

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ
Академијски одбор за енергетику

НАУЧНИ СКУП

НУКЛЕАРНЕ ЕЛЕКТРАНЕ У ЕНЕРГЕТИЦИ СРБИЈЕ
- потребе, могућности, перспективе -



Свечана сала САНУ, Кнеза Михаила 35/II, Београд
22. новембар 2022. године, од 9:30 до 17:00 часова

ОРГАНИЗАЦИОНИ ОДБОР СКУПА

академик Слободан Вукосавић
академик Зоран Петровић
академик Велимир Радмиловић

проф. др Миодраг Месаровић
проф. др Шћепан Миљанић
дипл. инж. Љубо Маћић
мр Драган Влаисављевић



СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ
Академијски одбор за енергетику

НАУЧНИ СКУП

УЛОГА НУКЛЕАРНЕ ЕНЕРГЕТИКЕ У ЕНЕРГЕТСКОЈ ТРАНЗИЦИЈИ

УВОД

Академијски одбор за енергетику Српске академије наука и уметности организује скуп „НУКЛЕАРНЕ ЕЛЕКТРАНЕ У ЕНЕРГЕТИЦИ СРБИЈЕ“ у намери да понуди независне, квалификоване и на чињеницама засноване ставове на којима се могу темељити одлуке о даљем току енергетске транзиције у Србији. Скуп припада низу научних скупова посвећених обнављању и проширењу сазнања потребних за квалификовано промишљање и одлучивање. Претходе му научни скупови (I) *Стање и перспективе српске енергетике* (САНУ, јун 2017), (II) *Енергетика и климатске промене* (САНУ, новембар 2018), као и скуп (III) *Улога нуклеарне енергетике у енергетској транзицији*, који је одржан 2. новембра 2020. године у САНУ.

Планирани скуп представља наставак активности АО за енергетику на конкретизацији ставова изнетих на скупу (III), нарочито с обзиром на потребе и могућности Србије. Истовремено, он је усмерен ка разradi анализа и резултата садржаних у документу „Развој електроенергетике Републике Србије“, доступном на интернет страници Одбора за енергетику САНУ (odborzaenergetiku.rs/pdf/Razvoj_srpske_energetike.pdf), с посебним освртом на нуклеарну опцију, као могући ослонац у енергетској транзицији.

Током претходних година, одлучивање о српској енергетици одвијало се под снажним утицајем енергетске политике и интереса водећих земаља западне Европе, по угледу на стратегије усклађене са специфичностима њихове енергетике, индустрије и геополитичког положаја. Превасходни циљ ангажовања домаће струке био је прибављање формалне сагласности за већ назначене правце развоја и већ најављене дискретне одлуке представника српских власти, а тек у мањој мери суштинско укључивање домаће памети у промишљање и одлучивање о српској енергетици. Значајану улогу у доношењу одлука и изради темељних докумената Републике Србије имали су заступници интереса који су блиски, али не увек и једнаки интересима српског друштва. Уз уочљиву исхитреност у некритичком преузимању агенди и стратегија, често су доношене и краткорочне, неутемељене одлуке, што је у директном конфликту са дугорочном природом енергетских система и енергетске привреде. Услед неодговарајућих инвестиција, неутемељених очекивања у погледу заменских извора и недовољне компетентности у погледу доношења одлука, кључни производни капацитети су у доброј мери запуштени, што је довело Србију, традиционалног извозника електричне енергије, у стање у којем је током прошле зиме увозила око 25% неопходне електричне енергије, док је неодговарајући рад угљенокопа и термоелектрана смањио производњу термоелектрана на угаљ на свега 60% уобичајене.

Циљеви

Од великог значаја је одредити улогу коју би нуклеарна енергетика могла имати током наредних деценија. У том смислу од интереса је осветлити природу процеса који се одвијају у нуклеарним реакторима генерација III+ и напреднијих, с циљем да се процене материјални биланс, неопходни улази (гориво), излази (отпад), потребе за водом, простором, заштитом, цена градње, оперативни трошкови, животни век, испорука опреме и горива, могућности синергије с обновљивим изворима (ОИ), могућности замене парних котлова у постојећим ТЕ на угаљ, демисија, сигурносни ризици итд.

