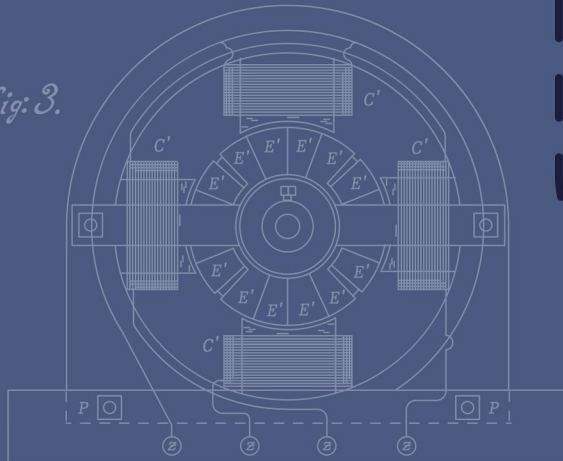
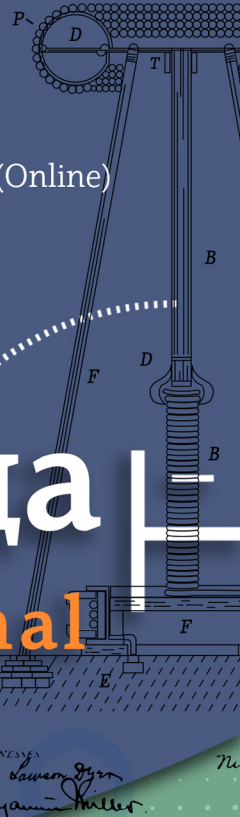




fig. 3.



1.119.732



ISSN 3009-2892 (Online)

УДК 620.9
621.31

Електропривреда

Electric Power Industry Journal

2025

Година 3, Број 1
Volume 3, Issue 1





Електропривреда

Electric Power Industry Journal



Научно-стручни часопис Акционарског друштва „Електропривреда Србије”
у суиздаваштву са Електротехничким институтом „Никола Тесла” Београд



Година 3, Број 1

Садржај

Импресум	
Реч Уредништва	1-1
Чланци	
<i>Тема броја: коришћење обновљивих извора енергије и нових технологија</i>	
Владимир М. Шиљкут Изазови и могућности дугорочног развоја и декарбонизације „Електропривреде Србије”	2-24
Јадранка М. Јањанин, Милан М. Даниловић, Жељко Р. Јовановић Анализа потребних месечних количина електричне енергије произведене из обновљивих извора енергије за надокнаду губитака у преносном систему	25-36
Славица Стојиљковић, Владимир М. Шиљкут Приказ управљачких система ветрогенератора	37-50
<i>Остале области</i>	
Татјана Цинцар Вујовић Примењена метрологија у Електродистрибуцији Србије	51-62
Додатак – прилози	
Уређивачка политика и тематске области часописа	63-63
Категоризација (рангирање) рукописа	64-64
Детаљно упутство ауторима о начину припреме чланка	65-69



ISSN 3009-2892 = Електропривреда (Online)

ИЗВРШНИ ИЗДАВАЧ

АКЦИОНАРСКО ДРУШТВО „ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА СРБИЈЕ” БЕОГРАД

11 000 Београд, Балканска 13

Електронска презентација: www.eps.rs

Телефон Уредништва: +381-11-365-23-63

Имејл: epijournal.editor@eps.rs

Веб-платформа Часописа: <https://epijournal.eps.rs>

СУИЗДАВАЧ

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ИНСТИТУТ „НИКОЛА ТЕСЛА” БЕОГРАД

11 000 Београд, Косте Главинића 8а

Електронска презентација: www.ieent.org

Телефон: +381-11-39-52-000

Телефакс: +381-11-36-90-487

ЗА ИЗВРШНОГ ИЗДАВАЧА

Душан Живковић, дипл. инж. ел.

Генерални директор ЕПС АД

ЗА СУИЗДАВАЧА

Др Драган Ковачевић, дипл. инж. ел.

Директор ЕТИ „Никола Тесла”

ГЛАВНИ И ОДГОВОРНИ УРЕДНИК

Др Владимир М. Шилкут, дипл. инж. ел.

ИЗДАВАЧКИ САВЕТ

Др Драган Ковачевић, Електротехнички институт „Никола Тесла” Београд

Небојша Петровић, „Електромрежа Србије” АД Београд, председник ЦИГРЕ Србија

Ванр. проф. др Жељко Поповић, ФТН Нови Сад, представник ЦИРЕД Србија

Мр Ненад Шијаковић, „Електромрежа Србије” АД Београд

Мр Душан Вукотић, „Електродистрибуција Србије” ДОО Београд

Проф. др Владимир А. Катић, професор у пензији ФТН Нови Сад, председник Уређивачког одбора

Др Владимир М. Шилкут, „Електропривреда Србије” АД Београд, главни и одговорни уредник

УРЕЂИВАЧКИ ОДБОР

Проф. др Владимир А. Катић, професор у пензији ФТН Нови Сад, председник

Проф. др Драгутин Д. Саламон, професор у пензији ЕТФ Београд, заменик председника

Проф. др Александар Гајић, Академија инжењерских наука Србије (АИНС),

професор у пензији Машинског факултета Београд

Проф. др Јован Нахман, АИНС, професор у пензији ЕТФ Београд

Проф. др Никола Рајаковић, председник Савеза енергетичара Србије, професор у пензији ЕТФ Београд

Проф. др Младен Кезуновић, Texas A&M University

Проф. др Мирослав Беговић, Texas A&M University

Проф. др Јовица Милановић, University of Manchester, School for Electrical Engineering

Проф. др Владимир Терзија, Newcastle University

Проф. др Борис Думнић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Проф. др Лука Стрезоски, Факултет техничких наука, Нови Сад

Проф. др Драган Тасић, Електронски факултет, Ниш

Проф. др Лидија Коруновић, Електронски факултет, Ниш

Проф. др Драгана Животић, Рударско-геолошки факултет, Београд

Проф. др Мића Јовановић, Технолошко-металуршки факултет, Београд

Ванр. проф. др Тина Дашић, Грађевински факултет, Београд

Доц. др Јелена Поноћко, SP Energy Networks и University of Manchester, School for Electrical Engineering

Др Ана Дајић, Технолошко-металуршки факултет, Београд

Др Драгослав Перић, хонорарни консултант, Београд

Др Саша М. Стојковић, Академија техничко-уметничких струковних студија, Београд

Др Драган Ковачевић, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Београд

Др Нинел Чукалевски, Институт „Михајло Пупин”, Београд

Др Милинко Радосављевић, Рударски институт, Београд

Др Марија Ђорђевић, „Електромрежа Србије” АД, Београд

Др Јасна Марковић Петровић, ЕПС АД, Београд

Др Рада Крговић, ЕПС АД, Београд
Др Владимир Ђорђевић, ЕПС АД, Београд
Др Милорад Пантелић, ЕПС АД, Београд
Др Миљасав Томић, ЕПС АД, Београд
Мр Драган Влаисављевић, Београд
Мр Александар Јаковљевић, ЕПС АД, Београд
Мр Никола Обрадовић, „Електромрежа Србије” АД, Београд
Владан Ристић, „Електромрежа Србије” АД, Београд
Радован Станић, ЕПС АД, Београд
Биљана Стекић Јовановић, ЕПС АД, Београд
Јован Илић, ЕПС АД, Београд
Милан Ђорђевић, ЕПС АД, Београд
Радос Чабаркапа, Електроенергетски координациони центар, Београд
Александар Латинковић, ЕПС АД, Београд
Жељко Лазаревић, ЕПС АД, Београд

ТЕХНИЧКО УРЕДНИШТВО

Развој, дизајн и уређивање веб-платформе

Игор Меденица (ЕД Србије ДОО)

Данило Мијатовић

Радован Брајковић

Лектор и коректор

Милеса Карацић

Преводиоци

Јасна Ђуровић

Срђан Бугарић

Ивана Јевтовић

Сунчица Ђокић Крстић

Ранка Младеновић

Технички секретаријат

Мр Ангелина Миловановић

Дејана Косановић

Часопис „Електропривреда“ – *Electric Power Industry Journal*
излази двапут годишње, искључиво у електронском облику,
на <https://epijournal.eps.rs> и типа је *Open Access*

COBISS.SR-ID - 121874441

УВОДНА РЕЧ УРЕДНИШТВА

Поштовани читаоци и сарадници,

Пред вама је треће, редовно издање Часописа „Електропривреда” – *Electric Power Industry Journal*. У жељи да задржимо актуелност и да додатно подстакнемо стручну и научну дискусију о томе у ком правцу је технички, технолошки, економско-финансијски, али и еколошки и социолошки оправдано усмерити брод српске енергетике на пучини декарбонизације и енергетске транзиције, овај број започињемо прегледом и могућностима нових технологија и увидом у студијска разматрања могућности коришћења потенцијала којима Србија располаже.

Наиме, у циљу очувања што већег степена њене енергетске независности, од пресудне важности видимо управо приоритетно коришћење ресурса којима сама Србија располаже. Стога је већ од овог момента, па све до 2050. године и захтеваног напуштања технологија заснованих на фосилним горивима, од изузетне важности чинити промишљене кораке да би се овакав статус – електроенергетска независност – задржао и током „зелене” транзиције и по остварењу њеног циља. Да би се остварио један такав сценарио, који сматрамо јединим оправданим, први неопходан корак је реално, стручно и непристрасно проценити ресурсе које Србија има, и на које би се максимално могла ослонити. То се једнако односи на потенцијале сунчеве енергије и ветра, биомасе, геотермалне енергије, као и на преостали, досад неискоришћени, хидропотенцијал. Наиме, нови хидросистеми са седмичним и сезонским акумулацијама, а посебно реверзибилне хидроелектране и пумпно-акумулациона постројења, додатно би подстакли изградњу ветропаркова и соларних електрана у Србији, неопходних на путу декарбонизације и енергетске транзиције. Овакви хидрокапацитети би, својим карактеристикама и адекватним погоном, ублажавали проблем наглих и великих варијација у производњи енергије, који ће се с временом увећавати услед све већег удела интермитентних извора у националном производном портфелу. Уз одговарајуће ангажовање нових, реверзибилних хидрокапацитета у тренуцима када је то и у тржишном смислу оптимално и најповољније, био би оствариван додатни приход, унапређујући и финансијске перформансе електропривреде.

Од варијабилне производње соларних електрана и ветроелектрана још озбиљнији, стратешки проблем за електроенергетски систем Србије представља чињеница да тренутно готово 70% електричне енергије потиче из термоелектрана на нискокалорични линит. Стога је једнако важно да, у сарадњи са научном заједницом, струка истражи и могућности примене нових технологија које би омогућиле постепену замену термокапацитета у функцији покривања базног дела дијаграма оптерећења, и утврди чија је примена реалистична, најпогоднија и оправдана у нашим условима и приликама. При томе такође треба уважити важност обезбеђивања највишег могућег нивоа електроенергетске независности Републике Србије.

По један текст овог издања посвећен је посебним аспектима употребе интермитентних „зелених” извора; први – могућности коришћења производње из електрана на обновљиве изворе енергије за покривање губитака електричне енергије у систему, а други – управљачким системима ветрогенераторâ. Другу, такође значајну, тему овог броја – метрологију – читаоцима ће приближити један занимљив и користан чланак о међулабораторијском поређењу контролних тела за оверу бројила електричне енергије, Оператора дистрибутивног система.

На крају овог Уводника, надајући се да ће вам садржај овог броја бити занимљив, актуелан и од користи, понављамо наш позив на активно учешће читалачке публике. Дакле, свако ко буде заинтригиран неким од ставова, идеја и предлога изнетих у текстовима који следе и нађе за сходно да то учини, слободно може доставити Уредништву своју дискусију, полемику или лични став по конкретном питању. Радо ћемо их размотрити и сагледати могућност за њихово објављивање у наредном броју Часописа.

У име Уредништва,



Др Владимир Шилкут
Главни и одговорни уредник

Владимир М. Шилјут*



Изазови и могућности дугорочног развоја и декарбонизације „Електропривреде Србије”

¹ Акционарско друштво „Електропривреда Србије” Београд

<https://doi.org/10.18485/epij.2025.3.1.1>

Прегледни рад

Кључне поруке

- Преглед најновије литературе о декарбонизацији, транзицији и циркуларној економији
- Предлог модела декарбонизованог електроенергетског система на примеру Србије
- Могућности и изазови за диверсификацију енергената и примену нових технологија
- Предлог начина трансфера знања у енергетском сектору из академског домена у домен индустрије/привреде

Кратак садржај

Загађење животне средине и трошење ресурса за рад и развој индустрије и националних економија учинило је неминовним изналажење техничко-технолошких решења која ће омогућити одрживи развој у будућности. Декарбонизација, циркуларна економија и диверсификација енергената се стога намећу као решење. И у (електро)енергетском сектору оне подразумевају енергетску транзицију, првенствено од садашњег масовног коришћења фосилних горива ка еколошки прихватљивијим примарним енергентима, уз повећање енергетске ефикасности којим би се обухватило и повећање обима коришћења отпадне топлоте и отпадних материја у процесима производње топлотне и електричне енергије. Декарбонизација, међутим, отвара низ сложених питања и проблема; од техничко-технолошких и економско-финансијских – начина, динамике и цене спровођења тог дугорочног процеса – до питања њене прихватљивости, праведности и потребе стицања одговарајућих знања и свести. На примеру Србије, њеног електроенергетског система (ЕЕС) и „Електропривреде Србије” (ЕПС) показује се да је потребно постепено, током неколико деценија, успоставити такав производни микс који би био заснован и ослоњен на различите еколошки прихватљиве енергенте и на нове технологије, који ће бити не само изводљив и одржив на дуги рок него и технички, финансијски и економски оптималан за српске услове и прилике, као и друштвено прихватљив. Осим тога, тај микс мора омогућити профитабилан рад ЕПС-а уз истовремену способност да обезбеди стабилност и поузданост рада ЕЕС-а Србије, сигурност снабдевања крајњих корисника, највиши могући ниво енергетске независности и безбедности Републике Србије и задовољство крајњих корисника ЕЕС-а и запослених у ЕПС-у. При томе, у највећој могућој мери треба поштовати и примењивати принципе који ће водити ка повећању енергетске ефикасности, успостављању циркуларне економије и смањењу негативних утицаја на животну средину, као и на социјални аспект. Избор најпогоднијих и најпримеренијих нових технологија и конкретних техничких решења нових капацитета за производњу електричне и топлотне енергије убудуће треба да буде вршен на основу мишљења и закључака до којих ће доћи експерти из научних и стручних кругова, својим заједничким радом и синергијским деловањем.

Кључне речи

Декарбонизација, диверсификација, енергенти, енергетска ефикасност, енергетска транзиција, циркуларна економија

Примљено: 26. фебруар 2024.

Рецензирано: 13. март 2024.

Измењено: 27. март 2024.

Прихваћено: 18. април 2024.

* Владимир М. Шилјут, +381-64-897-46-72

E-mail: vladimir.siljkut@eps.rs

1. УВОД

Суочено са све већим загађењем животне средине и све бржим исцрпљивањем ресурса на којима се још увек у огромној мери заснива функционисање свеколике индустрије, националних економија и опстанак наше цивилизације, човечанство треба да прихвати неминовност изналажења техничко-технолошких решења која ће омогућити одрживи развој у будућности. Декарбонизација, циркуларна економија и диверсификација енергената се стога намећу као неминовност. И у самом енергетском сектору, укључујући и електроенергетику, оне подразумевају енергетску транзицију, првенствено од садашњег масовног коришћења фосилних горива ка еколошки прихватљивијим примарним енергентима, уз повећање енергетске ефикасности којом би се обухватило и повећање обима коришћења отпадне топлоте и отпадних материја у процесима производње топлотне и електричне енергије. На путу декарбонизације, међутим, отвара се низ сложених питања и проблема; од техничко-технолошких и економско-финансијских – начина, динамике и цене спровођења тог дугорочног процеса (која се мора упоредити с ценом непредузимања неопходних мера), до друштвених питања њене прихватљивости и праведности и потребе стицања одговарајућих знања и свести свих заинтересованих страна. Текст који следи има амбицију да се овим питањима позабави, почев од прегледа најновије светске литературе у овој области до анализе могућности и скицирања предлога како би ова транзиција могла да изгледа на примеру Србије, њеног електроенергетског система и највећег енергетског субјекта, Акционарског друштва „Електропривреда Србије” (ЕПС).

Током пола века глобализација је била покретачка снага у развоју светских економија, [1]. Поред позитивних ефеката, глобализација је изазвала и негативне последице: убрзане климатске промене, деградацију природних ресурса и повећане емисије штетних материја. Зато се у последњој деценији значај климатске политике и декарбонизације све више појављује на светској агенди. Поред тога, недавни геополитички догађаји, укључујући пандемију COVID-19, рат у Украјини и друге, додатно наглашавају важност „зелених” решења за опоравак и декарбонизацију економија. Чланак [1] указује на значај политике декарбонизације и идентификује могућност решавања еколошких и енергетских проблема изазваних глобализацијом.

