

**ANALIZA KONKURENTNOSTI MALIH MODULARNIH NUKLEARNIH ELEKTRANA****ANALYSIS OF COMPETITIVENESS OF SMALL MODULAR NUCLEAR POWER PLANTS**Milenko Jovanov, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ENERGETIKA I PROCESNA TEHNIKA**

**Kratak sadržaj** – U radu je prikazana mogućnost korišćenja nuklearne energije u okviru malih modularnih nuklearnih reaktora u cilju što je moguće efikasnijeg rešavanja narastajućih energetskeg problema na globalnom nivou. Cilj rada jeste da pokaže da su modularne nuklearne elektrane prihvatljiv izvor nedostajuće električne energije, samostalno ili kao deo elektroenergetskog sistema jedne države.

**Ključne reči:** nuklearna energija, modularni nuklearni reaktori, nuklearno gorivo

**Short content** - The paper shows the possibility of using nuclear energy in the framework of small modular nuclear reactors in order to solve the growing energy problems on a global level as efficiently as possible. The goal of the work is to show that modular nuclear power plants are an acceptable source of missing electricity, independently or as part of a country's power system.

**Keywords:** nuclear energy, modular nuclear reactors, nuclear fuel

**1. UVOD**

Energija kao pokretačka snaga proizvodnih i svih drugih procesa na Zemlji i njena proizvodnja u dovoljnim količinama, predstavljaju narastajući problem čovečanstva na globalnom nivou. Događaji iz prošlosti pokazuju da su izvori zelene energije, bez obzira na svoju opravdanost sa ekološkog, ali i drugih aspekata, još uvek veoma daleko od mogućnosti da zadovolje energetske potrebe čovečanstva.

Otkriće nuklearnih procesa i mogućnost dobijanja energije kao njihovog produkta otvorilo je nova vrata u proizvodnji velikih količina električne energije, a samim tim i po ekonomski prihvatljivoj ceni. Opštepoznata stvar u vezi ovog načina proizvodnje električne energije jeste njegova ekološka neprihvatljivost, obzirom na generisanje nuklearnog otpada kao nus produkata ovih procesa i neophodnosti njihovog odlaganja, ali možda još više na katastrofalne posledice po ljude i okruženje koje sa sobom nose havarije na ovakvim postrojenjima, čiji smo svedoci u bliskoj prošlosti i mi bili.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Miroslav Kljajić, vanr. prof.

**2. NUKLEARNE ELEKTRANE**

Uzimajući u obzir temelje koncepta modularne gradnje nuklearnih elektrana, naučna zajednica je definisala pojam malih modularnih reaktora (eng. Small Modular Reactors - SMR). Na početku treba reći da tehnologija malih reaktora nije nova tehnologija. To je novi koncept, koji je zahvaljujući svojim karakteristikama ekonomski i fleksibilno konkurentan, što mu omogućava primenu u različitim situacijama. Karakteristika koja određuje veličinu ovih energetskeg elemenata može se odnositi na instalisanu snagu i na gabarite.

**2.1. Princip rada modularnih reaktora**

Princip rada ovog tipa nuklearnih reaktora zasniva se na primeni nuklearne fisije kao osnove za proizvodnju energije. Nuklearna fisija predstavlja proces tokom kojeg se jezgro atoma određenih elemenata razdvaja na dva ili više manjih, lakših jezgara. Tokom procesa razdvajanja atoma dolazi do oslobađanja velike količine energije u obliku toplote i zračenja.

**2.2. Tipovi reaktora**

Najveći deo električne energije koja je došla iz nuklearnih elektrana, dobijen je u sistemima opremljenim sa dve vrste reaktora koji su razvijeni 50-ih godina prošlog veka i od tada su samo poboljšavani. Nuklearni reaktori prve generacije povučeni su iz upotrebe, dok većina onih koji su još uvek u upotrebi i koji proizvode oko 10 % ukupno proizvedene električne energije pripadaju drugoj generaciji.

**2.3. Komponente nuklearnog reaktora****2.3.1. Gorivo**

Osnovno i najčešće korišćeno nuklearno gorivo je uranijum. Obično se koristi u obliku peleta napravljenog od uranijum oksida ( $UO_2$ ), raspoređenih u cevima tako da formiraju gorive šipke. Šipke su raspoređene u gorive sklopove koji se nalaze u jezgru reaktora. U reaktoru napunjenom novim gorivom neophodno je postojanje izvora neutrona, koji svojim radom dovode do pokretanja reakcije. U tu svrhu se obično koristi berilijum pomešan sa polonijumom, radijumom ili drugim alfa emiterom.