Организатори овог скупа препознају потребу да се увећа утицај домаће науке и струке на доношење одлука о српској енергетици и да се смањи ризик доношења исхитрених одлука које нису базиране на релевантним подлогама и информацијама, под притиском и без консултовања домаћих стручњака и институција. Они уочавају и потребу за конструктивним дијалогом и сматрају да је нужно унапредити комуникацију из-

међу потрошача, привреде, струке, јавности и државе, како би токови енергетске транзиције били усклађени са интересима српског друштва. Ово тим пре што, ако би Србија донела одлуку да у будућности користи нуклеарну енергију, треба имати у виду да је период од доношења одлуке о изградњи до прикључења нуклеарне електране на мрежу најмање петнаестак година, под условом да не дође до непланираних околности.

Мотивација

Суштину енергетске транзиције чини постепено смањивање коришћења фосилних горива, а пре свега напуштање угља као енергента, да би се смањила емисија угљен-диоксида у атмосферу, јер он има доминантан допринос ефекту стаклене баште, чије последице су климатске промене изазване глобалним отопљавањем. ОИ и нуклеарна енергија (НЕ) пружају могућност производње енергије без наведене емисије, при чему је НЕ стабилан извор у дужем периоду, док ОИ зависе од периодичних, непредвидивих промена, које су често у нескладу с потребама потрошача.

У структури производње електричне енергије у Србији доминира производња из угља (лигнит), с уделом између 60 и 70%, али с тенденцијом смањивања. На другом месту су хидроелектране (преко 30%), док је удео осталих обновљивих извора још увек веома низак. Узгред, потенцијали за производњу из ветроелектрана су релативно скромни, првенствено због значајно ниже густине снаге ветра од оне у земљама у којима оваква производња доминира и неповољног распореда. Потенцијали за соларне електране су већи, али су мање искоришћени. Разлози се понајвише налазе у томе што је енергија сунца расположива само током краћег дела дана, али не и током ноћи нити током вечерњег пораста потрошње, што отежава њихову интеграцију у систем.

Важна особина ветроелектрана и соларних електрана је варијабилност, другим речима, снагом ових извора не може се управљати. Све варијације у њиховој производњи морају се покрити ангажовањем других флексибилних електрана и узимањем енергије из складишта или похрањивањем вишка енергије у складишта. Складиштење енергије је скопчано са значајним трошковима. Ако је удео варијабилних извора у производњи електричне енергије значајан, трошкови градње извора и складишта вишеструко премашују трошкове градње базних извора исте годишње производње. Поред улагања у складишта неопходно је унапредити и електричну мрежу, укључујући и интерконекије, да

би ова била уподобљена њиховом постојању, што додатно увећава трошкове интеграције ОИ у ЕЕ систем.

Термоелектране на угаљ могу се заменити нуклеарним електранама, које омогућују стабилно снабдевање електричном енергијом по повољним ценама, а без неповољних емисија. Показује се да би електране на природни гас била ризична опција, тако да је разумно да се њихов развој сведе на минимум. Предуслов за градњу НЕ је решавање низа проблема у веома комплексном пољу, где је неопходно размотрити технолошке, финансијске, међународне, правне, институционалне, кадровске, еколошке, безбедносне и друге друштвене аспекте. Планирани скуп би требало да понуди одговоре на нека у низу постављених питања. Коначно, у вези с евентуалним прихватањем нуклеарне опције у Србији, важно је напоменути следеће:

