnije je, govoreći o prirodi elektriciteta, u predavanju 1891. godine rekao: „*Pristalica sam ideje da postoji pojava koju obično nazivamo elektricitetom. Postavlja se pitanje: Šta je ta pojava? Ili koju od pojava, za čije postojanje znamo, možemo s najviše razloga da nazovemo elektricitetom? Znamo da se ponaša kao nestišljivi fluid; da u prirodi mora postojati njena konstantna količina; da se ne može ni proizvesti niti uništiti...*“

Na kraju, delimičan odgovor na pitanje stavljeno u naslov ovoga rada: „Koliko je daleko realizacija?“ u delu koji se odnosi na bežični prenos energije, mogao bi da bude: „realizacija bi mogla biti bliže ako bismo uložili trud da se prouče desetine hiljada rukopisa Nikole Tesle koji još nisu ni pročitani, a koji se nalaze u arhivu Muzeja Nikole Tesle u Beogradu.“

Literatura

- [1] Cole, *Thermoelectric Energy Conversion with Solid Electrolytes*, Science, Vol. 221, No. 4614, pp. 915–920, 1983.
- [2] Sasakawa, E., M. Kanzaka, A. Yamada, H. Tsukuda, *Performance of the Terrestrial Power Generation Plant Using the Alkali Metal Thermo-Electric Conversion (AMTEC)*, Proceedings of the 25th Intersociety Conversion Engineering Conference, Vol. 3, pp 143–149, 1992.
- [3] Sievers, F., J. Ivanenok, K. T. Hunt, *Alkali Metal Thermal to Electric Conversion*, Mech. Engineering, Vol. 117, No. 10, pp. 70–76, 1995.



Mi gradimo bolje sutra inovativnim rešenjima

Lideri u oblasti prenosa toplote i regulacije sistema grejanja i klimatizacije

ENGINEERING
TOMORROW

Danfoss

- [4] Todorović, M., F. Kosi, *Ekonoergo-tehnologije – novi sistemi pretvaranja energije za termoenergetiku i termotehniku*, KGH, Vol. SMEITS 1996.
- [5] Todorovic, M., S. Mentus, O. Ecim, Lj. Simic, *Thermodynamic Analysis of Alkali Metal Thermoelectric Converters of Solar Radiation*, Proceedings of the Fifth International Conference Tesla – III Millennium, pp. IV-87-94, Belgrade, 1996.
- [6] Weber, A., *Thermoelectric Device Based on Beta-Alumina Solid Electrolyte*, Energy Convers. 14, No. 1, pp. 1–8, 1974.
- [7] McCue, D., *Japan continues to pursue dream of solar power harvested from space*, http://www.renewableenergymagazine.com/energias/renovables/index/pag/pv_solar/colleft/colright/pv_solar/tip/articulo/pagid/16323/botid/71/, July 2011.
- [8] Karalis, A., J. D. Joannopoulos, M. Soljačić, *Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer*, Annals of Physics 323, 2008.
- [9] Mclinko, R. M., B. V. Sagar, *Space-based solar power generation using a distributed network of satellites and methods for efficient space power transmission*, International Conference on Space Information Technology 2009.
- [10] Civric, Z., *Elements of the Concept of Sustainability in the Works of Nikola Tesla*, Proceedings, ECOS Conference, Novi Sad, 2011.
- [11] Glaser, P., *Method and Apparatus for Converting Solar Radiation to Electrical Power* (US Patent No. 3,781,647; U.S. Patent and Trademark Office; Washington, D.C.) 25 December 1973.
- [12] Mankins, J. C., N. Kaya, *Space Solar Power – The first international assessment of space solar power opportunities, issues and potential pathways forward*, Int. Academy of Astronautics., http://iaaweb.org/iaa/Studies/sg311_finalreport_solarpower.pdf, August, 2011.
- [13] Narita, T., T. Kamiya, K. Suzuki, K. Anma, M. Niitsu, N. Fukuda, *The Development of Space Solar Power System Technologies*, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 48 No. 4, December 2011.
- [14] Marincić, A., Z. Civrić, B. Milovanović, *Nikola Tesla's Contributions to Radio Developments*, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 131–148, November 2006.
- [15] Karalis, J., D. Joannopoulos, M. Soljacic, *Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer*, Annals of Physics 323, pp. 34–48, 2008.
- [16] Popović, Z. B., *Wireless Powering for Low-Power Distributed Sensors*, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 149–162, November 2006.
- [17] ***, *Space-Based Solar Power As an Opportunity for Strategic Security*, Phase 0 Architecture Feasibility Study Report to the Director, National Security Space Office Interim Assessment, Release 0.1, 2007, www.nss.org/settlement/ssp/library/nssso.htm
- [18] Barathwaj. G., K. Srinag, *Wireless power Transmission of Space Based Solar Power*, 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, IPCBEE, Vol. 6 (2011) IACSIT Press, Singapore.
- [19] Deng, Y.-G., J. Liu, *Recent advances in direct solar thermal power generation*, Journal of Renewable and Sustainable Energy 1, 052701, 2009.
- [20] Lior, N., *Power from Space*, Energy Conversion and Management, pp. 1769–1805, 2001.
- [21] Lodhi, M. A. K., P. Vijayaraghavan, A. Daloglu, *An overview of advanced space/terrestrial power generation device: AMTEC*, Journal of Power Sources 103, pp. 25–33, 2001.
- [22] Giglio, J. C., K. R. Sievers, E. F. Mussi, *Update of the Design of the AMTEC Converter for Use in AMTEC Radioisotope Power Systems*, AIP Conf. Proc. 552, pp. 1047–1054, 2001.
- [23] Johnson, G., M. E. Hunt, W. R. Determan, P. A. HoSang, J. Ivanenok, M. Schuller, *IEEE Aerosp. Electron. Syst.*, Mag. 12, 33 1997.
- [24] Hendricks, T. J., C. D. Huang, *J. Sol. Energy Eng.* 122, 49, 2000.

kgH