**2.3.2. Moderator**

Moderator je materijal u jezgru reaktora koji dovodi do usporavanja neutrona oslobođenih tokom nuklearne fisije, kako bi mogli da pokreću još ovakvih procesa. Za ovu svrhu se obično koristi voda, mada može da bude i teška voda ili grafit.

### 2.3.3. Kontrolne šipke ili lopatice

Ovi elementi su napravljeni od materijala koji apsorbiraju neutrone, kao što je kadmijum, hafnijum ili bor. Kako bi mogli da kontrolišu brzinu reakcije ili da je čak i zaustave, bivaju ubačeni ili povučeni iz jezgra. Tokom nuklearne fisije, većina neutrona se oslobađa brzo, međutim desi se da neki i okasni. Takvi neutroni su ključni u obezbeđivanju kontrole nad sistemom lančane reakcije, kao i da je izvodljivo precizno ga sprovesti

### 2.3.4. Rashladna tečnost

Rashladna tečnost cirkuliše kroz jezgro i iz njega preuzima i prenosi toplotu generisanu tokom nuklearne fisije. U reaktorima sa lakom vodu, pored toga što funkcioniše kao moderator, voda igra ulogu i primarnog rashladnog sredstva. Sa izuzetkom reaktora sa ključalom vodom, postoji sekundarni krug rashladne tečnosti u kojem voda postaje para. Reaktori sa vodom pod pritiskom imaju dve do četiri primarne petlje rashladne tečnosti sa pumpama, koje pokreće para ili električna energija.

### 2.3.5. Posuda pod pritiskom ili cevi pod pritiskom

Posuda u kojoj je smešteno jezgro reaktora obično je robusna, izrađena od čelika u kojoj je pored jezgra smešten i moderator odnosno rashladna tečnost posuda, ali konstrukcija može biti izvedena i kao niz cevi koje sadrže gorivo i prenose rashladnu tečnost kroz okolni moderator.

### 2.3.6. Generator pare

Generator pare može biti deo sistema za hlađenje kod reaktora sa običnom ili teškom vodom pod pritiskom, gde se primarna rashladna tečnost pod visokim pritiskom, koja dovodi toplotu iz reaktora, u sekundarnom krugu koristi za proizvodnju pare za pokretanje turbine koja generiše električnu struju. U suštini ovo su veliki izmenjivači toplote namenjeni prenosu toplote sa jednog fluida na drugi, u ovom slučaju iz primarnog kola visokog pritiska, što je slučaj kod reaktora sa vodom pod pritiskom do sekundarnog kola, gde se voda pretvara u paru.

### 2.3.7. Kontejner

Kontejner predstavlja strukturu oko reaktora i pripadajućih generatora pare, čija je funkcija da ih zaštiti od spoljašnjih upada, ali isto tako, možda još značajnije da zaštiti spoljašnje okruženje od efekata radijacije u slučaju bilo kakvog ozbiljnog kvara na njima. Obično je to struktura izrađena od betona i čelika sa zidovima debljine ne manje od metar.

Noviji ruski i neki drugi reaktori poseduju uređaje za lokalizaciju topljenja jezgra ili tzv. hvatače jezgra smeštene ispod posude pod pritiskom, kako bi uhvatili bilo kakav otopljeni materijal jezgra u slučaju veće nesreće.

## 2.4. Radni vek nuklearnih reaktora

Većina današnjih nuklearnih elektrana, koje su još uvek u funkciji, prvobitno su bile projektovane za radni vek od 30 ili 40 godina. Međutim, nakon analize stanja postrojenja po isteku tog perioda zaključeno je da je uz velika ulaganja u sisteme, strukture i komponente, radni vek ovih sistema moguće produžiti, dok u nekoliko zemalja postoje i aktivni programi za produženje rada, obzirom na isplativost takvog postupanja u odnosu na izgradnju novih

postrojenja, pogotovu u svetlu aktuelnog otežanog i skupljeg snabdevanja električnom energijom. Skoro svi od gotovo 100 instaliranih nuklearnih reaktora u SAD imaju odobrenje za produženje dozvole za rad sa 40 na 60 godina

## 2.5. Koncept modularnosti - prednosti i nedostaci

Modularnost je koncept koji omogućava optimalno upravljanje troškovima, što znači da nivo ulaganja sredstava, stepen izlaganja riziku od potencijalnih opasnosti, ugrožavanje životne sredine direktno odgovara zadovoljenju potreba zajednice za određenim dobrima koje zahteva navedena ulaganja. Za razliku od sistema čija se strukturalno napredovanje završava trenutkom završetka njihove izrade, modularne strukture su tako projektovane da ih je strukturno moguće nadograditi odgovarajućim elementima.