- Србија није земља без ‘нуклеарних искустава’, напротив. Она се везују за искуства Нуклеарног програма СФРЈ из осамдесетих година XX века, који је требало да резултира изградњом неколико електрана велике снаге, што, нажалост, није остварено. У том програму су учествовале бројне ондашње компаније и институти.
- И пре наведеног програма постојала су значајна искуства, стицана нарочито кроз оснивање и развој више нуклеарних института, као и других институција, која су била праћена развојем одговарајућих кадрова.
- Постојали су (постоје и даље) значајни научни нуклеарни институти, као што су *Институт за нуклеарне науке „Винча“*, *Институт за технологије нуклеарних и других минералних сировина (ИТНМС)*, те *ИНЕП*. Истина, сви су они током времена делимично напустили своју изворну нуклеарну оријентацију.
- У Винчи постоји *ЈП Нуклеарни објекти Србије (НОС)*, у чијем су саставу оба нуклеарна реактора која Винча има.
- У образовном пољу постојали су студијски програми на више факултета Универзитета у Београду (Електротехнички, Машински, Факултет за физичку хемију) везани за нуклеарне науке. На пример, Електротехнички је имао тзв. *техничку физику*, која је временом скоро ишчезла, док је Факултет за физичку хемију углавном сачувао своје курсеве у оквиру катедре за *Радиохемију и нуклеарну хемију*. На Машинском факултету постоје неке активности у области термотехнике и хи-

дродинамичких процеса. Ипак, шира слика је таква да је дошло до значајног осипања кадрова, тако да је данас број људи са компетенцијама у нуклеарној области мали и недовољан за реализацију озбиљних програма. Узгред, то су већином људи у поодмаклим годинама. Они могу помоћи у обнови кадрова, али је кључ у обнављању и модернизацији студијских програма, што је функција државе. У области образовања би било разумно размишљати и о школовању кадрова у иностраним институцијама.

- *Закон о забрани изградње нуклеарних електрана („мораторијум“)* у СФРЈ, који је дошао након чернобиљске катастрофе, а који је пренет и у законодавство Србије и још увек је актуелан, озбиљна је препрека развоју НЕ у свим доменима, јер је суспендовао многе активности у овој области. Посебно се лоше одразио на универзитетске студијске програме, на интерес стручњака за ову област итд.

Документа скупа

Предавања, дискусије и прилози учесника биће уређени и објављени у форми зборника, чији ће један део бити сажетак сачињен у форми закључака и препорука, а намењен првенствено доносиоцима одлука. Током дискусија, најпре ће се разматрати питања (садржај до 100 речи) која учесници скупа доставе на контакт адресу Академије jasminka.veljic@sanu.ac.rs.

ПРОГРАМ

9:30–10:00 ОТВАРАЊЕ СКУПА

Поздравне речи

10:00–11:10 I. СТАЊЕ У ЕНЕРГЕТИЦИ У СУСРЕТ ЕНЕРГЕТСКОЈ ТРАНЗИЦИЈИ

Медијатор: академик Зоран Петровић

10:00–10:30 ПРЕДАВАЊЕ I

академик Слободан Вукосавић

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, САНУ

СТАЊЕ И ПЕРСПЕКТИВЕ ЕНЕРГЕТИКЕ У СРБИЈИ

Садржај:

- Постојећи енергетски ресурси у Србији, снаге, стање, перспективе, ограничења – енергетска транзиција.
- Могућна прелазна решења. Улога ОИ.
- Пројекције промена:
 - у годишњој производњи из ТЕ на угаљ,
 - у годишњој производњи из ТЕ на природни гас и биогаз,
 - у годишњој производњи из ХЕ,
 - у годишњој потрошњи,
 - у недостајућој енергији коју би требало добити из варијабилних извора и нових базних извора.
- Пројекције капацитета за складиштење у функцији удела варијабилних извора.
- Трошкови транзиције у функцији удела варијабилних извора.
- Утицај нових капацитета базних извора на трошкове транзиције.