Фосилна горива и даље учествују са око 64% у производњи енергије и са преко 80% у емисијама CO₂ које настају људском активношћу. Око 35 милијарди тона CO₂ годишње потиче од сагоревања фосилних

горива. У [2] се предлажу јединствена практична решења која би обезбедила глатку транзицију током декарбонизације, попут јачања мрежа и јачања интерконекција, затим стварања мањих и ефикаснијих микромрежа, побољшања енергетске ефикасности постојећих електроенергетских инфраструктура, одговарајуће краткорочне, средњорочне и дугорочне политике националних влада о енергији, улагања у технологије обновљивих извора, као што су сунце и ветар, у нуклеарне технологије, набавку система за складиштење енергије и друга улагања у технолошке погоне, уз транспарентност свих процедура због сузбијања корупције.

Глобални енергетски сектор пролази кроз период историјских промена у којима се дешава велика промена у изворима енергије, [3]. Енергетски сектор се помера ка одрживијој, еколошки прихватљивијој производњи и потрошњи свих извора енергије, [4]. Могућности и изазови глобалне енергетске транзиције превазилазе границе, јер се флукуације и недостаци расположиве и потребне енергије могу надокнадити само у регионалним и глобалним размерама, [3]. Напуштање фосилних горива (декарбонизација), као пут ка постизању климатске неутралности, подразумева масовно енергетско реструктурирање и нова улагања. Из глобалне перспективе, приоритет декарбонизације је постепено изbacивање угља из употребе. Оно што несумњиво карактерише 21. век јесу многе пилот и алтернативне технологије које имају велики потенцијал за декарбонизацију (тзв. мењачи игре), ниске цене фосилних горива (јер изостављају екстерне трошкове које намећу здрављу и животној средини), као и неопходност померања како на страни тражње тако и на страни понуде у привреди, како би се више користили обновљиви извори енергије (ОИЕ). Сходно томе, рад [3] анализира и истражује потенцијале три главна покретача реструктурирања енергетских система. То су:

- комбинација сигнала тржишних цена и цена CO₂;
- повећана употреба ОИЕ;
- брза диверсификација снабдевања енергијом коришћењем алтернативних технологија.

Истраживање [3] јесте хронолошки засновано на анализи глобалног енергетског система, при чему се истичу занемарени дебаланси на страни понуде и потражње енергије. Описно су објашњени извори енергије који данас снабдевају земље Европске уније (ЕУ), а анализа обухвата узроке и последице оваквог исхода. Да би се разумели главни покретачи глобалне декарбонизације, треба нагласити да, за разлику од сталних ресурса који су увек доступни, без обзира на облик људске активности усмерене на њих, ОИЕ имају моћ регенерације под условом да интензитет њиховог обнављања није угрожен обимом њихове употребе.

Стога, коришћење ових ресурса може бити временски ограничено упркос њиховој обновљивој природи. Сходно тој чињеници, [3] бави се анализом коришћења алтернативних извора, указујући на потребу диверсификације снабдевања енергијом у краткорочном и дугорочном периоду.

Климатске промене, друштвене и управљачке теме и теме у вези са заштитом животне средине, ESG (*Environment, Social, and Governance*), отварају важне дебате о изазовима у правцу енергетске транзиције, управљања широким спектром заинтересованих страна, као и предностима и могућностима које се одражавају на дугорочне изгледе једне компаније, узимајући у обзир бригу за животну средину, финансијске перформансе једног предузећа, отпорност на поремећаје и способност да одржи своје пословање и континуитет пословања током неповољних ситуација у одговарајућим и ефективним оквирима управљања. Захтевају се значајна улагања у инфраструктуру и технологију, као и сарадња више заинтересованих страна, укључујући владу, индустрију и међународну заједницу. Такође, важни су модели управљања и јасне мапе пута у вези са владиним политикама и подстицајима, како би она била успешна, [4].

У електроенергетици, декарбонизација и замена термоелектрана на угаљ соларним електранама и фармама ветрогенератора захтевају адекватно велике капацитете за складиштење енергије, како би се очувала флексибилност и стабилност рада електроенергетског система (ЕЕС), на које негативно утиче интермитентност производње из ових обновљивих извора. Ово је посебно важно за земље као што је Србија, у којој се готово 70% електричне енергије и даље обезбеђује из угља, и то нискокалоричног лигнита. При томе, у Србији је и даље на снази мораторијум на градњу нуклеарних електрана, па не постоји једнозначно решење другог, још озбиљнијег проблема – недостатка велике количине енергије за покриће базног дела дневног дијаграма оптерећења (потражње).

У сличној ситуацији је, рецимо, и Пољска, у којој се производња електричне енергије такође базира на угљу (додуше на квалитетнијој врсти угља), и која још увек нема нуклеарну електрану, [5]. Суперкондензатори представљају нову генерацију складишта енергије и били би једно од могућих решења за наведене проблеме. У [5] показује се да употреба суперкондензатора представља могућност повећања учешћа соларних електрана и ветроелектрана на енергетском тржишту. Надасве, нема потребе да се све електране на угаљ (које се постепено гасе) замене нуклеарним. У [5] истиче се да

свака даља декарбонизација и повећање удела ОИЕ на пољском енергетском тржишту захтева изградњу и ангажовање објеката великих складишта енергије. Батеријска постројења имају релативно кратак век трајања, а сама њихова производња резултира значајним ефектима емисија гасова стаклене баште (*Green House Gasses, GHG*). И по истеку животног века батерије имају негативан утицај у домену животне средине и трошкова, јер представљају опасан отпад који захтева одговарајући третман. Са друге стране, широка употреба суперкондензатора у новој генерацији складишта енергије открива нове могућности и подстиче напоре за декарбонизацију. На основу годишње анализе производње електричне енергије по сату из ветроелектрана и фотонапонских електрана, у [5] предлаже се формула за израчунавање капацитета складишта електричне енергије, произведене углавном у ОИЕ, који је неопходан за стабилан рад националне електричне мреже.

Угаљ и природни гас доминирали су и енергетским сектором земаља Асоцијација нација југоисточне Азије (АСЕАН) у прошлости и допринели су 77% производњи електричне енергије у 2019, [6]. Да би до 2050. године достигле нулту вредност емисија, земље АСЕАН-а морају да декарбонизирају свој енергетски сектор у наредне три деценије. На путу декарбонизације отвара се кључно питање – одабир одговарајућих нових технологија, чија примена треба да је учини могућом и изводљивом. Рад [6] изводи вежбу технолошког скрининга за десет технологија декарбонизације за енергетски сектор на основу холистичког приступа одрживости, безбедности, приступачности, поузданости, спремности и утицаја технологије. Ова вежба је резултирала рангирањем технологија за одређене земље. Уопштено говорећи, потребно је истовремено коришћење и фосилних и нефосилних технологија, уместо да се чека да одређене технологије сазру. На фосилној страни, прелазак са угља на гас за производњу енергије и имплементација захватања и складиштења угљеника (*Carbon Capture and Storage, CCS*) у термоелектранама на угаљ и гас имају највећи потенцијал за декарбонизацију. Стога је у [6] предложено 11 пројеката CCS-а „првог покретача” са потенцијалом да ублаже до 22% емисије CO₂ повезаних са енергијом у АСЕАН-у. На страни обновљивих извора, хидроенергија има највећи потенцијал. Даље повећање капацитета вероватно ће бити у проточним хидроелектранама. Унутар АСЕАН-а постоји средњи до висок потенцијал за даље коришћење пољопривредних области као извора биомасе за производњу електричне енергије, посебно у Индонезији, Тајланду, Малезији и Филипинима. Фотонапонски (PV) соларни системи имају средњи

потенцијал у земљама АСЕАН-а са великом копненом површином, али је потребно више истраживања и развоја (R&D) у побољшању мреже и технологијама складиштења енергије. Унутар АСЕАН-а енергија ветра пати од ниске просечне брзине ветра, али постоје изузеци. Потребно је више истраживања и развоја у погледу ветротурбина за мале брзине ветра. Геотермални ресурси се налазе само у Индонезији и на Филипинима и недовољно се користе. Даља имплементација ће захтевати повољне владине политике за подстицање приватних инвестиција и рационализацију издавања дозвола, између осталог. Такође се расправља о енергетским политикама које промовишу брзу декарбонизацију енергетског сектора АСЕАН-а, на основу закључака у [6].

Као што је већ поменуто, декарбонизација енергетских система захтева примену варијабилних обновљивих извора енергије (ветар и соларна енергија, В-ОИЕ), и то са све нижим трошковима. Раст броја и инсталисане снаге ових ОИЕ утиче на цене електричне енергије, што може утицати на инвестиције у хидроенергију и на усвајање опција на бази фосилних горива за производњу електричне енергије ради покривање базног оптерећења, [7]. Стога остаје нејасно да ли би, у одсуству добро осмишљене политике, примена више В-ОИЕ заиста смањила нето емисије угљеника у енергетским системима. Студија [7] прво је развила техноекономски модел оптимизације како би се истражили утицаји будућих пројекција В-ОИЕ на дугорочне цене електричне енергије и накнадне инвестиције у хидроенергију, користећи кинеску провинцију Хубеи као студију случаја. Затим су квантификоване емисије угљеника у вези са променом улагања у хидроенергију. Без интервенција, нижа цена електричне енергије могла би до 2050. да доведе до смањења инвестиција у хидроенергију за 42%. Уз повећани удео В-ОИЕ и смањене инвестиције у хидроенергију, очекује се да ће енергетски систем применити више резервних опција за фосилна горива, па аутори [7] тврде да би се емисије CO_2 могле повећати за чак 45%. Стога би коришћење више В-ОИЕ смањило инвестиције у хидроелектране и неочекивано додатно отежало декарбонизацију, што указује на могући парадокс у енергетској транзицији. Тај парадокс захтева нову и робусну политику која ће обезбедити да се користи од декарбонизације остваре без обзира на потенцијалне промене цена електричне енергије.

Стопе експлоатације природних ресурса убрзано расту. Стога размишљање о кружној (циркуларној) економији представља признање да више не можемо бити равнодушни према ограниченим ресурсима којима располажемо на нашој планети. Развијени су нови пословни модели и алати који ће подржати

будућност отпорнију на поремећаје, [8]. Циркуларна економија ће својим регенеративним концептима помоћи у смањењу експлоатације природних ресурса. Декарбонизација се може односити на удаљавање од енергетских система који производе угљен-диоксид (CO_2) и емисије других GHG-а или се може односити на уклањање накупљеног угљеника и наслага угљеника из мотора са унутрашњим сагоревањем. Оба процеса имају исте циљеве уклањања угљеника, али на различите начине. Декарбонизација енергије укључује померање целог енергетског система како би се спречило да емисије угљеника уђу у атмосферу пре него што се уопште испусте, а део тог процеса такође укључује коришћење технологија за захватање угљеника, ради уклањања CO_2 из ваздуха након што је већ испуштен. Ово укључује декарбонизацију енергетских мрежа, декарбонизацију ланаца снабдевања и коришћење секвестрације угљеника у потрази за нето нултим емисијама и глобалном економијом која би била угљенично неутрална. Циркуларна економија ће помоћи да се продужи животни циклус производа, сачувају ресурси који доводе до нултог расипања и потпомогне декарбонизација смањењем угљеничног отиска. Циљеви одрживог развоја подстичу имплементацију циркуларне економије и декарбонизацију, с интегрисаним приступом свих заинтересованих страна у друштву. Чланак [8] проучава како циркуларна економија служи као катализатор декарбонизације.

Преглед глобалних емисија CO_2 током прошлог века показује да су емисије из 80 националних економија допринеле 95% глобално забележеним емисијама, [9]. Међу њима, 55 економија је било „декарбонизаторско“, где су емисије CO_2 или већ пале или опадају, док је 25 економија било загађивачко, код којих су емисије CO_2 и даље биле у порасту. Године 2021. глобалне емисије CO_2 износиле су 37,1 Gt_{ра}, с тим што 56% долази од загађивача и 39% од декарбонизатора. Ако се тренутни трендови наставе, глобалне емисије CO_2 ће до 2050. године достићи 49,6 Gt_{ра}, при чему би 81% долазило од загађивача и 14% од декарбонизатора. Само 14 економија ће достићи нето нулту емисију CO_2 . Циљ декарбонизације за постизање нето нуле израчунава се за сваку економију. Декарбонизатори треба да смање емисије CO_2 за 230 Mt_{ра}, а загађивачи чак за 1365 Mt_{ра} CO_2 , почевши од 2021, како би достигли нето нулти циљ до 2050. Како се декарбонизација буде одлагала, тако ће се овај циљ повећавати сваке године. Анализе показују да је удео ОИЕ у укупној финалној потрошњи енергије у већини економија порастао, у просеку за само 4% у последњој деценији, што је неадекватно постизању нето нуле до 2050. године. Стога се у [9] предлажу путеви за убрзање декарбонизације и разматрају се

њихове импликације на политику. При томе је примењена следећа методологија: у првом кораку се, на основу базе података о глобалним емисијама CO₂, обавља увид у историју, на основу чега се врши поменута класификација на загађиваче, декарбонизаторе и остале; у другом кораку се за прве две категорије прогнозирају емисије CO₂ у будућности; у трећем кораку се утврђују циљеви декарбонизације, за обе категорије, и при томе, узимајући у обзир и претпостављену глобалну потрошњу енергије према бази података о типовима горива, дискутује се о различитим, економско специфичним путевима декарбонизације: са доминацијом угља, са доминацијом гаса и нафте и са доминацијом нефосилних горива. На основу резултата презентованих у [9] бива јасно да ће бити потребна и друга средства декарбонизације, укључујући и фосилна решења са ниским садржајем угљеника, кроз захватање и складиштење угљеника.

Кроз анализу постојеће литературе и политика различитих земаља, у [1] идентификује се потенцијал политика декарбонизације, у циљу ублажавања негативних утицаја глобализације на животну средину и енергетски сектор. Налази [1] сугеришу да усвајање политика декарбонизације може довести до смањења емисије GHG-а, побољшања енергетске ефикасности, развоја ОИЕ и „зелених“ радних места, што на крају доприноси одрживијој и отпорнијој глобалној економији.

У [10] пружају се информације које ће помоћи у усвајању успешних мапа пута за декарбонизацију или пројеката декарбонизације фокусирањем на ланце вредности. Аутори [10], користећи пример из сектора саобраћаја (тј. компанија у поморском сектору), истичу важност разумевања различитих активности и процеса укључених у стварање вредности и њихову међузависност од других делова ланаца вредности у којима послују. Они наглашавају да декарбонизацију треба посматрати као заједнички подухват више испреплетених ланаца вредности. Само с овом широком перспективом могу се доступна средства за декарбонизацију проценити холистички и применити у временском оквиру који друштво све више захтева.

У свеобухватном разматрању начина и исхода декарбонизације потребно је водити рачуна и о социјалном аспектима и правичности транзиције – од питања гашења појединих и отварања нових радних места, што подразумева и преквалификације, до интеракције са тржиштем у разним доменама, делатностима и регионима. Трговина и декарбонизација су две неодвојиве ствари. Истраживање [11] користило је нормативни приступ који се фокусира на правним чињеницама. Резултати

су показали да декарбонизација и трговина и даље захтевају снажну политику земаља Светске трговинске организације (СТО). Реформулисање политике СТО-а која се односи на примену принципа одрживог развоја захтева посебан договор, уз узимање у обзир принципа посебног третмана за земље у развоју. Овај напор је потребан да би се оствариле правда и правна сигурност. Могућности за мултилатералне преговоре су и даље отворене, док се изазовом може сматрати јаз између развијених земаља и земаља у развоју, [11].

У истраживачком раду [12] оцртавају се изгледи за декарбонизацију, предвиђајући напредак у „зеленим“ технологијама, интеграцију принципа циркуларне економије и еволуцију отпорних енергетских система. Утемељено у овим перспективама, предлажу се стратешке препоруке, наглашавајући потребу за оквирима холистичке политике, јавно-приватном сарадњом, подстицањем одрживог финансирања, улагањем у истраживање и развој и прихватањем праведног транзиционог приступа. Ово истраживање доприноси холистичком разумевању сложене интеракције између стратегије, изазова и изгледа потраге за декарбонизацијом у енергетски интензивним индустријама. Анализиране су различите стратегије које се користе у три различита региона – Канада, Сједињене Државе и Африка. Истраживање почиње детаљним испитивањем садашњег окружења стратегија декарбонизације, обухватајући технолошке иновације, политичке и регулаторне оквире и приступе засноване на тржишту. Препреке као што су економска одрживост, изазови за усвајање технологије и друштвено-економски утицаји помно се разматрају заједно са факторима који омогућавају декарбонизацију, као што су вођство владе, технолошке иновације и одрживе финансије. Прикупљени увиди дају нацрт за креаторе политике, лидере индустрије и заинтересоване стране, како да се крећу замршеним путем ка одрживој и отпорној индустријској будућности.

Наиме, очекује се да ће се индустријске емисије такође повећати до 2050. године (у САД за 15%), што сектор индустрије означава као логичну мету за напоре за декарбонизацију, [13]. Пuteви технологије енергетске ефикасности, као што су стратешко управљање енергијом, ефикасност система, паметна производња, ефикасност материјала и комбинована производња топлотне и електричне енергије, који су добро успостављени, одмах би смањили потрошњу енергије и емисије. У [13] распозната су четири стуба индустријске декарбонизације: енергетска ефикасност (као краткорочни), електрификација индустрије и нискокарбонска горива, сировине и енергија (све на

средњи и дужи рок), и захватање, коришћење и складиштење CO_2 (на дужи рок).