## 2.6. Procesna modularnost

U procesnoj industriji, funkcionalni modul predstavlja strukturiranu jedinicu za planiranje i realizaciju, povezanu sa procesnom funkcijom koja formira „oblak“ neophodnih informacija. Takvi procesi mogu biti intenzivirani, modularni i nakon toga međusobno kombinovani, integracijom opreme u module manje veličine koji međusobno sarađuju. Modularno intenziviranje procesa može biti definisano kao razvoj hemijskog inženjeringa koji vodi ka znatno manjoj, čistijoj i energetski efikasnijoj tehnologiji ili koji kombinuje više operacija u nekoliko ili u samo jedan uređaj.

## 2.7. Proizvodnja modula

Koncept modularnosti u stvari predstavlja dizajn konfiguracije, koji podrazumeva projektovanje funkcionisanja, montaže i proizvodnje. Modularnost proizvodnje podrazumeva takav razvoj modula proizvoda koji omogućava njihovu minimalnu međuzavisnost u pogledu procesa proizvodnje, tako da pojedinačne karakteristike modula obezbeđuju njihovu maksimalnu sličnost s jedne strane i minimalnu sličnost po pitanju spoljašnjih karakteristika. Implementirani procesi proizvodnje jednog modula trebali bi da budu što je moguće nezavisniji od procesa koji se koriste za proizvodnju drugih modula, dok bi procesi tokom kojih nastaju komponente modula treba da bude slični.

## 2.8. Konstrukcija modula

Modularna konstrukcija podrazumeva instalaciju komponenti koje se izrađuju van lokacije montaže. Prednosti ovakvog koncepta ogledaju se u skraćanju vremena potrebnog za izgradnju i smanjenju troškova, kao i podizanju nivoa fleksibilnosti, bezbednosti, smanjenju količine nastalog otpada, smanjenju obima smetnji koje bi mogle da ometaju izgradnju, mogućnosti nezavisnog i paralelnog obavljanja poslove, čak i tokom hladnih zimskih meseci i na udaljenim lokacijama i olakšavanju preseljenja postrojenja kada je potrebno. Ovaj princip se može nazvati i modularnost opsega, obzirom da kombinovanje sa modularnošću obima u velikom postrojenju rezultira sveobuhvatnom modularnošću.

## 2.9. Koristi od koncepta modularnosti

Primena koncepta modularnosti vodi ka smanjenju složenosti sistema njegovom dekompozicijom na nezavisne ili međuzavisne komponente sa razumljivim i upravljivim karakteristikama. Pojednostavljenja u konstruisanju jednog nuklearnog postrojenja dovode do smanjenog obima rada, kao i rada na održavanju, nižih investicionih i operativnih troškova, povećane sigurnosti i pouzdanosti, smanjenja obima bezbednosnih mera van lokacije i smanjene interakcije između mašine i čoveka.

## 2.10. Savremeni trendovi u oblasti nuklearne tehnike

### 2.10.1. Sjedinjene Američke Države

Ministarstvo energetike SAD (eng. US Department Of Energy - USDOE) je u decembru 2020. najavilo početno ulaganje u iznosu od 30 miliona dolara u okviru Naprednog programa demonstracije rada reaktor (eng. Advanced Reactor Demonstration Program - ARDP) za pet timova sa sedištem u SAD koji razvijaju pristupačne tehnologije reaktora koje će biti korišćene u narednom periodu (10-14) godina i to: Kairos Power za Hermes reaktor smanjenog obima, koji predstavlja umanjenu verziju njegovog reaktor visoke temperature hlađenog fluoridnom solju (KP-FHR).

### 2.10.2. Velika Britanija

U julu 2020. godine, u okviru svog programa naprednog modularnog reaktora (eng. Advanced Modular Reactor - AMR), Odeljenje za poslovnu, energetska i industrijsku strategiju (eng. Department of Business, energy and industrial strategy - BIES), u cilju daljeg tehničko-tehnološkog razvoja eksploatacije nuklearne energije, dodelilo je po 10 miliona funti kompaniji Vestinghouse-a, za njihov brzi reaktor hlađen olovom (eng. Lead-cooled Fast Reactors - LFR) snage 450 MWe, konzorcijumu U-Battery, za njihov visokotemperaturni reaktor (eng. High Temperature Reactor - HTR) snage 4 MWe i kompaniji Tokamak Energy za njihov projekat kompaktnog fuzionog reaktora.