10:30–11:00 ПРЕДАВАЊЕ II

др Јасмина Вујић, професор
University of California Berkeley (USA), Department of Nuclear
Engineering

СТАЊЕ НУКЛЕАРНЕ ЕНЕРГЕТИКЕ У СВЕТУ И ПРАВЦИ У РАЗВОЈУ САВРЕМЕНИХ НУКЛЕАРНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Садржај:

- Кратак преглед стања нуклеарне енергетике у свету.
- Најновији трендови у развоју савремених нуклеарних технологија у САД после усвајања два закона (2019): *NEIMA* (Nuclear Energy Innovation and Modernization Act) – Закон о иновацијама и модернизацији нуклеарне технологије, и *NEICA* (Nuclear Energy Innovations Capabilities Act) – Закон о развоју иновационих потенцијала у нуклеарној енергетици.
- Изградња два прототипа савремених нуклеарних реактора: *TerraPower* (реактор *Sodium*) и *X-energy* (реактор He-100).
- У којој фази се налази *NuScale*?
- Шта се захтева од савремених нуклеарних технологија?
- Шта се захтеве од земаља које желе примену савремених нуклеарних технологија у производњи енергије?

11:00–11:30 ПАУЗА

11:30–13:30 II. НУКЛЕАРНИ ЕНЕРГЕТСКИ СИСТЕМИ – САВРЕМЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Медијатор: проф. др Шћепан Миљанић

11:30–12:00 ПРЕДАВАЊЕ III

др Ђорђе Лазаревић, научни сарадник
Нуклеарни објекти Србије, Винча, Београд

НОВЕ ГЕНЕРАЦИЈЕ НУКЛЕАРНИХ ЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА: Нуклеарне електране великих снага

Садржај:

- Резерве уранијума у свету и Србији.
- Потрошња нуклеарног горива у једној нуклеарној електрани велике снаге (реда 1000 MW).
- Досадашња искуства у коришћењу нуклеарне енергетике (акциденти *Three Mile Island*, *Чернобыль* и *Fukushima*) и *post-Fukushima* захтеви.
- Перспектива нуклеарне енергетике у нуклеарним реакторима будућности (нуклеарним реакторима IV генерације).
- Основне карактеристике нуклеарних реактора IV генерације (унапређена нуклеарна сигурност у односу на постојеће нуклеарне електране II генерације, обезбеђење електричне енергије у наредних 10.000 година, цена производње на нивоу конкурентних извора електричне енергије, минимизирање генерисања радиоактивног отпада и спречавање ширења нуклеарног материјала).
- Нуклеарне електране III+ генерације као тренутна реалност.
- Основне карактеристике нуклеарних електрана III+ генерације (EPR-1600, AP-1000, VVER-1200, Hualong One и APR-1400).
- Поређење нуклеарних електрана III+ генерације са аспекта нуклеарне сигурности и са аспекта одржавања.

- Основни недостатак постојећих нуклеарних електрана III+ генерације (немогућност производње нових фисионих материјала).
- Могућа улога нуклеарних електрана III+ генерације у Србији.

12:00–12:30 ПРЕДАВАЊЕ IV

Миодраг Милошевић, дипл. инж.
Нуклеарни објекти Србије, Винча, Београд

НОВЕ ГЕНЕРАЦИЈЕ НУКЛЕАРНИХ ЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА: Модуларни нуклеарни реактори мале снаге

Садржај:

- Улога SMR (малих модуларних) нуклеарних електрана у будућности нуклеарне енергетике.
- Основна очекивања од малих модуларних нуклеарних електрана (увећана нуклеарна сигурност у односу на нуклеарне електране III+ генерације, одрживост производње електричне енергије у наредних 10.000 година, одвођење застале топлоте пасивним системима и сагоревање радијационо опасних алфа емитера, као што су нептунјум, америцијум и киријум).
- Карактеристике и изазови у развоју основних типова малих модуларних нуклеарних електрана према категоризацији за нуклеарне електране IV генерације (интегралних лаководних PWR и BWR реактора, интегралних реактора на брзе неутроне хлађених течним натријумом, или течним оловом, или хелијумом, високотемпературних реактора хлађених хелијумом и нуклеарних реактора са истопљеним горивом).
- Основне карактеристике нуклеарних електрана средње снаге (већих од 300 MW).
- Поређење малих и средњих нуклеарних електрана са нуклеарним електранама III+ генерације са аспекта цене производње електричне енергије.