Декарбонизација индустријског сектора игра кључну улогу у успешној енергетској транзицији. Ова трансформација је, међутим, веома скупа и сложена, јер ће многи постојећи производни процеси и постројења морати да се делимично или потпуно замене како би се смањиле емисије CO_2 , [14]. При овоме се поставља и питање колико и на који начин ће значајна смањења емисија CO_2 , као резултат декарбонизације, утицати на коришћење ресурса за производњу одређеног производа и на укупну цену одрживости. Чланак [14] разматра однос између смањења CO_2 и ефикасности коришћења ресурса у процесима индустријске производње. У ту сврху, развијена је методологија која холистички процењује пут декарбонизације индустријског сектора. Ова холистичка процена узима у обзир примарне енергенте, сировине и помоћне и конструктивне материјале који се користе за рад и изградњу значајних компоненти постројења и сумира их као укупно коришћење ресурса. У ту сврху, коришћење ресурса је представљено термодинамичким количинама ексергија, која узима у обзир и енергетску и материјалну компоненту одређеног процеса производње. Енергетски и материјални токови у производном процесу балансирају се применом ексергетске анализе. Методологија из [14] користи се за тренутно најсавременије и будуће декарбонизоване производне процесе, у циљу квантификације ефеката процеса декарбонизације. Упоредивањем израчунате ефикасности коришћења ресурса, термодинамички утицај на одрживост путева декарбонизације може бити постављен у односу на количину уштеђеног CO_2 . На примеру производње амонијака (NH_3), анализираном у [14], показује се да декарбонизација производног процеса смањује ефикасност употребљених ресурса за 14% (кад се уместо конвенционалне производње NH_3 реформингом метанске (CH_4) паре примени декарбонизовани начин, производњом синтетског гаса путем електролизе воде и применом јединице за одвајање ваздуха). Пад ефикасности ресурса јавља се углавном због високог нивоа повратне топлоте и енергије у конвенционалном процесу, насупротив чега стоји електрично веома интензивна производња водоника у декарбонизованом процесу производње NH_3 .

Слично претходном, ни употреба CH_4 за хемијску производњу, која се често сматра будућношћу петрохемије, историјски није могла да се економски такмичи са конвенционалним процесима због већих инвестиционих трошкова, [15]. Постизање одрживости и декарбонизације ове индустрије, интеграцијом са процесом претварања CH_4 у хемикалије, може

пружити прилику за омогућавање будућности за овакве технологије. Процеси претварања гаса у хемикалије (тј. генерално, концепт *Power to X*, *P2X*) представљају ефикасан алат за повећање декарбонизационог потенцијала обновљиве енергије. Док је тренутна имплементација технологија захватања угљеника, његовога коришћења и складиштења (*Carbon Capture, Utilization and Storage*, *CCUS*) од великог значаја за индустријску декарбонизацију, веома је пожељан прелазак на „зеленије”, CO_2 -слободне, процесе и коришћење CO_2 из спољних извора за производњу вредне робе. Преглед [15] описује потенцијалне опције за то како би процес „од метана до хемикалија” могао подржати декарбонизацију индустрије.

Још један од радова који је покушао да попуни део празнине у оскудном броју студија о цени декарбонизације је и [16]. Огромна већина студија, чланака и радова који се баве одрживошћу усваја један политички или макроекономски приступ. Друштвени аспекти се ретко дубоко истражују, а питање цене одрживости се у великој мери занемарује. Након покушаја да разјасни концепт одрживости и централну улогу коју игра декарбонизација, [16] испитује питање глобалне цене декарбонизације и анализира неке примере компанија у том погледу. Методологија примењена у тој студији заснована је на подацима извученим из различитих извештаја о одрживости, климатским променама и декарбонизацији, за макроекономску димензију, и из годишњих извештаја (за 2020. годину) проучаваних компанија. Ови подаци се обрађују тако да се израчунају процењени трошкови декарбонизације. Чак и ако се допуштају велике маргине грешке због непотпуних доступних података и параметара који се не могу контролисати или нису познати, налази [16] показују да могуће процене говоре да је цена декарбонизације апсолутно збуњујућа. Она превазилази све што обични грађани, менаџери и, нарочито, политичари могу замислити. То може бити јак разлог због кога је ова тема у великој мери занемарена, јер би сигурно изазвала друштвена превирања широм света.

Када се посматрају обим напора декарбонизације, сектор(и) на који/е се циља, временски оквир за постизање циљева и специфичне технологије и приступи декарбонизацији који се користе, постоје различити фактори који утичу на цену декарбонизације и који би у ствари могли довести у ризик профитабилност традиционалних пословних модела, [17]. Уопштено говорећи, када се узме у обзир проширени обим декарбонизације (који не циља само на производни погон већ и на употребу производа), то може укључити значајне трошкове унапред за прелазак са извора енергије заснованих на фосилним горивима

на чистије алтернативе, као што су ОИЕ или нуклеарна енергија. У [17] трошкови декарбонизације се односе на цену трансформације. Чак и ако се трошкови недекарбонизације и суочавања са утицајима климатских промена не могу у потпуности проценити, како у економском тако и у људском смислу, улагање у трансформацију подразумева значајна улагања унапред. Посматрајући сличне иницијативе за трансформацију, [17] пружа оквир о томе шта треба узети у обзир приликом трансформације и које групе трошкова с утицајем на профитабилност треба узети у обзир, укључујући владине субвенције, пореске олакшице и политике цена угљеника (таксе). Оне могу помоћи да се смање трошкови декарбонизације и обезбеде једнаки услови за технологије са ниским садржајем угљеника како би се оне такмичиле са фосилним горивима.

Чланак [18] истражује да ли је економска одрживост кључ за постизање дубоке декарбонизације и нето нулте емисије. Тестирана је хипотеза да је популарна подршка политици декарбонизације условљена веровањем већине људи да ће се њихово економско благостање побољшати, или да барем неће патити услед спровођења ових политика. Док је раст БДП-а типична метрика за економско здравље, као кориснији социоекономски индикатор за процену политичке одрживости климатских политика може бити поменуто отварање нових радних места. Конкретно, чланак [18] даје увид у постојеће доказе о томе да ли су климатске политике дугорочно успешније у постизању дубоке декарбонизације уколико креатори који осмишљавају и спроводе климатске политике, осим смањења емисија GHG-а, подразумевају и отварање нових радних места. Наиме, до данас су се креатори климатске политике често фокусирали на смањење емисија као примарни или чак искључиви критеријум. Док су емпиријски докази и даље слаби, откривамо да отварање нових радних места у нискоугљеничним индустријама води ка већој политичкој подршци за климатске политике које доприносе декарбонизацији. Ипак, фактори запошљавања нису увек најистакнутији фактор код доносилаца одлука.

Рад [19] на свеобухватан начин разматра међусобне везе између климатских промена, декарбонизације и „зелених” финансија. Хитност решавања климатских промена и њихових катастрофалних последица треба да се фокусира на „зелене” финансије као витално оруђе у глобалној борби против штете по животну средину. „Зелене” финансије укључују обезбеђење инвестиција, зајмова или капитала за подршку еколошки прихватљивим активностима, олакшавајући прелазак на одрживију будућност. Преглед [19]

истражује теоријски референтни оквир за „зелене” финансије, укључујући и њихове утицаје на климатске промене, декарбонизацију економије, имовину у вези са угљеником, управљање ризиком, обновљиву енергију и одрживи економски раст. Поред тога, истражује регионалне фокусе у Азији, као што је значај „зелених” финансија у Кини и уверења и изазове „зелених” финансија у Бангладешу. Тај преглед такође говори о будућим упутствима и препорукама за унапређење „зелених” финансија. Преглед испитује актуелно истраживање „зелених” финансија и како се може позабавити изазовима животне средине и промовисати одрживи развој. Више истраживања треба да се спроведе у главним економским и финансијским часописима како би се премостио јаз у знању и подстакао шири научни ангажман у „зеленим” финансијама. Истраживачи, креатори политике, инвеститори и заинтересоване стране добиће помоћ из поузданих и чврстих увида студије у борбу против климатских промена и промовисање одрживог развоја, [19].

За успешну декарбонизацију и енергетску транзицију кључно је перманентно унапређивати знање у тој свеобухватној и комплексној области, која подразумева окретање новим технологијама и иновативним техничким решењима, диверсификацију примарних енергената и извора енергије, примену концепата циркуларне економије и одрживости, уз обезбеђивање поменутих „зелених” финансија, неопходних за њихову имплементацију. Не мање значајан је и социјални аспект и едукација у циљу подизања свести – од неопходности заштите животне средине преко повећања енергетске ефикасности до повећања нивоа спремности свих заинтересованих страна да прихвате примену савремених концепата и техничко-технолошких решења, као и свеобухватне промене које ће то донети.

Наиме, паметни производни системи омогућавају истовремено адресирање продуктивности, одрживости и друштвених побољшања, [20]. Имплементација таквих система у индустријама представља обећавајући начин за испуњавање захтева заинтересованих страна у вези са декарбонизацијом њихових производних активности. Чланак [20], на примеру аутомобилске индустрије, нуди нови концепт организације са односима између актера декарбонизације (енергетски менаџери и консултанци), подржан техничким дизајном алата за управљање ИТ знањем. Управљање знањем у компанијама може бити реализовано приступом заснованим на људству (међусобним односима и оквиру за управљање знањем) и на ИТ (екстракцијом знања рударењем података или обрадом података о

технологијама и коришћењем система управљања знањем – моделовањем знања и система заснованих на знању). Приликом моделовања, кључно је поставити следећа питања:

- Где се енергија троши?
- Зашто се енергија троши?
- На који начин се енергија троши?
- Које су последице трошења енергије?

Зависно од одговора на ова питања, формира се спецификација циљева и дефинишу еколошки и економски приоритети. На основу њих се могу креирати потребне мере за декарбонизацију. Приликом моделовања решења треба дати одговоре на следећа питања:

- Ко креира решење (екстерни добављач или интерно)?
- Ко верификује истраживање (успоставља везу са контекстом)?
- На који начин решење функционише (врста решења, подршка, технологија и пракса, принципи рада)?
- Које су перформансе решења (еколошки и финансијски кључни показатељи перформанси, на основу којих се рангирају сва могућа решења, по приоритетима и изабира оно најбоље)?

На основу овако конципираног оквира за креирање решења, [20], одређују се карактеристике производног погона и моделовање података релевантних за спровођење мера декарбонизације у јединствени концепт, уз омогућавање преносивости таквог решења са једног производног капацитета на други.

На крају, али не и најмање значајно, осим развоја знања у области, неопходно је поради и на подизању свести, како заинтересованих страна тако и шире заједнице. У том циљу се спроводе и одговарајућа истраживања. Рецимо, у [21] анализира се став представника тзв. генерације 3 („зед“) из Румуније у погледу побољшања енергетске ефикасности и декарбонизације коришћењем модерних интегрисаних технологија, као што су топлотне пумпе, складиштење топлотне енергије и паметно управљање системом. Користе се улазни подаци из анкете засноване на упитницима, спроведене између марта и јуна 2023. године, са 389 валидних одговора за следеће сврхе:

- анализирати став младих испитаника према коришћењу одрживих савремених интегрисаних технологија, као што су топлотне пумпе, у циљу повећања енергетске ефикасности и смањења угљеничног отиска;
- идентификовати факторе који могу утицати на њихов став према овим технологијама;
- разумети начине на који настали фактори могу утицати на однос према коришћењу топлотних пумпи, имплицитно водећи ка побољшању

енергетске ефикасности и декарбонизацији у Румунији;

- формулисати политику и препоруке за побољшање енергетске ефикасности и подстицање декарбонизације у Румунији.

Студија [21] користи различите дескриптивне статистике, факторску анализу и вишеструку регресију. Резултати показују да постоји шест категорија фактора који утичу на став представника генерације 3, са „покретачима за побољшање енергетске ефикасности“ заједно са „традиционалним мерама за побољшање енергетске ефикасности“, који имају највећи утицај на покретање позитивног става према енергетској ефикасности, унапређењу и декарбонизацији. Главна препорука политике изведена из ове студије односи се на развој политика и стратегија које подстичу грађане не само да имају позитиван став ка енергетској ефикасности и декарбонизацији кроз коришћење топлотних пумпи него и према покретачима конкретних акција за уградњу технологије топлотне пумпе. Још једна препорука тиче се даљег развоја и проширења националних и локалних програма за изолацију спољашње површине зграда и замену прозора и спољних врата која немају термоизолацију. Трећа главна препорука односи се на кампање за подизање свести међу становништвом о савременим мерама за побољшање енергетске ефикасности, као што су топлотне пумпе.

У вези са поменути, неопходним повећањем енергетске ефикасности у зградарству, ваља напоменути да је урбано окружење одговорно за приближно 40% светске потрошње енергије, 30% употребе сировина, 25% чврстог отпада, 25% коришћења воде, 12% коришћења земљишта и 33% емисије гасова стаклене баште, [22]. Стога, унапређење стања животне средине и декарбонизација постају све критичнији циљеви и за грађевинску индустрију. Одржива градња се може постићи кроз неколико пракси, укључујући: разматрање процене животног циклуса, кружну (циркуларну) изградњу, ефикасност ресурса и управљање отпадом и обезбеђивање еко-ефикасних материјала, смањење потражње за енергијом и потрошње и укључивање ОИЕ и технологија са ниским садржајем угљеника. Да би се постигли циљеви циркуларне градње, од кључне је важности едуковати будућу радну снагу о декарбонизацији, циркуларној изградњи и како да се превазиђу изазови повезани са преласком на одрживу градњу. За студију [22] анкетирано је 120 студената основних и постдипломских студија да би се сагледао и разумео јаз у студентском знању у вези са декарбонизацијом и кружном изградњом. Истакнута је важност укључивања ових тема у наставне планове и

програме, као и у програме управљања изградњом. Резултати [22] наглашавају празнине у знању ученика које се односе на одрживе праксе и важност обезбеђивања будуће радне снаге у грађевинарству са таквим знањем, како би се ухватили укоштац са глобалним, неизбежним изазовима. Налази [22] доприносе одрживом обухвату знања тако што се залажу за реформисани наставни план и програм, за припрему будуће радне снаге за усвајање мање карбонизованих, више циркуларних приступа у инжењерингу и индустрији.

Полазећи од овде апострофираних питања и увида у искуства и трендове описане у литератури из области декарбонизације, у поглављу 2 овог рада илустрован је могући начин конципирања декарбонизованог ЕЕС на примеру Србије. У потпоглављу 2.1 најпре су анализирани постојећи и планирани капацитети В-ОИЕ и иззови које доноси већи обим њихове интеграције у ЕЕС. Поглавље 2.2 разматра могућности конверзије и складиштења енергије (као решења за поменуте проблеме), а потпоглавље 2.3 могућности коришћења преосталог хидропотенцијала речних сликова у Србији. Потпоглавље 2.4 сагледава могућности увођења нових технологија у производни портфел ЕПС-а, а потпоглавље 2.5 предлаже начин разматрања њиховог увођења. На крају, у поглављу 3, наведени су кратки закључци.

2. КОНЦИПИРАЊЕ ДЕКАРБОНИЗОВАНОГ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКОГ СИСТЕМА

Модерни ЕЕС треба да се заснива на коришћењу савремених и иновативних технологија и приступа. Они представљају темељ на који ће се ослањати потпорни стубови једног будућег, декарбонизованог, ефикасног, одрживог и очувању животне средине погодан ЕЕС-а (илустрованог на Слици 1), [23]. Такав систем ће се ослањати на:

- коришћење ОИЕ, укључујући и оне дисперговане (*Dispersed Energy Resources*, DER), тј. дистрибуирану производњу (*Distributed Generation*, DG) и микромреже;
- складиштење енергије, и то у различитим видовима, објектима и уређајима:
 - вода;
 - кондензаторске батерије;
 - топлота у топлотним акумулаторима;
 - производња и складиштење водоника, односно амонијака и био-гаса;
- паметне мреже (*Smart Grids*) и паметно мерење (*Smart Metering*);
- унапређење енергетске ефикасности, како на страни производње (укључујући когенерацију електричне и топлотне енергије и водене/технолошке паре) тако и на страни потрошње (коришћењем енергетски ефикаснијих уређаја и апарата, изоловањем зграда, заменом столарије, постојеће расвете штедним сијалицама);

- учешће потрошње (одзив потрошње – *Demand Response* (DR), управљање оптерећењем/потрошњом – *Demand Side Management* (DSM), микромреже и други концепти);
- отворено тржиште и флексибилне тарифе (како би се подстакло коришћење електричне енергије у периодима и на начин како је то оптимално за ЕЕС);
- одговарајући и праведан регулаторни оквир (који је неопходан како би се обезбедили услови за отворено тржиште, недискриминаторне односе и примену флексибилних тарифа).



Слика 1. Основа и потпорни стубови будућег декарбонизованог ЕЕС-а /извор: [23]/

При овој ваља нагласити да се мора водити рачуна о усаглашеном и равномерном развоју свих ових потпорних стубова. Наиме, развој и коришћење неког од њих, који би био несразмеран његовом стварном значају и без одговарајуће подршке или равнотеже других, наведених компоненти система, довео би до његове структуралне и функционалне нестабилности, а могуће и до урушавања и колапса, [23].