### 2.10.3. Kanada

U oktobru 2020. godine Energetska korporacija Ontario (eng. Ontario Power Generation - OPG) najavila je da će unaprediti procese inženjering i konstrukcije kroz saradnju sa tri operatera malih modularnih reaktora na nivou mreže, GE Hitachi (GEH), Terrestrial Energy i X-energy, s ciljem pružanja podrške energetskim potrebama udaljenim područjima. U tim aktivnostima fokus je na GEH - ovom modelu BWRX-300 snage 300 MWe, Terrestrial Energy - ovom integrisanom reaktoru sa rastopljenom solju snage 192 MWe i X-energy - ovom modelu Xe-100 visokotemperaturnog malog modularnog reaktora snage od 80 MWe. Sva tri modela reaktora su u fazi 2 procesa pregleda konstrukcije dobavljača. GEH uspostavlja kanadski lanac snabdevanja za svoj model BWRX-300.

### 2.10.4. Kina

Na globalnom nivou najnapredniji projekat malog modularnog reaktora razvijen je u Kini, gde kompanija Chinergy počinje da gradi visokotemperaturni reaktor snage 210 MWe, koji se sastoji od dva visokotemperaturna gasom hlađena reaktora, snage 250 MWt, čiji se rad zasniva na iskustvu nekoliko inovativnih reaktora od 60-ih do 80-ih godina prošlog veka [6].

Korporacija CNNC New Energy, kao zajedničko preduzeće CNNC, sa udelom u vlasništvu od 51% i korporacije China Guodian, sa udelom u vlasništvu od 49%, promovise reaktor ACP 100. Preliminarni bezbedonosni izveštaj koji je podrazumevao analizu demonstracionog postrojenja sa jednom jedinicom u Changjiang-u odobren je u aprilu 2020.

## 3. EKONOMSKA ANALIZA KORIŠĆENJA NUKLEARNE ENERGIJE

### 3.1. Snabdevanje nuklearnim gorivom

Industrija proizvodnje električne energije iz nuklearnih izvora svetskom tržištu trenutno doprinosi sa oko 10% svetske proizvodnje električne energije. Uzimajući sve relevantne faktore u obzir, za očekivati je da će igrati sve važniju ulogu u budućem snabdevanju električnom energijom za šta opravdanje postoji u sledećim razlozima:

- proizvodnja nuklearne energije generiše skoro nula emisiju ugljen-dioksida i drugih zagađivača,
- pouzdana i sigurna priroda nuklearne energije na zahtev, privlačna za zemlje u razvoju, one kojima nedostaju domaći energetski resursi, ali i za razvijene zemlje koje u cilju svog daljeg napretka imaju nameru da uvedu visok udeo obnovljivih izvora energije, uz istovremeno održavanje stabilnosti mreže,
- dugoročna troškovna konkurentnost nuklearne energije,
- industrijske i prednosti vezane za ljudske resurse povezane sa daljim razvojem i upotrebom nuklearne energije i
- sposobnost proizvodnje toplote sa skoro nultim nivoom ugljenika, uz dodatak električne energije, pomaže inače teško ostvariv proces dekarbonizacije.

### 3.2. Dostupnost i cena nuklearnog goriva

Na osnovu izveštaja Međunarodne agencije za nuklearnu energiju (eng. International Atomic Energy Agency - IAEA) koji se bavi globalnim scenarijima o potražnji i dostupnosti nuklearnog goriva u periodu od 2021. do 2040. godine objavljenom u septembru prošle godine, može se zaključiti da postoje očekivanja da će potražnja za uranijumom potrebnim za rad nuklearnih reaktora širom sveta ići uzlaznom linijom. Globalna potražnja za uranijumom iz nuklearnih reaktora u 2021. godini procenjena je na oko 62500 tona.

### 3.3. Ekonomija proizvodnje nuklearne energije

Proizvodnja električne energije eksploatacijom nuklearnog goriva može se okarakterisati kao cenovno konkurentna drugim oblicima njene proizvodnje, što međutim još uvek ne važi u onim situacijama gde postoji direktan pristup jeftinim fosilnim gorivima. Obzirom na njihovu ograničenost i neizbežno potpuno iskorišćavanje u relativno bliskoj budućnosti, za očekivati je da ovaj ekonomski odnos i u tim situacijama bude promenjen.



Slika 1. Cene uranijuma u prethodnih 25 godina

### 3.4. Primena torijuma u nuklearnim reaktorima

Pored uranijuma, u cilju proizvodnje električne energije, kao gorivo se može koristiti i torijum, koji neki autori vide kao manje opasno i ekološki prihvatljivije gorivo.