- Могућа улога нуклеарних електрана мале и средње снаге у Србији.
- Кратак преглед домаћих искустава у изучавању нуклеарних процеса у малим и средњим нуклеарним електранама.

12:30–13:00 ПРЕДАВАЊЕ V

проф. др Владимир Стевановић
Универзитет у Београду – Машински факултет

ПРОГРАМ УВОЂЕЊА НУКЛЕАРНЕ ЕНЕРГЕТИКЕ И РАЗВОЈА ОРГАНИЗАЦИОНЕ, ИНСТИТУЦИОНАЛНЕ И ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Садржај:

- Услови за доношење програма за примену НЕ:
 - релативно стабилни политички, економски и социјални услови,
 - стручна и научна промоција НЕ у оквиру енергетске политике,
 - укључивање нуклеарне опције у стратешке планове,
 - политичка одлука о коришћењу НЕ – укидање мораторијума.
- Развој инфраструктуре за примену програма НЕ и градњу електране:
- Формирање државне организације за примену нуклеарног енергетског програма (NEPIO) за:
 - припрему одлуке за коришћење нуклеарне енергије,
 - припремне активности за градњу нуклеарне електране,
 - активности током градње и експлоатације електране,
 - затварања након истека радног века.
- Инфраструктурне ставке које треба организовати и спроводити:
 - политичка одлука и подршка (национална, регионална, међународна),

- сигурност (инжењерски и друштвени аспекти),
- менаџмент, финансирање, правна регулатива, нуклеарно регулаторно тело,
- заштита животне средине, заштита од јонизујућих зрачења,
- развој људских ресурса,
- локације нуклеарне електране и пратећих објеката,
- безбедност нуклеарног материјала и објеката,
- нуклеарни горивни циклус,
- одлагање и складиштење нуклеарног отпада.
- Примери увођења НЕ програма у свету.
- Развој кадрова за примену НЕ и нуклеарно инжењерство:
 - млади кадрови у научно-истраживачким, техничко-технолошким и фундаменталним пројектима у институтима, на факултетима и у индустрији, докторске студије,
 - значај оперативног искуства и фундаменталног познавања процеса, обука од стране вендора нуклеарне опреме,
 - подршка ресорних министарстава.

13:00–13:30 ПРЕДАВАЊЕ VI

проф. др Миодраг Месаровић

Академија инжењерских наука Србије, Београд

ЕКОНОМСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ НУКЛЕАРНИХ ЕЛЕКТРАНА

Садржај:

- Иницијалне инвестиције за изградњу НЕ:
 - структура улагања у материјале и опрему,
 - структура улагања у радове и услуге,
 - структура улагања у откупе и инфраструктуру,
 - инвестициона улагања по јединици капацитета,
 - динамика улагања у набавке, услуге и радове .
- Трошкови финансирања изградње НЕ:
 - врсте/извори финансирања изградње,
 - трошкови капитала за финансирање изградње.

- Трошкови погона и одржавања НЕ:
 - фиксни трошкови,
 - променљиви трошкови.
- Трошкови обезбеђења свежег горива (Front End):
 - трошкови набавке уранијума,
 - трошкови конверзије уранијума,
 - трошкови обогаћивања уранијума,
 - трошкови фабрикације горивних елемената.
- Трошкови поступања са исслуженим горивом (Back End):
 - трошкови складиштења исслуженог горива,
 - трошкови одлагања радиоактивног отпада.
- Трошкови разградње електране по истеку радног века.
- Екстерни и остали трошкови специфични за НЕ.
- Карактеристике рада НЕ у електроенергетском систему:
 - системски трошкови укључења НЕ у систем,
 - искоришћење инсталисаног капацитета НЕ у систему.
- Јединични трошкови производње електричне енергије.
- Нивелисани трошкови енергије током века електране (LCoE).
- Упоредње трошкова производње из нуклеарних и других извора:
 - упоређење јединичних трошкова производње,
 - упоређење осетљивости трошкова на промене цена горива,
 - упоређење осетљивости на трошкове капитала,
 - упоређење системских трошкова.
- Закључци и препоруке.