2.1 Капацитети В-ОИЕ и нови иззови које доносе

Ни током 2023. у Србији још увек није усвојена нова, ажурна Стратегија развоја енергетике, а зарад приближавања Европској унији (ЕУ) и под спољашњим притисцима прихватају се политички наметнути стратешки циљеви у домену смањења емисија CO₂ и GHG-а. Често се паралелно и неусаглашено, са различитим страним консултантима, ради на изради нацрта појединачних стратешких докумената (попут *Integrated National Energy and Climate Plan* (INECP) и *National Determined Contribution* (NDC)), а што би требало да уследи тек након усвајања националне Стратегије. У таквој ситуацији је, у пролеће 2022, у ЕПС-у закључено да се не може више чекати на њено доношење. Због тога су у јуну 2022. експерти ЕПС-а израдили, а тадашње највише руководство компаније усвојило, интерни документ ЕПС-а о визији његове постепене декарбонизације и стратешког развоја – „Зелени пут” (*Go Green Road*).

„Зелени пут” ЕПС-а подразумева гашење најстаријих термоблокова и целих термоелектрана (ТЕ) на лигнит, како оних за које је држава већ преузела ту обавезу по систему *Opt-Out* (ТЕ „Морава” и ТЕ „Колубара” до краја 2023. или зимске сезоне 2023/24), тако и ТЕНТ А1 и А2 и оба блока ТЕ-КО А, до 2035. године, уз смањење ангажовања преосталих термоблокова. Током тог периода и надаље планира се реализација већег броја електрана на варијабилне обновљиве изворе енергије (В-ОИЕ), дакле – соларних

фотонапонских електрана (СЕ) и ветропаркова / ветроелектрана (ВЕ). На Слици 2 дати су просторни распоред и инсталисане снаге СЕ и ВЕ чију изградњу ЕПС планира или већ реализује. Осим њих, на истој слици су приказани и укупни збирови инсталисаних снага постојећих и будућих СЕ и ВЕ чији су власници или инвеститори други енергетски субјекти, углавном приватне компаније, са стањем какво је било забележено у јуну 2023. године.

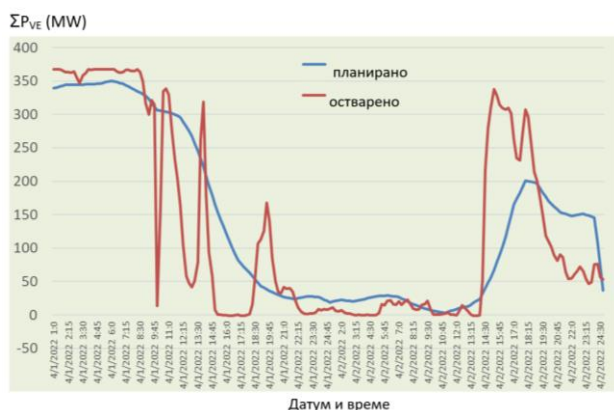
Потенцијалне СЕ на објектима /локацијама ЕПС:

1. ТЕ Морава - Свилајнац, 45 MW
2. ТЕ Колубара А – Велики Црљени, 71 MW
3. Колубара Б, 54 MW + 1,833 MW на крововима
4. ТЕНТ А, 100 MW + 0,94 MW на крововима
5. ТЕНТ Б – касета 2, 133 MW + 1 MW на крововима
6. Петка, 9,75 MW (у изградњи)
7. Средње костолачко острво, 97 MW
8. Кленовик, 250 MW
9. ПК Тамнава исток – спољ. одлаг., 13 MW
10. ПК Тамнава запад – ун. одлаг., 50 MW
11. РБ Колубара – остале потенцијалне локације
12. ПК Дрмно – остале потенцијалне локације



Слика 2. Локације и инсталисане снаге В-ОИЕ капацитета (ЕПС и сумарне снаге за приватне)

Већ и са капацитетима В-ОИЕ постојећим у Србији у пролеће 2022. године, забележени су нагли скокови (*rump-ups*) и падови (*rump-downs*) сума излазних снага из ових електрана и велике разлике у дан унапред планираним и оствареним њиховим вредностима, а тиме и у производњи електричне енергије. На Слици 3 дат је реални, упоредни дијаграм сума ових снага, ΣP_{VE} , забележен током 1. и 2. априла 2022. године.



Слика 3. Разлика у планираној (за дан унапред) и оствареној укупној снази ВЕ у Србији – реалан случај

Јасно је да ће даљим, очекиваним и знатним, повећањем удела В-ОИЕ у укупним производним капацитетима ЕЕС-а Србије и производњи електричне енергије из њих проблем балансирања у реалном времену, али и балансирања на сезонском нивоу, бити све израженији.

Осим тога, ЕЕС у коме ће с временом расти удео В-ОИЕ суочиће се са дефицитом обртне резерве и инерције, те проблемима регулације напона и фреквенције. Једно од могућих решења је задржавање појединих генераторских јединица (оних у бољем стању) термоелектрана (ТЕ) на лигнит предвиђених за излазак из погона, као синхроних компензатора, [24], уз одговарајуће прераде система побуде и друге неопходне радове на прилагођавању ових јединица новој сврси. Оне би ЕПС-у служиле за пружање помоћних услуга оператеру преносног система (ОПС) и тако наставиле да буду извор прихода. С тим у вези, међутим, студија [25], рађена својевремено за ЕПС, показала је да тренутно вредновање помоћних услуга у Србији није довољно за техноекономску оправданост инвестирања у овакво техничко решење наведеног проблема.

Такође, ветрогенератори и фотонапонске електране прикључују се на мрежу преко инвертора, дакле склопова енергетске електронике, који представљају извор виших хармоника. Све већи удео ових В-ОИЕ ће, дакле, представљати и све јачи узрок задржања синусоидалног облика струје и напона у мрежи. Стога ће и по овом основу квалитет испоручене електричне енергије бити све угроженији.

Када је реч о DER-у, тј. DG-у, у електродистрибутивној мрежи се могу јавити обрнути токови снага (од ниженапонске према вишенапонској мрежи, уместо уобичајеног), у режимима рада у којима на појединим подручјима производња (рецимо из фотонапонских панела по крововима зграда) премашује потрошњу. Овај проблем може изискивати преподешавање релеја у систему релејне заштите, тј.

његову прераду, имајући у виду да кварови у мрежи сада могу бити напојени са друге стране, што усмерена заштита у средњенапонским ћелијама напојних трансформаторских станица (ТС) не би могла да региструје и да одреагује.

Неспорно је да је неопходан квалитативни померај према коришћењу ОИЕ. Очигледно је, међутим, да се екстензивним повећањем удела В-ОИЕ, какви су они базирани на коришћењу нагло променљивих и стога неуправљивих, енергија ветра и сунца, појављују нови изазови и проблеми. Превасходно, са повећаном интермитентношћу производње, смањују се способност ЕЕС-а за балансирање производње и потрошње, флексибилност и стабилност његовог рада. Могућа решења овога проблема су:

- изградња великог/их складишта енергије;
- изградња брзореагујућих производних капацитета (какве су, нпр., гасне електране; оне су, међутим, изгубиле статус перспективне опције у стратешким разматрањима, јер је гас постао скуп, а снабдевање њиме неизвесно).

2.2 Могућности конверзије и складиштења енергије у савременом ЕЕС-у

За класичан ЕЕС типичан вид складиштења енергије је коришћење потенцијалне енергије воде. Вода се пумпа и складишти у горњим акумулацијама хидроелектрана (ХЕ), реверзибилних ХЕ (РХЕ) и пумпно-акумулационих постројења (ПАП), и то у периодима дана и сезонама са нижом ценом електричне енергије, тј. када постоје њени вишкови у националном ЕЕС-у или интерконекцији већег броја ЕЕС-ова. Доцније се ова вода користи за производњу електричне енергије, у периодима њених мањкова, када је она најскупља.

Батеријска постројења се користе за директно складиштење електричне енергије и у новије време се форсирају као доминантни вид складиштења у ЕЕС-у са великим упливом производње из В-ОИЕ, као што су ветрогенератори и фотонапонске СЕ. Масовно коришћење батерија, међутим, отвара низ нових питања и проблема који могу имати негативан утицај на животну средину – од масовног рударења, дискутабилним технологијама, литијума и других елемената неопходних за производњу батерија преко проблематике противпожарне заштите и релевантне регулативе која није уподобљена овој технологији до проблематике њиховог релативно кратког животног века, након чијег истека батерије постају опасан отпад и захтевају одговарајући третман и ангажовање сертификованог оператера, стварајући озбиљне трошкове и после периода њихове експлоатације.

Као алтернативни, све више се појављују системи за складиштење отпадне топлоте, па чак и топлотне енергије настале конверзијом вишкова електричне енергије, која би у класичном ЕЕС-у (без В-ОИЕ) представљала својеврсну јерес. Сада је, међутим, технички и технолошки већ доступно и у примени складиштење топлотне енергије у великим подземним, посебно изолованим, термалним складиштима или у специјалним конструкцијама на бази композитних

материјала (нпр. Al-C или Si-C) који се загревају вишковима електричне енергије, а у периодима њених мањкова и виших цена акумулирана топлота се користи за добијање водене паре ради производње електричне енергије у постојећим термокапацитетима.

Једну од кључних улога у декарбонизацији одиграће производња водоника (електролизом воде, уз утрошак вишкова електричне енергије у ЕЕС-у или из оближњих В-ОИЕ) и његово компримовање, складиштење и доцније коришћење. Једна од употреба H₂ јесте и његово сагоревање у горивим ћелијама, у циљу производње електричне енергије, нарочито погодно у периодима њених виших цена на тржишту. Иако није реч о сасвим новој технологији, још увек није комерцијализовано коришћење тзв. регенеративних горивних ћелија, у којима се могу одвијати оба процеса (и електролиза и сагоревање водоника).

Вишкови електричне енергије из В-ОИЕ могу се користити и за обраду биомасе (нпр. жетвених остатака и сл.) и производњу и складиштење био-гаса, који се потом може користити за производњу електричне и топлотне енергије.

Осим складиштења у циљу доцније, поновне производње електричне енергије, вишкови електричне енергије у ЕЕС-у могу се искористити за њену конверзију у друге облике енергије и енергенте који се неће користити у самом ЕЕС-у. Тако поред поменуте конверзије у топлотну енергију, њеног складиштења и могућег коришћења у системима даљинског грејања, могућа је примена концепта P2X, у коме се вишкови електричне енергије, осим за, такође поменуто, производњу водоника или био-гаса, могу користити за добијање различитих врста горива, нпр. амонијака (NH₃) (зелени амонијак се производи технолошким Хабер–Бошовим поступком у коме се зелени водоник сједињује са азотом), метана (CH₄) или других биогорива намењених за сагоревање у возилима и осталим транспортним средствима.

На Слици 4 приказане су различите опције конверзије, складиштења и доцнијег коришћења вишкова енергије, како у самом ЕЕС-у, за поновну производњу електричне енергије, тако и изван њега – топлотне енергије за системе даљинског грејања, производњу зеленог и плавог водоника, метанола и других органских горива.

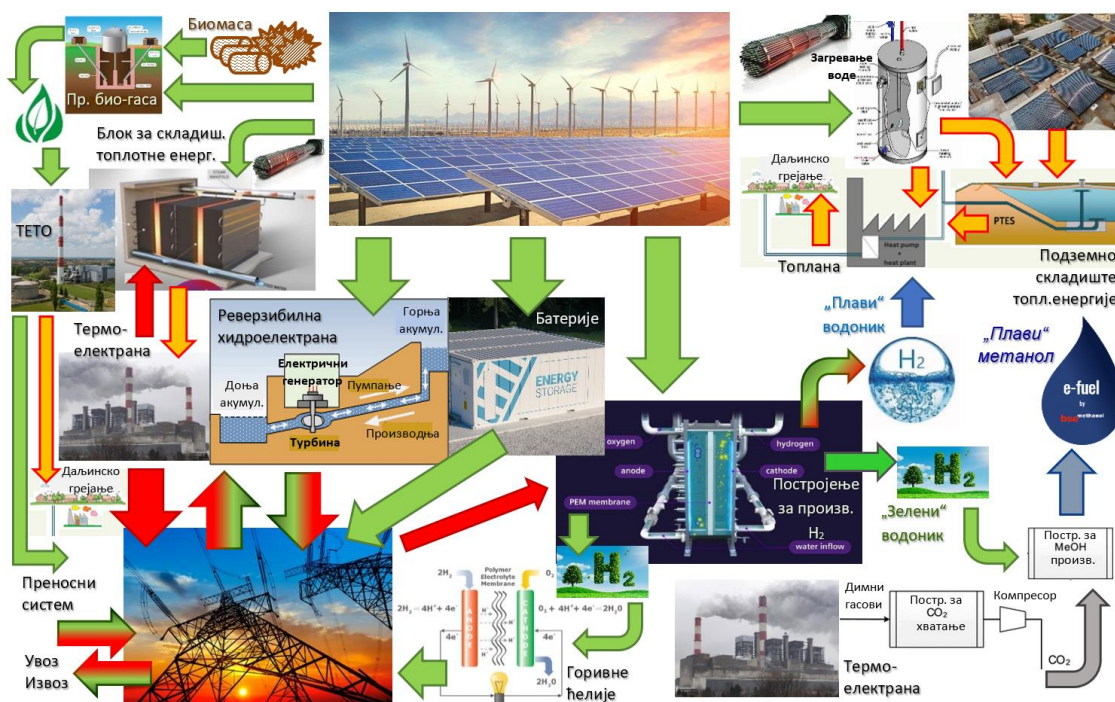
Применом једног оваквог холистичког приступа и концепта диверсификације примарних енергената и увођења нових технологија, значајно би се увећала флексибилност и способност енергетског система, па и ЕЕС-а као његовог интегралног дела, за балансирање све већих и бржих (стрмијих) промена које уносе В-ОИЕ и за сезонско изравнавање (балансирање) разлика у производњи електричне енергије. Осим тога, максималним, па и вишенаменим и виšekратним, коришћењем ресурса којима сама Србија располаже (вода, ветар, сунце, биомаса), и то на начин приказан на Слици 4 – међусобно повезани, са високим степеном рекуперативности – значајно би се допринело очувању и унапређењу сигурности рада ЕЕС-а и енергетској независности земље. Концепт са Слике 4 подразумева и повећање енергетске ефикасности (нпр. већим

коришћењем отпадне топлоте из ТЕ у системима даљинског грејања) и смањење загађења животне средине (нпр. приказаним увођењем технологија и постројења за захватање CO₂ ради његовог складиштења и коришћења у процесима добијања органских биогорива). Такође, Слика 4 илуструје и неке од начина на које би се, у прелазном периоду до 2050. и њиховог коначног гашења, преостале ТЕ на лигнит могле „озеленети” (нпр. коришћењем дела водене паре који би могао бити добијен из вишкова електричне енергије из В-ОИЕ конвертованих у топлотну енергију и ускладиштену у блок од композитних материјала, који уједно представља и генератор водене паре). Слично важи и за

термоелектране-топлане (ТЕ-ТО) на мазут и гас; био-гас добијен из биомасе и вишкова електричне енергије, уколико је у довољној мери пречишћен, може супституисати природни гас и бити употребљен у постојећим гасним турбинама ових постројења.

На Слици 4 зелене стрелице означавају токове и конверзије обновљивих ресурса и „чисте” електричне енергије, црвене стрелице електричну или топлотну енергију добијену из необновљивих, фосилних енергената, а наранџасте стрелице топлотну енергију која потиче из ОИЕ.

У наставку текста ће неки од поменутих и на Слици 4 приказаних ресурса и технологија бити нешто детаљније приказани.



Слика 4. Опције конверзије, складиштења и доцнијег коришћења вишкова енергије у ЕЕС-у и изван њега

2.3 Могућности коришћења преосталог хидропотенцијала сликова у Србији

2.3.1 Пројекти нових ХЕ и РХЕ. Оба услова за успешно балансирање интермитентне производње из В-ОИЕ (наведена на крају потпоглавља 2.1) испуњавају РХЕ. У ЕПС-у је у току друга фаза развоја инвестиционо-техничке документације и пројекта РХЕ „Бистрица”, планиране снаге 656 MW. Требало би да њена изградња буде завршена до 2031. године. Одабрано је техничко решење са четири јединице снаге по 164 MW, са Френсисовим турбинама и агрегатима са могућношћу променљиве (подесиве) брзине обртања у оба режима (и пумпном и генераторском), [26]. Ова, као и могућа РХЕ „Ђердап 3”, снаге до 2400 MW, добиле су статус пројекта од посебног, тј. националног значаја за Републику Србију.