Torijum je blago radioaktivni element koji je prirodno lociran u Zemljinoj kori. Ima ga više od uranijuma i moguće ga je zračenjem pretvoriti u materijal pogodan za korišćenje u nuklearnim reakcijama.

Predviđeno je da bude korišćen zajedno sa nuklearnim gorivom primenljivim u nuklearnoj fisiji, kao što je slučaj sa recikliranim plutonijumom i uranijumom.

### 3.5. Ekonomija nuklearnih elektrana

Za nuklearne elektrane se zbog implementirane tehnologije može reći da su skupe za izgradnju, ali relativno jeftine za rad, obzirom da su operativni troškovi ovih postrojenja niži od skoro svih konkurenata na fosilnim gorivima, sa veoma malim rizikom od njihovog rasta. U zavisnosti od okolnosti, nuklearna energija može da bude konkurentna fosilnim gorivima, posebno uzimajući u obzir da su troškovi odlaganja otpada i razgradnje obično u potpunosti uključeni u operativne troškove. Konkurentnosti doprinose i društveni, zdravstveni i ekološki troškovi fosilnih goriva.

## 4. NUKLEARNA ENERGIJA U SRBIJI

Narastajuća globalna ekološka svest neizbežno dovodi do ovakve pojave i u Srbiji, što praktično znači da će naša država u bliskoj budućnosti morati sve više da se okreće zelenim i alternativnim izvorima energije, odnosno napuštati one koji za generisanje električne energije koriste prljavu, fosilna goriva.

Dok jedni smatraju da je bez obzira na evidentan tehnološki napredak ove tehnologije, ona i dalje predstavlja značajnu, potencijalnu opasnost za život i zdravlje stanovništva, drugi pak misle da narastajuće energetske potrebe, u svetlu pritiska za smanjenje korišćenja fosilnih goriva, neće moći biti zadovoljene iz obnovljivih izvora energije.

## 5. ZAKLJUČAK

Kao zaključak se na kraju rada može reći da će, bez obzira na želje, proći još mnogo vremena do razvoja tehnologija koje omogućavaju korišćenje zelenih izvora energije i istovremeno proizvodnju dovoljnih količina električne energije potrebne za zadovoljenje svih potreba. U tom smislu sve je više zagovornika koji smatraju da je nuklearna energija resurs koji može da popuni nastalu prazninu u ponudi. Uzimajući u obzir tu činjenicu, kao i činjenicu da je po mnogim pitanjima to veoma zahtevna tehnologija, moguće rešenje leži u modularnim nuklearnim reaktorima, kao optimalnom rešenju između energetskih potreba i raspoloživih resursa kapitala.

## 6. LITERATURA

- [1] Mario D. Carelli and Daniel T. Ingersoll: HANDBOOK of SMALL MODULAR NUCLEAR REACTORS, Woodhead Publishing, 2015
- [2] Esam M. A. Hussein: Emerging small modular nuclear power reactors: A critical review, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Regina, Canada, 2020
- [3] Zvaničan veb sajt Svetske nuklearne asocijacije - dostupno na [www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx](http://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx) [datum pristupa 12.03.2023.].
- [4] Zvaničan veb sajt američkog ministarstva energetike - dostupno na [www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs](http://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs) [datum pristupa 10.03.2023.].
- [5] Zvaničan veb sajt američkog ministarstva energetike - dostupno na [www.energy.gov/ne/benefits-small-modular-reactors-smrs](http://www.energy.gov/ne/benefits-small-modular-reactors-smrs) [datum pristupa 10.03.2023.].
- [6] Vodeći, besplatni onlajn portal koji prati teme održivog energetskog razvoja, klimatskih promena, zaštite životne sredine i mobilnosti redovnim objavljivanjem vesti, informacija o promeni zakonske regulative i investicionih mogućnosti u zemljama Balkana - dostupno na [www.balkangreenenergynews.com/rs/srbija-ce-ove-godine-doneti-odluku-o-gradnji-malih-nuklearnih-elektrana/](http://www.balkangreenenergynews.com/rs/srbija-ce-ove-godine-doneti-odluku-o-gradnji-malih-nuklearnih-elektrana/) [datum pristupa 10.05.2023.].

### Kratka biografija:



**Milenko Jovanov** rođen je u Zrenjaninu, Republika Srbija 1995. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mašinstva odbranio je 2023. god

kontakt: [jovanovm95@gmail.com](mailto:jovanovm95@gmail.com)