13:30–14:30 ПАУЗА (ручак)

**14:30–16:00 III. СИГУРНОСТ, БЕЗБЕДНОСТ, ЗАШТИТА.
ПИТАЊЕ ЛОКАЦИЈА**

Медијатор: проф. др Миодраг Месаровић

14:30–15:00 ПРЕДАВАЊЕ VII

Зоран Драче, дипл. инж. машинства
Section Head INPRO, IAEA¹ (у пензији)

¹International Atomic Energy Agency – Међународна агенција за атомску енергију (са седиштем у Бечу).

КОНТРОВЕРЗНЕ ТЕМЕ НУКЛЕАРНЕ ЕНЕРГЕТИКЕ

Садржај:

- Сигурност и заштита од зрачења:
 - основе сигурности и заштите људи и постројења,
 - сигурност нуклеарно-енергетских постројења и одбрана по дубини у случају акцидента-инцидента,
 - емисије у околину.
- *Back-end* нуклеарног горивног циклуса:
 - руковање исслуженим горивом од генерације до трајног одлагања,
 - нуклеарни отпад из напредних реактора и иновативних горивних циклуса,
 - прерада исслуженог горива и одлагање нуклеарног отпада из прераде,
 - пролиферација нуклеарног материјала и “nuclear trade”,
 - мултилатерално геолошко одлагалиште.
- Одрживост развоја нуклеарне енергетике:
 - основни циљеви иновација нуклеарно-енергетских постројења, укључујући и њихову разградњу (декомисију),
 - енергетски систем у комбинацији термалних и брзих реактора.
- Ризици при изградњи нуклеарно-енергетских постројења:
 - основни узроци кашњења за време изградње,
 - организација пројекта изградње,
 - осигурање ланаца снабдевања.

- Значај избора испоручиоца нуклеарног постројења/ нуклеарне технологије:
 - дуговечност сарадње са испоручиоцем постројења/ технологије,
 - могућности сопственог развоја.

15:00–15:30 ПРЕДАВАЊЕ VIII

Јан Клинка, дипл. инж. елект. тех.
Електрооводина, Нови Сад (у пензији)

ИСТРАЖИВАЊА СА ЦИЉЕМ ИЗБОРА ОПТИМАЛНЕ ЛОКАЦИЈЕ ЗА ИЗГРАДЊУ НЕ У СРБИЈИ

Садржај:

- Кратак историјат:
 - нуклеарни програм СФР Југославије и конзорцијуми који су га носили (ЈУГЕЛ, ЈУМЕЛ, НУКЛИН),
 - утицај чернобильске катастрофе и каснији догађаји.
- Тренутно стање.
- Регулатива која усмерава процес избора НЕ и локације. Процедуре и неопходна истраживања:
 - SITE SURVEY (избор потенцијалне локације),
 - SITE EVALUATION (избор приоритетних локација),
 - SITE ASSESSMENT (детаљна верификација локације).
- Употребљивост досадашњих истраживања:
 - истражне радње из 80-тих година прошлог века на изналажењу локације за НЕ,
 - директно употребљиве истражне анализе (хидрологија, сеизмика, геофизика. метеорологија. геологија, хидрогеологија),
 - потреба детаљне актуелизације неких података.
- Коначан избор и детаљна верификација микролокације.
- Критичке оцене резултата стечених кроз претходна истраживања. Предлози.

15:30–16:00 ПАУЗА

**16:00–17:00 IV. ДОДАТНЕ ТЕМЕ, ДИСКУСИЈА И
ЗАКЉУЧЦИ**

Медијатор: академик Слободан Вукосавић

- Завршно излагање као преглед обрађених тема и изнетих идеја, као и евентуалних нових иницијатива и подсећања (Сл. Вукосавић, Шћ. Миљанић, Јб. Маћић; макс. 20 минута).
 - ПОСЕБНО: Улога државе у потенцијалном развоју НЕ.
- Општа дискусија по свим разматраним темама (макс. 30 минута).
- Закључци.