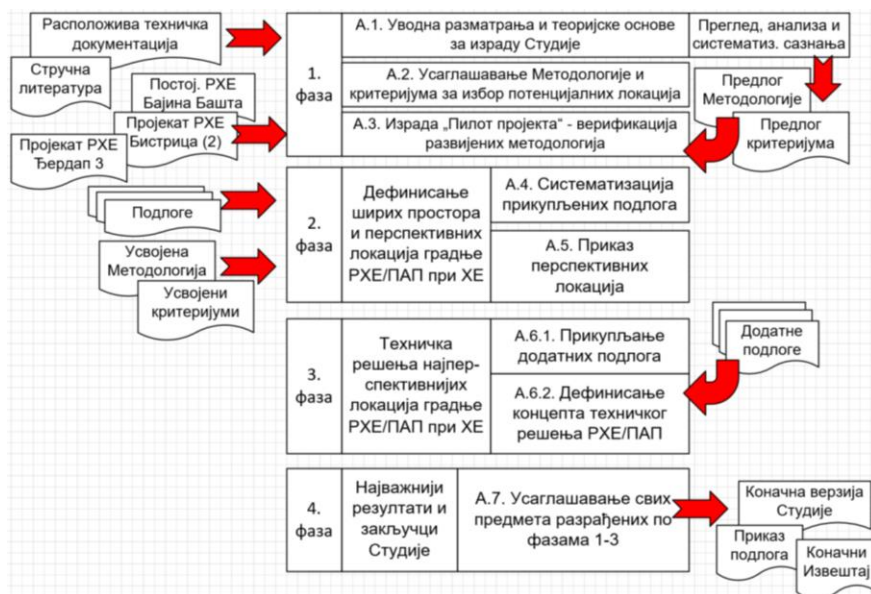
Стручна литература, [27] и [28], као најбољу, win-win опцију сугерише хибридне системе В-ОИЕ и РХЕ, на заједничкој или просторно блиским локацијама. У таквим случајевима вишкови електричне енергије из

оближњих В-ОИЕ капацитета користе се у РХЕ током њиховог пумпног режима рада за транспорт и складиштење воде у њиховим горњим акумулацијама. На овај начин се смањују губици у електричној мрежи и доприноси оптимизацији рада ЕЕС-а. Крајњи циљ управо и јесте ова оптимизација и смањење вршних снага у систему, јер то значи да је у њему онда потребно мање производних капацитета, а тиме и мање финансијских средстава за инвестирање.

Осим развоја пројекта две наведене будуће РХЕ, у ЕПС-у је у току и израда студије [29] којом се истражују могућности и других потенцијалних локација за изградњу нових РХЕ и ПАП при постојећим и планираним ХЕ. На Слици 5 илустровани су садржај и дијаграм тока израде ове студије. Крајем 2023. године окончана је друга фаза њене израде. Применом критеријума и методологије који су утврђени у првој фази (завршеној јуна 2023), извршена је елиминација свих неодговарајућих подручја на територији целе Републике Србије (укључујући и КиМ), односно дефинисана су шира подручја која су погодна и распознат сет

потенцијалних локација за градњу нових РХЕ или ПАП уз ХЕ. Такође је, ради тестирања усвојене методологије, извршено вредновање и рангирање појединих локација. Студијом неће бити обухваћене (осим као референтне, поређења ради) постојећа РХЕ „Бајина Башта” и већ одраније препознате локације РХЕ „Бистрица” и РХЕ „Ђердап 3”, чији се пројекти већ налазе у одређеним фазама развоја.

Што се тиче класичних ХЕ, планира се изградња система ХЕ на Горњој Дрини и поновни развој пројеката система „Моравских ХЕ” и „Ибарских ХЕ”. Преглед процењених вредности инсталисаних снага и годишње производње свих ХЕ у ова три система дат је у Табели I. За све ХЕ планирана је изградња бетонских брана, гравитационог типа, а производна постројења била би опремљена Каплановим турбинама.



Слика 5. Алгоритам израде Студије [29] – истраживања могућности потенцијалних локација за РХЕ и ПАП

Табела I. Процењене инсталисане снаге и годишње производње електричне енергије у потенцијалним ХЕ

ХЕ / систем ХЕ	Инсталисана снага (MW)	Годишња производња (GWh)
Бук Бијела	93,5÷114,5	332,3÷354,3
Фоча	44,2÷53,6	175,9÷185,0
Паунци	43,2	166,7
Горња Дрина - укупно	180,9÷211,3	674,9÷706,0
Љубичево	29,7	133
Мијатовац	29,2	125,5
Свилајнац	28,8	128
Трновче	29,3	128,1
Варварин	28,9	122,9
Моравске ХЕ - укупно	145,9	637,5
Бела глава	14,29	54,76
Бојанићи	10,25	36,11
Церје	13,24	50,16
Добре стране	14,46	55,59
Главица	9,74	37,22
Гокачница	10,82	37,95
Градина	11,18	42,00
Лакат	13,54	54,64
Маглић	13,45	51,89
Ушће	9,87	35,37
Ибарске ХЕ - укупно	120,84	455,70
Укупно нове ХЕ	447,64÷478,04	1.768,1÷1.799,2

ЕПС је формирао заједничко предузеће са „Електропривредом Републике Српске” у циљу реализације пројекта система ХЕ на Горњој Дрини, којим је предвиђена изградња три ХЕ: „Бук Бијела” (у току), „Фоча” и „Паунци”, у региону града Фоче у Босни и Херцеговини, тј. Републици Српској. Студија изводљивости и Идејно решење урађени су 2012/13. Потписани су концесиони уговори за све три ХЕ. Током 2020. и 2021. године рађене су техноекономске анализе. Накнадно је урађена и додатна анализа изводљивости. Током 2023. спроведен је тендер за извођача радова на изградњи ХЕ „Бук Бијела”.

Пројекат „Моравских ХЕ” треба поново размотрити и евентуално развити. Планира се изградња пет проточних ХЕ у каскади. Досад су урађене прединвестициона Студија могућег коришћења хидропотенцијала Велике Мораве, Прелиминарна студија изводљивости са Генералним пројектом система ХЕ, извршена су геодетска истраживања реке Велике Мораве, а спроведена су и батиметријска истраживања њеног корита.

Пројекат „Ибарских ХЕ” такође треба поново размотрити и евентуално развити. Планира се изградња до десет проточних ХЕ у каскади, мањих појединачних инсталисаних снага. Досад су урађени Генерални пројекат са Претходном студијом изводљивости, који су ревидирани и усвојени од стране Републичке ревизионе комисије. Урађен је потом, за сваку ХЕ појединачно: Идејни пројекат са

Студијом изводљивости; Просторни план подручја посебне намене (ПППН) са директном имплементацијом, који је усвојила Влада РС; припремљен је Главни пројекат који обухвата измештање пута, у две секције (за ХЕ „Добре стране” и ХЕ „Бела глава”), укључујући и циљана истраживања. Осим тога, урађена је и процена утицаја на животну средину и друштво (*Environmental and Social Impact Assessment*, ЕSIA) према стандардима ЕУ, за потребе потенцијалних кредитора.

Да би се, међутим, стекла реалистична слика о могућностима и оправданости реализације ових али и других могућих хидроенергетских објеката, неопходно је стручно и непристрасно сагледати могућности коришћења преосталог хидрокапацитета, тј. водних ресурса у Србији. С тим у вези, први и основни корак представља мерење протицаја на сликовима река.

Једну студију о овој теми недавно је реализовао Грађевински факултет Универзитета у Београду, [30].

2.3.2 Ревитализације постојећих (Р)ХЕ. Хидро-енергетски објекти ЕПС-а такође су стари по више деценија и опрема у већини њих је (била) досегла крај свог животног века. Повољна околност је што кључни грађевински објекти ХЕ, попут бране за формирање њене акумулације, имају далеко дужи животи век од машинске и електро опреме уграђених у њу, тако да се њиховом заменом новом опремом практично може вишеструко продужити животи век ХЕ као целине. Због тога је, током последње деценије и нешто дуже, предузет низ ревитализација постојећих ХЕ и планирају се и развијају пројекти ревитализације других ХЕ и РХЕ „Бајина Башта”.

Табела II. Године изградње ХЕ, њихов експлоатациони циклус и ревитализације /извор: [31]/

Р.бр.	Назив	Година изградње	Година експлоатације [год.]						
			10	20	30	40	50	60	70
1	Ђердап 1	1972							
2	Ђердап 2	1987							
3	Власинске ХЕ	1954/1975							
4	Лисина	1975							
5	Пирот	1990							
6	Бајина Башта	1968							
7	Зворник	1958							
8	Бистрица	1960							
9	Потпећ	1970							
10	Увац	1979							
11	Кокин Брод	1962							
12	Електроморава	1954							
13	РХЕ Бајина Башта	1982							

— Експлоатација у стандардном експл. циклусу
— Експлоатација ван предвиђеног циклуса

— Период ревитализације

Ове ревитализације најчешће подразумевају и повећање инсталисаних снага ХЕ и годишње производње из њих. У Табели II, [31], приказане су године изградње класичних ХЕ у власништву и управљању ЕПС-а, илустровано колико дуго су (биле) експлоатисане дуж од планираног животног века и које од њих су већ ревитализоване или је ревитализација у њима тренутно у току.

Завршене су ревитализације система ХЕ „Електроморава” (ХЕ „Овчар Бања” и ХЕ „Међувршје”), ХЕ „Бајина Башта”, ХЕ „Зворник” и ХЕ „Ђердап 1”. Ревитализацијом система ХЕ „Електроморава” (2008–2010) и уградњом четвртог агрегата (од 600 kW) у ХЕ „Овчар Бања” повећана је инсталисана снага овог система за 25%, па је његова тренутна укупна снага 18 MW, са инсталисаним протоком од 50 m³/s. Ревитализацијом ХЕ „Бајина Башта” (2009–2013) повећана је снага електране са 368 MW на 420 MW, повећањем степена корисности и протока. Годишња производња електране повећана је за око 40 GWh. Ревитализацијом ХЕ „Зворник” (2015–2020) њена снага је повећана за додатних 30 MW и сада износи укупно 122,3 MW. Сукцесивном ревитализацијом свих агрегата у ХЕ „Ђердап 1” (2009–2023) инсталисани проток по агрегату повећан је са

800 m³/s на 840 m³/s, што је уз повећање степена корисности агрегата условило повећање инсталисане снаге са 176 MW на 190 MW при номиналном фактору снаге cos φ = 0,9.

У току је ревитализација РХЕ „Бајина Башта”. Уговор о радовима је потписан још крајем 2019. године. Међутим, услед разних дешавања у свету (пандемија вируса корона, рат у Украјини и последични поремећаји на тржишту) долазило је до одлагања почетка радова. Почетак радова је био планиран за април 2024. године.

Планирају се и развијају пројекти ревитализација система „Власинских ХЕ”, ХЕ „Бистрица”, ХЕ „Потпећ” (уз уградњу четвртог агрегата) и ХЕ „Ђердап 2”.

Пројектом ревитализације „Власинских ХЕ” планира се повећање инсталисане снаге за око 8 MW (сада је снага снижена на око 100 MW, због стања опреме). Планирано повећање снаге очекује се услед повећања степена корисности, за око 3–5% у првој фази ревитализације, и за још око 1–3% у другој фази. Такође, планирано је да се омогући рад агрегата са нешто вишим инсталисаним протоком (са досадашњих 18 m³/s на 20 m³/s). Након ревитализације очекује се

повећање производње за око 3%, са 300 GWh на 310 GWh.

Реконструкција ХЕ „Потпећ” планирана је у две фазе. Прва фаза би обухватала изградњу машинске зграде са додатним четвртим агрегатом (снаге 13,3 MW и инсталисаног протока од 40 m³/s), док би друга фаза обухватала реконструкцију постојећа три агрегата, уз повећање степена корисности јединица за 2-4%, инсталисаног протока и – последично – укупне инсталисане снаге постојећих агрегата, за 7,5 MW.

Постојећа ХЕ „Бистрица” планира се за адаптацију и инвестиционо одржавање. Уместо стандардне реконструкције агрегата са повећањем инсталисане снаге извршиће се замена опреме уз задржавање исте инсталисане снаге агрегата. При томе се очекује повећање степена корисности агрегата за 2-4% и повећање годишње производње за око 5-7%. Уградњом нове опреме, већег степена корисности, смањиће се проток (са 18 m³/s на око 16,6 m³/s) и губици у доводно-одводним органима ове ХЕ.

Пројектом ревитализације ХЕ „Ђердап 2” планирано је повећање инсталисане снаге агрегата на 32 MW, повећањем степена корисности 1-2% и повећањем инсталисаног протока по агрегату на 475 m³/s. Очекује се повећање годишње производње са 1600 GWh на 1745 GWh.

Из Табеле II може се закључити да поред ХЕ које су до сада ревитализоване или су планиране за ревитализацију остаје потреба за убрзаном ревитализацијом и свих преосталих постојећих хидрокапацитета, као што су ХЕ „Увац”, ХЕ „Кокин Брод”, ПАП „Лисина”, али и ХЕ „Пирот” као последње изграђене велике ХЕ у ЕЕС-у Србије, [31].

2.4 Могућности увођења нових технологија у производни портфељ и њиховог коришћења

Још већи проблем од варијабилне производње из В-ОИЕ и последичног смањења баланских могућности, флексибилности и стабилности ЕЕС-а, представља чињеница да производни капацитети из В-ОИЕ неће моћи у потпуности да надоместе огромни удео који сада у покривању потрошње имају ТЕ (у Србији је он и до 70%). Дакле, основно је питање – на који начин се може компензовати мањак енергије за покриће базног оптерећења, који ће се свакако јавити и бивати све већи са гашењем појединих термокапацитета ЕПС-а који као примарно гориво користе нискокалорични лигнит? Чини се да су кључ транзиције ЕПС-а и Републике Србије ка одрживој будућности поменута диверсификација примарних горива и увођење и коришћење једног броја различитих, нових технологија. Најперспективније делује поменута производња и коришћење Н₂, уз екстензију са Н₂ – производња и коришћење NH₃. Водоник је и кључ за декарбонизацију индустрије и транспорта (погон бродова, рецимо, прелази на NH₃). Стога се основано може очекивати да ће управо ове технологије бити главни ослонац декарбонизације и енергетске транзиције. У наставку следи осврт и на остале технологије, њихове могућности и ограничења.

2.4.1 Биомаса. На Слици 6 приказани су начини обезбеђивања и коришћења биомасе као енергента у ЕЕС-у. Биомаса се може обезбеђивати на два начина. Први је наменско узгајање клонова више генотипова дрвенастих брзорастућих врста, као што су врбе и тополе, на тзв. енергетским плантажама. Овај начин има становите предности јер доприноси одводњавању, побољшана је рекултивација тла фитоекстракцијом, тло се пречишћава од тешких метала, а сама узгојена биомаса има високу калоријску вредност, око 19.000 kJ/kg. Други начин је организовано прикупљање биомасе као нуспроизвода у пољопривреди (пољски, тј. жетвени остаци), шумарству (дрво добијено хигијенском сечом шума) и у воћарству (редовним и хигијенским орезивањем).

У оба случаја обезбеђивања биомасе потребна је сложена логистичка подршка у смислу допреме биомасе до места њене обраде и коришћења, с тим што је овај проблем далеко израженији у случају прикупљања биомасе као нуспродукта других процеса. С тим у вези, озбиљан недостатак биомасе као енергента представљају трошкови њеног транспорта, који значајно расту за растојања већа од 50 km. Изразита мана организованог прикупљања биомасе као нуспроизвода је и немогућност поузданог планирања њене калоријске вредности и расположиве количине по хектару, у односу на наменско узгајање биомасе, код којег овог проблема нема. Једна од погодности биомасе, кад је реч о њеном коришћењу у ЕПС-у, јесте могућност њеног прикупљања испред фронта рударских радова на коповима.

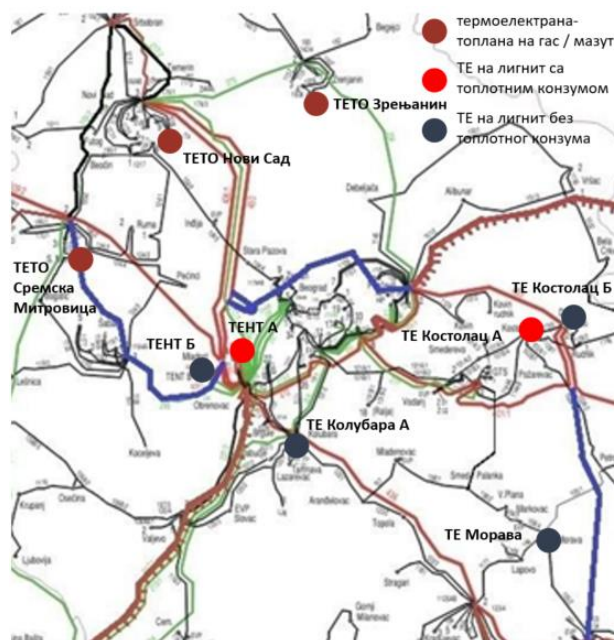


Слика 6. Начини обезбеђивања и коришћења биомасе као енергента у ЕЕС-у

Начин на који би се, увођењем и коришћењем технологија на биомасу, могао „озеленети” термоенергетски део производног портфеља ЕПС-а, илустрован је на сликама 7 и 8. На Слици 7 дато је постојеће стање и локације ТЕ у Србији (без КиМ). На Слици 8 приказано је могуће супституисање појединих постојећих капацитета на лигнит новим постројењима на биомасу, типизираних снага 1×160 или 2×160 MW_e. На Слици 8 илустрован је и начин на који би се у Србији, у случају већег обима коришћења биомасе као једног од примарних енергената у ЕЕС-у, могли

смањити трошкови њеног транспорта. Срећна околност је да се све три ТЕ-ТО у склопу ЕПС-а налазе у Војводини (од којих је ТЕ-ТО Нови Сад поред самог Дунава). Војводина је највећи извор биомасе потекле из пољопривредне производње. Биомаса се за сада ни изблиза не користи онолико колико је то могуће. Друго, и већина преосталих, великих ТЕ на лигнит, налази се уз Дунав и Саву, па би допрема биомасе до њих била могућа најјефтинијим, речним транспортом. Што се тиче нешто удаљеније локације за раније планирану ТЕ „Колубара Б”, транспорт биомасе до ње био би могућ истим железничким вагонима који из Рударског басена „Колубара” транспортују лигнит за ТЕ „Никола Тесла” (ТЕНТ) А и Б, а који, сада, у повратку ка копу иду празни. Претовар биомасе би се са бродова радио у пристаништима уз ТЕНТ А и ТЕНТ Б.

Што се тиче стране самог коришћења биомасе, издвајају се три основна вида (Слика 6). Први је могућност косагоревања са лигнитом у постојећим ТЕ. Оно би довело до умањења такси на емисије CO₂, смањења утршка мазута, као и количина пепела, сумпора и емисије GHG-а. При томе, релативно мали удео биомасе у косагоревању значајно повећава калоријску вредност смесе у односу на чист лигнит. Прилагођавање за косагоревање не захтева већа улагања у постојеће производне капацитете.



Слика 7. Постојећи термокапацитети ЕПС-а



Слика 8. Идеја о коришћењу биомасе у ЕПС-у, уз смањење трошкова транспорта

Други вид коришћења биомасе је њено сагоревање у новим, „зеленим” ТЕ. У случају Србије њихове могуће локације дате су на Слици 8. Већ је поменуто да у свету постоје готова техничко-технолошка решења електрана на биомасу, типизираних снага. То су најчешће когенеративна постројења (ТЕ-ТО), за производњу електричне и топлотне енергије. Као подваријанта, могућа су решења ових ТЕ-ТО са додатним постројењима за хватање CO₂, његово компримовање и складиштење. У том случају, овакве електране на биомасу изузимају се из система плаћања такси на емисије CO₂.

Трећи, посебан вид коришћења биомасе, приказан на Слици 6, представља њена обрада и употреба у производњи биогаса.

2.4.2 Био-гас. Био-гас је изузетно погодан за когенеративну производњу топлотне и електричне енергије. Производња електричне енергије из био-гаса је, за разлику од оне из В-ОИЕ, потпуно управљива (није варијабилна). При томе ова постројења могу да раде и преко 7000 сати годишње, па имају изузетно висок фактор коришћења капацитета. Осим тога, сам био-гас је погодан за транспорт и сагоревање. Тако

једну од предности производње и употребе био-гаса представља могућност његовог сагоревања у урбаним зонама (нпр. CH_4), уз минималне емисије штетних материја/гасова.

Зависно од примењене технологије, за снагу од 1 MW_{el} , тј. 7 GWh електричне енергије годишње добијене из био-гаса, захтева се од око 7000 t до 20.000 t жетвених остатака кукуруза. Са 1 ha добија се од 3 t до преко 10 t жетвених остатака (количина варира од врсте усева, године и климатских услова).

Као нуспроизвод из био-гасног постројења, након обраде органске биомасе, добија се дигестат. Он

представља органско ђубриво и као такво се директно враћа на њиве. И то је елемент циркуларне економије, која је једна од одлика предложеног холистичког приступа са Слике 4. Важно је напоменути да дигестат има већу моћ фектилизације земљишта од самих жетвених остатака (од којих, иначе, настаје), а који би у то исто земљиште били заорани након жетве.

Цео процес производње и коришћења био-гаса за производњу електричне и топлотне енергије (од које се део враћа у сам процес припреме биомасе), илустрован је на Слици 9, са назначеним токовима и билансима масе и енергије и коефицијентима искоришћења.



Слика 9. Процес производње и коришћења био-гаса за производњу електричне и топлотне енергије

Међутим, озбиљан недостатак и препреку за шири обим производње и коришћења био-гаса представљају високи инвестициони трошкови који прате ова постројења. У зависности од технологија, инсталирани 1 MW_{el} постројења за производњу био-гаса и електране на ово гориво захтева инвестицију у опсегу од чак 4 до 6 милиона евра. У поређењу са СЕ и ВЕ, на пример, постројење на био-гас има значајно веће инвестиционе трошкове. Стога се енергетски субјекти за производњу електричне енергије још увек радије опредељују за грађњу СЕ и ВЕ него за електране на био-гас. Када се овој чињеници дода и раније поменути проблем експоненцијалног раста трошкова транспорта биомасе (нарочито као нуспродукта у пољопривреди) за ареале полупречника већег од око 50 km , јасно је да и експлоатациони трошкови постројења за производњу био-гаса и електрана на ово гориво бивају знатни.

Ипак, могуће решење или барем ублажење ових недостатака (а пре свега транспортних трошкова) лежи у поменутој чињеници да је транспорт самог био-гаса технички и технолошки далеко једноставнији, а тиме и јефтинији од транспорта биомасе као примарног енергента. Наиме, после филтрирања/пречишћавања био-гаса и екстракције (око 30%) CO_2 из њега, могуће је убризгавати био-гас у постојеће гасоводе намењене за транспорт природног гаса. Друга могућност је да био-гас, под притиском од 4 bar до 10 bar , буде транспортован кроз засебне, јефтине гасоводе од полиетилена, чак и на веома велика растојања. Стога би за ЕПС био-гасне технологије могле бити интересантне и разматране првенствено по концепту који би чиниле следеће компоненте:

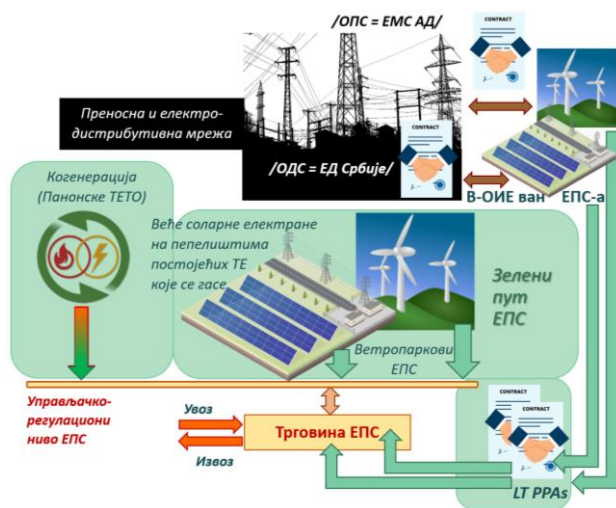
- децентрализована производња био-гаса, у већ постојећим и будућим постројењима, мањих капацитета (за која се жетвени остаци прикупљају са већег броја мањих, локалних ареала), а која су

сада искључиво у власништву лица и субјеката изван ЕПС-а;

- откуп произведеног био-гаса од стране ЕПС-а и његов транспорт постојећим гасоводима за природни гас или засебним, новим и јефтинијим гасоводима од полиетилена;
- централизована потрошња био-гаса у постојећим ТЕ-ТО ЕПС-а, које већ имају могућност когенерације.

Додатна повољна околност за примену једног оваквог концепта је и та што се три постојеће ТЕ-ТО ЕПС-а налазе у Војводини, највећој житници Републике Србије. Ова чињеница би такође повољно утицала на смањење оперативних трошкова у вези са евентуалном производњом и коришћењем био-гаса у ЕЕС-у Србије и у производном портфелу ЕПС-а. На овај начин, коришћењем био-гаса, постојеће ТЕ-ТО ЕПС-а би ефективно и ефикасно постале интегрални део концепта његовог „Зеленог пута“, чије су компоненте приказане на Слици 10. Надасве, смањила би се увозна зависност од природног гаса и тиме допринело повећању степена енергетске независности Србије.

Осим описаног концепта добијања био-гаса из биомасе и могућности његовог коришћења у производном портфелу ЕПС-а, у даљој будућности би била могућа и примена био-гасних технологија заснованих на коришћењу нискокалоричних угљева, с обзиром на то да ЕПС располаже преосталим количинама лигнита у својим површинским коповима у „Колубари“ и „Костолцу“. Ипак, технологије директног добијања био-гаса из лигнита данас су и даље прилично далеко од комерцијалне прихватљивости и практичне примене.



Слика 10. Компоненте концепта „Зеленог пута”

ЕПС-а. ОПС – оператор преносног система,
ОДС – оператор дистрибутивног система,
LT PPA – уговор приватног произвођача и ЕПС-а
о дугорочном откупу електричне енергије
(Long-Term Power Purchase Agreement)

2.4.3 Производња, складиштење и коришћење водоника.

Као једно од решења проблема које у ЕЕС уноси све већи уплив В-ОИЕ нуде се водоничне технологије. Као што је већ напоменуто, вишкови произведене електричне енергије у ЕЕС-у могу бити искоришћени за добијање водоника електролизом и за његово компримовање, у циљу складиштења. Уколико се електрична енергија за електролизу прибавља искључиво из ОИЕ, као продукт електролизе јавља се „зелени” водоник. У реалности, међутим, вишкови могу потицати и из класичних електрана, па и из ТЕ. Уколико, нпр. до 20% електричне енергије за електролизу води порекло из њих, а 80% и више из ОИЕ, као резултат процеса добија се „плави” водоник. Тако произведени водоник, који би се даље користио као носилац енергије, у будућности може представљати својеврсну копчу унутар енергетског система – између ЕЕС-а и осталих сектора и система. Наиме, не само да би се јављао као продукт рада ЕЕС-а него би се његовим сагоревањем у горивим ћелијама (Слика 4, средина доле) поново могла добијати, и у ЕЕС инјектирати, електрична енергија. У другим секторима пак „плави” водоник се може користити као један од примарних енергената у системима даљинског грејања; дакле, за добијање топлотне енергије (Слика 4, средина десно и горе). „Зелени” водоник се, у комбинацији са CO₂, захваћеним у одговарајућим постројењима у склопу ТЕ или ТЕ-ТО, може користити за производњу „плавог” метанола, који служи као гориво за аутомобиле, камионе, бродове и авионе (Слика 4, доле десно).

2.4.4 Јамска термална складишта. Као што је већ поменуто, у свету већ постоје и користе се велика јамска термална складишта (Pit Thermal Energy Storage, PTES). Највише искуства и примене ово техничко решење нашло је у Данској. Ова складишта се користе тако што се вишкови електричне енергије из

система користе за загревање и сезонско складиштење воде (Слика 4, горе десно). Она се потом користи у касној јесењој и зимској сезони, најчешће за системе даљинског грејања. Облога јаме, као и материјали од којих се гради њена прекривка, обезбеђује добру изолацију, како током више месеци не би долазило до превелике кондукције топлоте и хлађења воде. Најчешће се, у комбинацији са једном таквом јамом, као опрема за загревање воде користе или поља термалних соларних колектора или фотонапонски соларни панели из којих се вишкови електричне енергије користе за рад електричних грејача. На другој страни, заједно са јамом и соларима овај систем чини и топлотна пумпа, а могућа је и комбинација топлотне пумпе и (постојеће) топлане за даљинско грејање. Што се тиче топлотне пумпе, могуће је користити пумпу са компресором (када се као погонска машина углавном користи електрични мотор, гасна турбина или гасни мотор), или апсорпциону топлотну пумпу.

Што се тиче ЕПС-а, примена PTES-а била би могућа за насеља која се топлотном енергијом за даљинско грејање сада снабдевају из ТЕ које су планиране за гашење. Такође, постоји интерес ЕПС-а да учествује у развоју и реализацији пројекта PTES-а за Нови Сад, тим пре што су планиране локације овог постојења, укључујући и напојно соларно поље, у непосредној близини ТЕ-ТО Нови Сад. Реализација оваквих техничких решења донекле би била олакшана, и технички и финансијски, и то у погледу грађевинских радова, јер би за ископ и обликовање јама могла бити коришћена постојећа рударска механизација ЕПС-а.

2.4.5 Коришћење геотермалне енергије. Осим за даљинско грејање или припрему топле воде, геотермална енергија може да се користи и за производњу електричне енергије. У том случају се, међутим, захтева веома висока температура радног флуида, и од преко 190°C. У Европи и свету су развијене и у употреби три врсте електрана на геотермалну енергију:

- са сувом паром;
- са флеш паром;
- са бинарним циклусом.

Електрана са сувом паром користи топлу воду из тзв. производног бунара, температуре флуида су преко 150°C. Након проласка кроз турбину пара иде у хладњак одакле се флуид враћа у земљу, тзв. инјекционим бунаром. Ову врсту електрана карактерише релативно ниска цена, али је њихова примена географски ограничена.

Електрана са флеш паром испред турбине поседује и тзв. флеш бојлер, из кога се део флуида директно враћа у земљу, а део убризгава у турбину. Температуре флуида су преко 180°C. Ово је доминантан тип геотермалне електране када је реч о глобално инсталисаним капацитетима.

Електрана са бинарним циклусом као кључни елемент садржи измењивач топлоте. Он се флуидом напаја из производног бунара, из њега се расхлађени флуид враћа у земљу преко инјекционог бунара, али је на другој, системској страни, измењивач спрегнут и са турбином (коју напаја флуидом) и са сувим хладњаком (преко кога прима флуид искоришћен у турбини). Због

овако повећане ефикасности, потребне температуре флуида су код овог типа електране ниже, нешто преко 100°C. Такође је важно истаћи да се овај тип електране користи за комбиновану производњу електричне и топлотне енергије (тј. за грејање).

Данас се широм света користе два типа бинарних система:

- *Organic Rankine циклус* (ORC), који користи органски радни флуид (пропан или изобутан);
- *Kalina циклус*, који као радни флуид користи смесу две супстанце (нпр. воде и амонијака).

Изазови који стоје пред широм применом геотермалне енергије за производњу електричне енергије су трансфер знања и технологија из гасне и нафтне индустрије и чињеница да српска легислатива још увек не омогућава бржи развој геотермалних електрана, нити субвенције и финансирање почетних пројеката. У случају евентуалне пословне и стратешке одлуке ЕПС-а да у будућности развија и пројекте геотермалних електрана, изазов трансфера знања и технологија би могао бити превладан у сарадњи са другим великим, националним енергетским субјектом, Нафтном индустријом Србије (НИС).

2.4.6 Нуклеарна енергија. Чак и уз широку и комбиновану примену свих поменутих и описаних нових технологија, постоји опасност да ће се, гашењем за то предвиђених ТЕ и смањењем ангажовања преосталих, појављивати све већи мањак електричне енергије у производном портфелу ЕПС-а, па и у ЕЕС-у Србије у целини. Са друге стране, највећи део базне енергије која ће се до 2050. године појављивати као недостајућа, и стога критична, најлакше је подмити из будућих нуклеарних електрана (НЕ).

Изградња и коришћење НЕ има, дакако, и других својих предности, али и недостатака. У прилог укидању постојећег мораторијума на изградњу НЕ у Србији и одређивање ЕПС-а за развој пројек(а)та НЕ, говоре следеће чињенице:

- фактор капацитета НЕ је око 85%;
- годишња производња је и до 8 TWh по једној јединици у НЕ, снаге до око 900+ MW;
- доступне су поуздане и компактне НЕ (генерације III+, IV);
- Технологије SMR (*Small Modular Reactors*) постају све безбедније и стога прихватљивије за јавност;
- на располагању је обиље отпадне топлоте из НЕ за грејање станова, индустрије, стакленика;
- НЕ не захтевају никакву резерву, складиштење енергије нити балансирање;
- нема великих трошкова за електричну енергију која би била утрошена за конверзију у друге облике енергије или горива.

Од недостатака који прате примену нуклеарних технологија треба истаћи следеће:

- осим технологије, и нуклеарно гориво се такође мора набавити из иностранства, тако да би постојао веома висок степен енергетске зависности Србије;
- зависност од испоручилаца технологије, испоручилаца горива и земље која би код нас бринула и о испушеном радиоактивном гориву је највиша могућа и политички веома упитна;

- мораторијум на градњу НЕ је и даље на снази;
- упитни су проблеми у вези са евентуалним поседовањем нуклеарних технологија (у случају Србије, због политичких односа у региону);
- недостатак експерата образованих у овој области;
- упитно је да ли би било могуће у Србији применити, у датом тренутку расположива, најновија техничка и технолошка решења;
- упитно је и прихватање нуклеарних технологија у јавности кад се има у виду да и високо технолошки развијене земље напуштају те технологије;
- питање је и то да ли би развој технологије засноване на фузији у међувремену (нпр. до завршетка планирања, пројектовања и изградње прве/их НЕ) превазишао тренутно расположива и, нарочито – за Србију доступна, техничка решења базирана на физионој технологији.

О свим овим аспектима и отвореним питањима (не ограничавајући се, наравно, само на њих) потребно је повести рачуна при разматрању опције одређивања за развој и реализацију пројеката НЕ у ЕПС-у, тј. Србији.

2.5 Начин разматрања увођења нових технологија

На путу декарбонизације и енергетске транзиције, пред ЕПС и друге енергетске субјекте у Републици Србији, осим стратешких и дугорочних, постављаће се и задаци давања мишљења о неком конкретном проблему, пројекту, студији, техничкој документацији или иновацији. И у једна и у друга разматрања пожељно је укључивати експерте у конкретним областима који су чланови академске заједнице – универзитетске и научно-истраживачке. Са њима би се разматрале и могућности примене:

- најновијих резултата научних истраживања;
- нових технологија и иновативних техничких решења;
- најбоље расположиве праксе.

Један од могућих начина стварања формално-правног оквира за овакво, синергијско деловање академске заједнице и енергетских субјеката јесте закључивање билатералних споразума о научно-техничкој сарадњи. На тај начин стварају се услови за успостављање тешње сарадње електропривреде са образовним и научним установама које се баве истраживањем и развојем у областима од интереса за електропривредну делатност.

Најважнији циљеви који би могли бити достигнути оваквом синергијом научно-истраживачког рада са једне и стручне праксе и искуства са друге стране следећи су:

- створити потребне услове за унапређење и даљи развој производних капацитета ЕПС-а;
- имати запослене у ЕПС-у који су образовани у областима нових технологија и иновативних решења и мотивисани за њихову примену;
- реализација стратешких циљева ЕПС-а и Републике Србије у енергетском сектору.

Овакав концепт сарадње и успостављања тимског рада олакшао би кретање ЕПС-а и Републике Србије на

путу декарбонизације, енергетске транзиције и успостављања одрживог развоја и циркуларне економије.

3. ЗАКЉУЧАК

Потребно је постепено, током неколико деценија које су пред нама, успоставити такав производни микс, који би био заснован и ослоњен на различите еколошки прихватљиве енергенте и на нове технологије, који ће бити не само изводљив и одржив на дуги рок него и технички, финансијски и економски оптималан за српске услове и прилике, као и друштвено прихватљив. Осим тога, тај микс мора бити довољан за профитабилан рад ЕПС-а и у стању да обезбеди:

- стабилност и поузданост рада ЕЕС-а Србије;
- сигурност снабдевања крајњих корисника;
- највиши могући ниво енергетске независности и безбедности Републике Србије;
- задовољство и крајњих корисника ЕЕС-а и запослених у ЕПС-у.

При томе у највећој могућој мери треба поштовати и примењивати принципе који ће водити ка повећању енергетске ефикасности, успостављању циркуларне економије и смањењу негативних утицаја на животну средину као и на социјални аспект.

Избор најпогоднијих и најпримеренијих нових технологија и конкретних техничких решења нових капацитета за производњу електричне и топлотне енергије убудуће треба да буде вршен на основу мишљења и закључака до којих ће доћи експерти из научних и стручних кругова својим заједничким радом и синергијским деловањем.

Да би се све ово остварило, неопходна су улагања и у стицање нових знања и стално унапређење знања у конкретним техничким и технолошким областима. Осим тога, потребно је уложити напоре и средства и у подизање свести, ширега круга заинтересованих страна и јавности у целини, о неопходности примене нових технологија и квалитативног помераја од фосилних ка обновљивим енергентима и одрживој будућности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Korohod, A., Decarbonization as One of the Ways to Solve the Problems of Globalization, 2023, DOI: 10.15837/aijes.v17i1.5761
- [2] Engr Olushola Aina, Decarbonization, Opportunities and Dilemma for Developing Countries, *American Journal of Computing and Engineering*, ISSN 2790-5586 (Online), Vol.7, Issue 1, pp 1 – 12, 2024
- [3] Vojinovic, I., Understanding Main Drivers of Global Decarbonization, 2024, Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing International Conference on Medical and Biological Engineering, DOI: 10.1007/978-3-031-49062-0_93
- [4] Diaz, S., Al Hammadi, N., El Nasr, A. S., et al., Green Corridor: A Feasible Option for the UAE Decarbonization Pathway, Opportunities & Challenges
- [5] Nowrot, A.; Manowska, A., Supercapacitors as Key Enablers of Decarbonization and Renewable Energy Expansion in Poland, *Sustainability* 2024, 16, 216. <https://doi.org/10.3390/su16010216>
- [6] Lau, H. C., Decarbonization of ASEAN's power sector: A holistic approach, 2023, *Energy Reports* 9(3): 676-702, DOI: 10.1016/j.egy.2022.11.209
- [7] Li, X. (S.), Liu, P., Energy transition paradox: Solar and wind growth can hinder decarbonization, 2024, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, DOI: 10.1016/j.rser.2023.114220
- [8] Ghosh, Sadhan K., Ghosh, Sannidhya K., Circular Economy Catalysing Decarbonization, Chapter in the book: *Circular Economy Adoption*, 2023, DOI: 10.1007/978-981-99-4803-1_1
- [9] Lau, H.C., Tsai, S.C., Global Decarbonization: Current Status and What It Will Take to Achieve Net Zero by 2050, *Energies* 2023, 16, 7800, <https://doi.org/10.3390/en16237800>
- [10] Petersen, M., Renken, K., Adopting a Value Chain Focus to Tackle Decarbonization, Chapter in the book: *Maritime Decarbonization*, 2023, DOI: 10.1007/978-3-031-39936-7_6
- [11] FX Joko Priyono, Trade And Decarbonization: Opportunities and Challenges, 2023, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1270 012003, doi: 10.1088/1755-1315/1270/1/012003
- [12] Onyinyechukwu Chidolue et al., Decarbonization strategies in energy-intensive industries: Cases from Canada, USA, and Africa, *International Journal of Science and Research Archive*, 2024, 11(01), 361–370, DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.11.1.0065>
- [13] Sundaramoorthy, S., Kamath, D., Nimbalkar, S., Price, C., Wenning, T., Cresko, J., Energy Efficiency as a Foundational Technology Pillar for Industrial Decarbonization, *Sustainability* 2023, 15, 9487. <https://doi.org/10.3390/su15129487>
- [14] Leisin, M.; Radgen, P., Holistic Assessment of Decarbonization Pathways of Energy-Intensive Industries Based on Exergy Analysis, *Sustainability* 2024, 16, 351. <https://doi.org/10.3390/su16010351>
- [15] Nesterenko, N. et al., Methane-to-chemicals: a pathway to decarbonization, Chemistry, Special topic: Green Carbon Science – A Scientific Basis for Carbon Neutrality, 2023, Published by Oxford University Press on behalf of China Science Publishing & Media Ltd.
- [16] Martin, J., Baccarani, C., Brunetti, F., Sustainability and decarbonization: can we afford it? - Some implications for management, 25th Excellence in

- Services International Conference, University of Upsala – Gotland – Sweden, April 2023, ISBN 9791221015904
- [17] Cruceru, C., Dumitraşcu, D. D., The discrepancy of managing decarbonization & profitability, 2023, The 8th International Conference "Management Strategies and Policies in the Contemporary Economy", DOI: 10.53486/icspm2023.58
- [18] Gallagher, K. S., Oh, S., Job creation and deep decarbonization, *Oxford Review of Economic Policy*, 2023, 39, 765–778, <https://doi.org/10.1093/oxrep/grad038>
- [19] Chengbo Fu, Lei Lu, Mansoor Pirabi, Advancing green finance: a review of climate change and decarbonization, *Digital Economy and Sustainable Development* (2024) 2:1, <https://doi.org/10.1007/s44265-023-00026-x>
- [20] Succar, S.A., Brissaud, D., Evrard, D., Flick, D., De la Fontaine, D., Decarbonization Measure: A Concept towards the Acceleration of the Automotive Plant Decarbonization, *Systems* 2023, 11, 335. <https://doi.org/10.3390/systems11070335>
- [21] Tantau, A.; Goia, S.I.; Dinca, V.M.; Paunescu, C.; Stamule, S.; Stamule, T.; Bogdan, A. Exploring the Generation Z Attitude towards Energy Efficiency Improvement and Decarbonization through Heat Pumps: An Empirical Study in Romania, *Sustainability* 2024, 16, 1250, <https://doi.org/10.3390/su16031250>
- [22] Müller, C.C., Pradhananga, P., El Zomor, M., Pathways to decarbonization, circular construction, and sustainability in the built environment, 2024, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, DOI: 10.1108/IJSHE-09-2023-0400
- [23] Шилџут В. М., „Утицај потрошача на одрживу декарбонизацију будућег електроенергетског система”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”*, бр. 31, стр. 13-38, 2021, doi:10.5937/zeint31-34268
- [24] Rasool, A.A., Abbas, N.M., Sheikhyounis, K., Determination of optimal size and location of static synchronous compensator for power system bus voltage improvement and loss reduction using whale optimization algorithm, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 1(8(115)), 26-34, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251760>
- [25] „ПРЕЛИМИНАРНА АНАЛИЗА МОГУЋНОСТИ КОРИШЋЕЊА ПРОИЗВОДНИХ ЈЕДИНИЦА ПЛАНИРАНИХ ПО NERP-У ЗА OPT-OUT, ЗА ПРУЖАЊЕ ПОМОЋНЕ УСЛУГЕ РЕГУЛАЦИЈЕ НАПОНА”, Студија за ЕПС, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, 2021.
- [26] „РХЕ 'Бистрица' – анализе и инвестиционо-техничка документација”, студија и идејно решење за ЕПС, конзорцијум „Енергопројект-Хидроинжењеринг” АД Београд и „Електроенергетски координациони центар” ДОО Београд, 2021.
- [27] Kusakana, K.: 'Optimal scheduling for distributed hybrid system with pumped hydro storage', *Energy Conversion and Management*, 2016, (111), pp. 253–260.
- [28] Kocaman, A.S., Modi, V.: 'Value of pumped hydro storage in a hybrid energy generation and allocation system', *Applied Energy*, 2017, (205), pp. 1202–1215.
- [29] „Студија о могућностима изградње реверзибилних хидроелектрана и пумпно-акумулационих постројења у Србији”, студија за ЕПС, 2. фаза, „Дефинисање ширих простора и перспективних локација градње РХЕ и ПАП при ХЕ”, конзорцијум „Енергопројект-Хидроинжењеринг” АД Београд и Универзитет у Београду, Грађевински факултет, 2023.
- [30] „Хармонизација и обрада улазних података за израду студије оптималног коришћења хидроенергетских капацитета ЕПС АД, на временском хоризонту 1926–2018. година”, пројекат, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, 2023.
- [31] Илић, Ј., „Актуелни пројекти реконструкције, адаптације и инвестиционог одржавања постојећих хидроелектрана и РХЕ у ЕПС АД”, стручно-научни скуп „Хидроенергетика региона југоисточне Европе”, САНУ, 2023.

БИОГРАФИЈА

Владимир М. Шиљкут је рођен 1966. године у Београду, где је дипломирао 1994. и докторирао 2015. године на Електротехничком факултету. Радио је у „Електродистрибуцији Београд“ (1995–2013) на пословима планирања, развоја и истраживања дистрибутивних мрежа, водио

Лабораторију за бројила електричне енергије и Центар за интегрисани систем менаџмента. У „Електропривреди Србије“ водио је Сектор за трговину и односе са тарифним купцима у Дирекцији за дистрибуцију електричне енергије (2013–2015). Потом је (2015/16) водио и координирао пројекте на смањењу губитака у Оператору дистрибутивног система. Од 2016. до 2022. био је шеф Службе за припрему нових улагања у електране и обновљиве изворе енергије, на којој позицији је и тренутно, а у периоду од марта 2022. до јула 2023. био је саветник за

пословни систем директора ЕПС-а. Више од једне деценије био је ангажован и као гостујући предавач за области дистрибуције и малопродаје електричне енергије и електрана и разводних постојења, на Вишој електротехничкој школи у Београду. (Ко)аутор је више од 75 чланака и радова (од тога четири чланка у међународним часописима), објављених у публикацијама или презентованих на бројним националним, регионалним и међународним конференцијама. Ови радови су из домена метода прогнозе оптерећења, оптималног планирања мреже, процене губитака електричне енергије, обновљивих извора енергије, управљања оптерећењем, енергетских трансформатора, метрологије и др. Коаутор је и једне практичне књиге из електродистрибуције и малопродаје електричне енергије на српском језику. Члан је Српског националног комитета CIRED, његовог Извршног одбора, највише активан у сесији 1 – Компоненте мреже (као председник) и у сесији 5 – Планирање дистрибутивних мрежа.

Vladimir M. Šiljkut (Šiljkut)¹

Challenges and opportunities for long-term development and decarbonization of the Electric Power Industry of Serbia

¹ Joint Stock Company *Elektroprivreda Srbije*, Belgrade*

Review article

Highlights

- Review of new literature on decarbonization, transition and circular economy
- Proposal of a decarbonized power system model, based on the example of Serbia
- Opportunities and challenges for energy sources diversification and application of new technologies
- Proposal of ways to transfer knowledge in the energy sector of academia into the domain of industry / economy

Abstract

Environmental pollution and resources consumption for the industry operation and development of national economies have made it inevitable to find technical and technological solutions that will enable sustainable future development. Decarbonization, circular economy and diversification of energy sources are therefore imposed as a solution. In the (power) energy sector, they imply energy transition, primarily from the current mass use of fossil fuels to ecologically more acceptable primary energy sources, with an increase in energy efficiency, including an increase in waste heat's and waste materials' usage in the processes of heat and electricity production. Decarbonisation, however, raises complex issues and problems; from technical-technological, economic and financial ones - that long-term process' manners, dynamics and implementation costs, to the issue of its acceptability, fairness and the need to acquire appropriate knowledge and awareness. The example of Serbia, its electric power system (EPS) and "Electric Power Industry of Serbia" (EPIS) shows that it is necessary to establish gradually such a production mix, which would be based and relied on different, environmentally friendly energy sources and on new technology, which will be not only feasible and sustainable in the long term, but also technically, financially and economically optimal for Serbian conditions and opportunities, as well as socially acceptable. That mix must allow the profitable operation of EPIS and be able to ensure the stability and reliability of Serbian EPS operation, security of supply to end-users, the highest possible level of energy independence and security of the Republic of Serbia, and the satisfaction of end-users and EPIS employees. At the same time, the principles that will lead to an increase in energy efficiency, the establishment of a circular economy and the reduction of negative impacts on the environment, as well as on the social aspect should be respected and applied. The selection of the most suitable and appropriate new technologies and particular technical solutions for new capacities for the electricity generation and heat production in the future should be made on the basis of opinions and conclusions reached by experts from scientific and professional circles, through their joint work and synergistic action.

Keywords

**Circular Economy, Decarbonization, Diversification, Energy Efficiency,
Energy Sources, Energy Transition**

Received: February 26th, 2024 Reviewed: March 13th, 2024Modified: March 27th, 2024 Accepted: April 18th, 2024

*Vladimir M. Šiljkut (Šiljkut), +381-64-897-46-72

E - mail: vladimir.siljkut@eps.rs

Јадранка М. Јањанин¹, Милан М. Даниловић², Жељко Р. Јовановић¹

Анализа потребних месечних количина електричне енергије произведене из обновљивих извора енергије за надокнаду губитака у преносном систему

¹ Акционарско друштво „Електро mreжа Србије” Београд*² Агенција за енергетику Републике Србије<https://doi.org/10.18485/epij.2025.3.1.2>

Стручни рад

Кључне поруке

- Варијабилност средњих сатних вредности техничких губитака у преносном систему
- Апроксимација производње електрана из ОИЕ
- Могућност надокнаде техничких губитака у преносном систему из ОИЕ

Кратак садржај

У току је „зелена“ транзиција – кретање енергетског сектора ка климатској неутралности до 2050. године и стога је битно благовремено планирати и осигурати одрживост постојећих процеса. Идентификација могућности и избор акција су неизоставни у планирању будућег рада. Неретко се догађа да изабраном акцијом не постижемо жељене резултате, па се морамо подвргнути итеративним процесима. Како би се избегла примена брзих акција и немогућност спровођења потребних анализа, кључно је на време осматрати и осмишљавати процесе, поготово уколико проистичу из законски дефинисаних дужности.

Када говоримо о оператору преносног система, као једну од дужности из Закона о енергетици препознајемо набавку електричне енергије за надокнаду техничких губитака у преносном систему. У овом раду ћемо се посветити детаљнијој анализи изабраног начина набавке техничких губитака у преносној мрежи из обновљивих извора енергије. Аутори рада су изабрали ветар, сунце и отпад као изворе електричне енергије које ће користити у планирању набавке електричне енергије за надокнаду губитака. Овај рад представља наставак анализе која је започета у раду „Обновљиви извори енергије као ресурс за куповину електричне енергије за надокнаду губитака у преносном систему”. Са нивоа сагледавања годишњих потреба електричне енергије за надокнаду губитака у преносном систему произведену из обновљивих извора енергије спуштамо се на месечни ниво.

Овај рад може послужити као смерница за ублажавање укупних ризика и неизвесности оператора преносног система приликом набавке електричне енергије за надокнаду техничких губитака у преносном систему на путу ка чистој енергији до 2050. године. Кроз рад ћемо сагледати да ли је један од основних принципа транзиције да је прелазак на чисту енергију објективан и инклузиван, оправдан у случају оператора преносног система.

Кључне речи

Апроксимација производње из обновљивих извора енергије, губици, климатска неутралност

Напомена:

Овај чланак се тематски надовезује на текст *Обновљиви извори енергије као ресурс за куповину електричне енергије за надокнаду губитака у преносном систему*, који је објављен 1. новембра 2024. у другом, специјалном издању „Електропривреде”, посвећеном изабраним награђеним радовима на 36. саветовању CIGRE Србија

Примљено: 16. децембар 2024.

Рецензирано: 16. јануар 2025.

Измењено: 1. фебруар 2025.

Одобрено: 13. фебруар 2025.

*Кореспондирајући аутор: Јадранка Јањанин, +381 64 8408 661

Имејл: jadranka.janjanin@ems.rs

1. УВОД

Политичке смернице Европске комисије и даље су усмерене ка остваривању циљева постављених у Европском „зеленом” договору, [1]. Захваљујући европским мерама, обновљиви извори енергије (ОИЕ) достигли су рекордан ниво, чинећи 50% производње електричне енергије у ЕУ током 2023. године, [1].

Према наводима у Директиви Европске уније (ЕУ) 2013/2413, енергетски сектор тренутно у ЕУ доприноси са преко 75% укупних емисија гасова са ефектом стаклене баште, и зато су ОИЕ од фундаменталног значаја за постизање климатске неутралности ЕУ до 2050. године, [2]. У јулу 2021. године, као део пакета за Европски „зелени” договор, Европска комисија је предложила да се до 2030. године удвостручи удео обновљиве енергије у енергетском миксу, у поређењу са 2020. годином, како би достигао проценат удела од најмање 40%, [2].

У раду [3] напоменуто је да неколико европских оператора преносног система тежи да набавку електричне енергије за надокнаду техничких губитака (у даљем тексту: губитака) оствари из ОИЕ како би допринели решавању проблема емисије гасова са ефектом стаклене баште и покушано је да се сагледа по ком плану би оператор преносног система у Републици Србији могао да набавља електричну енергију за надокнаду губитака и нађе се међу операторима који ће олакшати „зелену” транзицију. Полазна тачка за анализу потреба оператора преносног система за електричном енергијом на месечном нивоу ће бити апроксимација годишње укупно остварене производње по типу електрана, у периоду 2019–2023. године, у односу на обрачунске вредности губитака приказаних у Табели I, [3], уважавајући корекцију обрачунских вредности губитака за 2023. годину.

Табела I Апроксимација годишње укупно остварене производње по типу електрана, у периоду 2019–2023. године, у односу на обрачунске вредности губитака. Извор: [3]

Година		2019	2020	2021	2022	2023
Тип електране	Инсталисана снага	Годишња производња електрана [MWh]				
на отпад	110 MW	674.520	676.368	674.520	674.520	674.520
на ветар	30 MW	66.559	72.583	80.528	70.237	78.861
на сунце	50 MW	63.108	73.709	50.066	49.245	41.183
Укупно [MWh]		804.187	822.660	805.114	794.002	794.564
Губици [MWh]		805.914	798.352	844.972	801.999	926.420

За изабране типове електрана и наведене године из Табеле I у наставку рада биће разложена потреба за електричном енергијом за надокнаду губитака по месецима.

2. АПРОКСИМАЦИЈА РАДА ЕЛЕКТРАНА НА ОИЕ

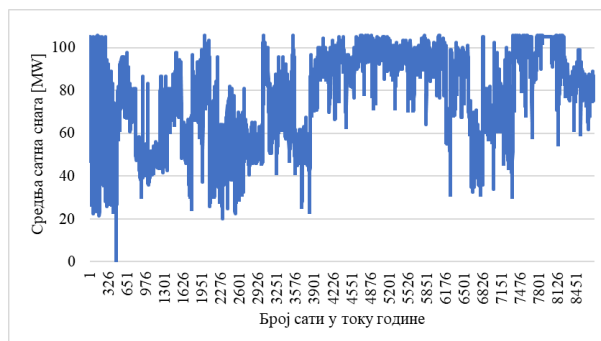
2.1 Електрана на отпад

У новембру 2024. године свечано је отворено прво постројење за енергетско искоришћење отпада у Србији одобрено снаге од око 35 MW. Ова електрана термички обрађује чврст, неопасан, комунални отпад и производи „зелену” топлотну и електричну енергију. Реализацијом изградње ТЕ-ТО Винча, нове санитарне депоније, постројења за поновно искоришћење грађевинског отпада и отпада од рушења, и постројења за третман процедних вода, ова инвестиција представља кључан корак ка унапређењу одрживог управљања комуналним отпадом у Београду и значајном побољшању квалитета животне средине, [4].

Изградња ТЕ-ТО Винча има вишеструке бенефите као што су унапређење еколошке и социјалне средине, затварање старе депоније, која представља значајан ризик по животну средину у региону, смањење емисије гасова који доприносе ефекту стаклене баште, спречавање негативних утицаја на животну средину, као што је нарушавање околног предела због одлагања отпада на депонију, и локално загађење воде и ваздуха, [4].

На основу података објављених на платформи [5], земље у нашем окружењу које у својим производним капацитетима имају инсталисане електране на отпад су Словенија, Аустрија, Хрватска, Мађарска и Бугарска. Електране на отпад у овим земљама постоје већ неколико година што нам је било од помоћи приликом процене дијаграма сатних вредности производње.

Последњих месеци ТЕ-ТО Винча је у свом раду показала да постиже средње сатне вредности производње блиске инсталисаној снази. Руководећи се овом чињеницом и сатним дијаграмима производње мађарске електране на отпад, одлучили смо да апроксимацију средњих сатних вредности производње из електране на отпад инсталисане снаге 110 MW извршимо у складу са дијаграмом на Слици 1, за све посматране године, уз уважавање чињенице да је 2020. година била преступна, односно са 366 дана.



Слика 1. Апроксимација средњих сатних вредности производње из електране на отпад инсталисане снаге 110 MW на годишњем нивоу

Дијаграм производње са Сlike 1 одговара укупној годишњој производњи електране на отпад инсталисане снаге 110 MW од 674.520 MWh за све године у периоду посматрања 2019–2023. године, осим преступне када износи 676.368 MWh.

Производња посматране електране на отпад по месецима у складу са апроксимираним дијаграмом је приказана у Табели II.

Табела II Производња електране на отпад по месецима, у периоду 2019–2023. године

MWh	2019/2021/ 2022/2023	2020
Јануар	49.400	49.400
Фебруар	37.900	39.748
Март	51.815	51.815
Април	36.973	36.973
Мај	52.771	52.771
Јун	56.757	56.757
Јул	71.147	71.147
Август	71.064	71.064
Септембар	63.724	63.724
Октобар	48.097	48.097
Новембар	70.028	70.028
Децембар	64.844	64.844

Као што је наведено у раду, [3], вредност губитака се у највећем броју сати у току године креће између 90 MW и 110 MW, тако да производња електране на отпад даје сигурност оператору преносног система да ће обезбедити неспорни део електричне енергије за надокнаду губитака.

За рад електране на отпад инсталисане снаге 110 MW потребно је обезбедити довољну количину комуналног чврстог отпада како би се реализовао апроксимирани дијаграм производње. Осврнули смо се мало на статистичке податке комуналног отпада земаља у Европи које у производњи електричне енергије користе електране на отпад. Како бисмо утврдили домаћи потенцијал за обезбеђивање довољне количине комуналног чврстог отпада за производњу електричне енергије из електране на отпад инсталисане снаге 110 MW, посматрали смо укупно генерисани комунални отпад [6] и укупно инсталисану снагу свих производних група по типу производње електране на отпад, [7], по изабраним зонама трговања у 2022. години (Табела III).

Табела III Укупно генерисани комунални отпад и инсталисана снага производних група по типу производње електране на отпад у изабраним зонама трговања у 2022. години.

Зона трговања	Генерисани комунални отпад по становнику [kg/становнику], [6]	Број становника [x 1.000.000], [8,9]	Укупно генерисани комунални отпад по зони трговања [x 1.000.000 kg]	Укупно инсталисана снага производних група по типу производње електране на отпад [MW], [7]
(1)	(2)	(3)	(4)=(2)x(3)	(5)
Немачка–Луксенбург	1.314	85,1	111.821,4	1.832
Француска	539	68,2	36.759,8	968
Белгија	677	11,7	7.920,9	384
Аустрија	835	9,1	7.598,5	80
Мађарска	406	9,6	3.897,6	49
Србија	295	6,6	1.947,0	32
Бугарска	445	6,4	2.848,0	6
Словенија	487	2,1	1.022,7	6
Хрватска	478	3,9	1.864,2	6

Из Табеле III закључује се да је инсталисана снага производних група по типу производње електране на отпад у зони трговања Србија најближа зони трговања Мађарска док је укупно генерисани комунални отпад дупло мањи од мађарског. У поређењу са зоном трговања Немачка–Луксембург укупно генерисани комунални отпад у Србији је око 57 пута мањи. Све ово нам указује да би било потребно пре изградње електране на отпад инсталисане снаге 110 MW испитати на који начин се може обезбедити довољна количина комуналног чврстог отпада у зони трговања Србија.

2.2 Електрана на ветар

Електране на ветар су први пут прикључене на преносни систем Републике Србије крајем 2018. године и до децембра 2024. године је њихова инсталисана снага достигла 477 MW. Одређивању инсталисане снаге електране на ветар потребне за надокнаду дела губитака спроведено је на основу апроксимираних сатних вредности производње из електрана на ветар у периоду 2019–2023. године. За апроксимацију производње из електране на ветар коришћене су обрачунске средње сатне вредности снаге и утврђена је вредност инсталисане снаге од 30 MW.

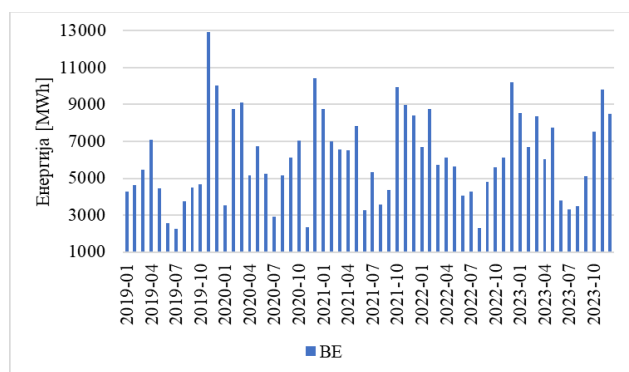
Израђени су дијаграми средњих сатних вредности производње из електране на ветар инсталисане снаге 30 MW са сваку годину периода посматрања од 2019. до 2023. године који су приказани на Слици А.1, датом у Додатку 1 овог чланка.

Производња посматране електране на ветар по месецима у складу са апроксимираним дијаграмима је приказана у Табели IV.

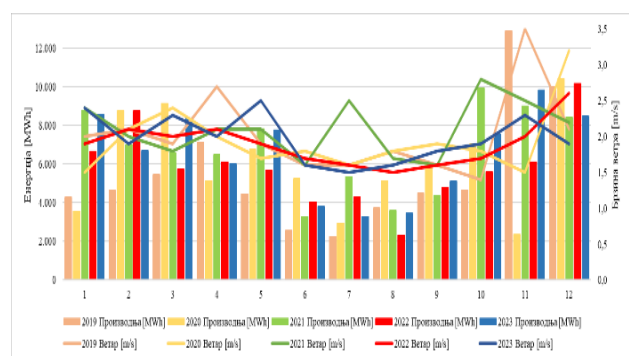
Табела IV Производња електране на ветар по месецима, у периоду 2019–2023. године

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Јануар	4.297	3.546	8.749	6.673	8.539
Фебруар	4.611	8.777	7.007	8.747	6.692
Март	5.459	9.128	6.575	5.720	8.374
Април	7.093	5.139	6.494	6.120	6.021
Мај	4.463	6.756	7.840	5.653	7.753
Јун	2.546	5.262	3.269	4.050	3.789
Јул	2.263	2.925	5.334	4.296	3.291
Август	3.727	5.137	3.577	2.305	3.470
Септембар	4.502	6.107	4.362	4.791	5.098
Октобар	4.673	7.035	9.920	5.586	7.545
Новембар	12.909	2.350	8.996	6.107	9.818
Децембар	10.016	10.421	8.405	10.189	8.471

Графички приказ производње електране на ветар по месецима, у периоду 2019–2023. године (Слика 2) јасно указује на варијабилност производње од метеоролошких параметара, превасходно од брзине ветра. Остварена брзина ветра је посматрана за територију Београда. Изграђене електране на ветар у Србији нису у овој области, али је податак довољно прецизан да се опише зависност производње електране на ветар од овог параметра.



(а)



(б)

Слика 2. Производња из електране на ветар инсталисане снаге 30 MW за период 2019–2023. године; (а) у континуитету по месецима; (б) упоредни приказ са средњом брзином ветра по месецима у наведеном периоду

У појединим месецима разлика у производњи досеже изнад 10 GWh, односно у истом месецу у

различитим годинама производња може бити пет пута већа. Највећи узрок овако велике разлике у произведеној електричној енергији је брзина ветра. Разлика између средњих вредности брзине ветра на месечном нивоу у месецима са највећом разликом у произведеној електричној енергији је била 2 m/s.

2.3 Електрана на енергију сунца

Једна од главних предности концентрованих соларних електрана (CSP електране) у односу на соларне фотонапонске електране (PV електране) јесте та што може бити опремљена растопљеним солима у којима се може складиштити топлота, омогућавајући генерисање електричне енергије и када нема сунчевог зрачења, [10].

Приликом одређивања инсталисане снаге електране на сунце потребне за надокнаду дела губитака коришћени су доступни подаци са платформе ENTSO-E за транспарентност, за зону трговања Хрватска за период 2019–2023. године, [5]. На основу података о укупно оствареној производњи по типу електране на сунце начином PV, [11], утврђено је да је потребна инсталисана снага електране на сунце 50 MW. Након тога је урађена апроксимација сатних вредности производње за период посматрања.

Израђени су дијаграми средњих сатних вредности производње из соларне PV електране, инсталисане снаге 50 MW, за сваку годину периода посматрања од 2019. до 2023. године, који су приказани на Слици А.2, датој у Додатку 1 овог чланка.

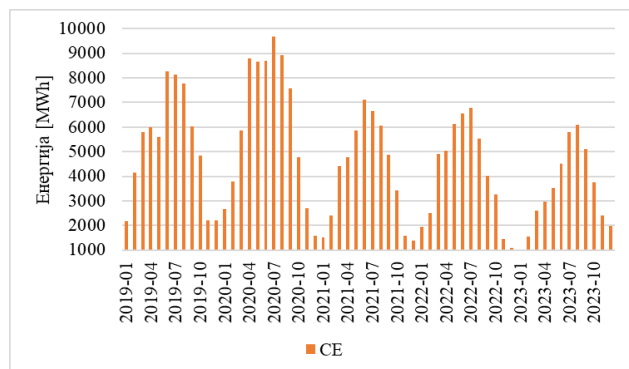
Производња посматране соларне PV електране по месецима у складу са апроксимираним дијаграмима приказана је у Табели V.

Табела V Производња соларне PV електране по месецима, у периоду 2019–2023. године

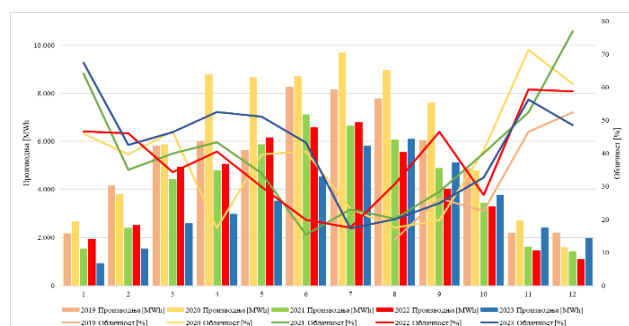
MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Јануар	2.162	2.658	1.529	1.935	921
Фебруар	4.145	3.791	2.392	2.500	1.534
Март	5.790	5.859	4.421	4.919	2.587
Април	5.987	8.782	4.778	5.050	2.975
Мај	5.609	8.658	5.851	6.141	3.517
Јун	8.251	8.692	7.097	6.567	4.522
Јул	8.131	9.691	6.639	6.775	5.811
Август	7.760	8.940	6.058	5.529	6.088
Септембар	6.037	7.584	4.874	4.006	5.108
Октобар	4.854	4.779	3.438	3.268	3.757
Новембар	2.189	2.701	1.594	1.454	2.398
Децембар	2.193	1.574	1.395	1.101	1.965

Током протеклих неколико деценија догодио се значајан пад трошкова производње електричне енергије из соларних PV електрана и очекује се да ће се употребом соларних PV електрана тај тренд наставити уз повећање ефикасности и побољшања поузданости, издржљивости и дужег века трајања електрана, [12]. Међутим, оно што можемо закључити из графичког приказа производње соларне PV електране по месецима, у периоду 2019–2023. године (Слика 3), јесте сезонска зависност од временских

услова, односно потенцијала сунца и облачности. У овом раду смо користили остварену облачност за територију Београда уз претпоставку да је идентична за посматрану електрану у посматраном периоду.



(a)



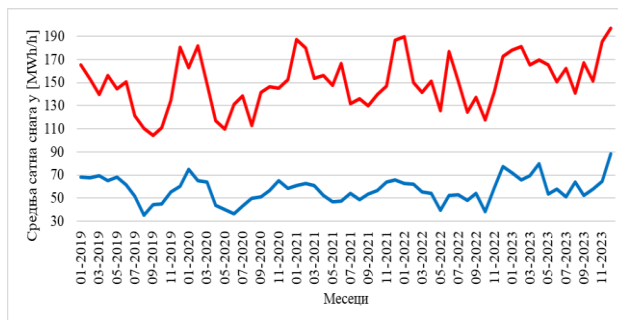
(б)

Слика 3. Производња из електране на сунце инсталисане снаге 50 MW за период 2019–2023. године; (а) у континуитету по месецима; (б) упоредни приказ са облачношћу по месецима у наведеном периоду

Са Слика 3 закључујемо да разлика у производњи ове електране на сунце у току истог месеца у различитим годинама достиже вредност од око 5 GWh, односно може бити скоро три пута већа. Битан разлог за остваривање овако велике разлике у производњи је облачност. Разлика између средњих вредности облачности на месечном нивоу за посматрани месец са највећом производњом је била три пута мања за исти тај месец са најмањом производњом.

3. ГУБИЦИ У ПРЕНОСНОЈ МРЕЖИ

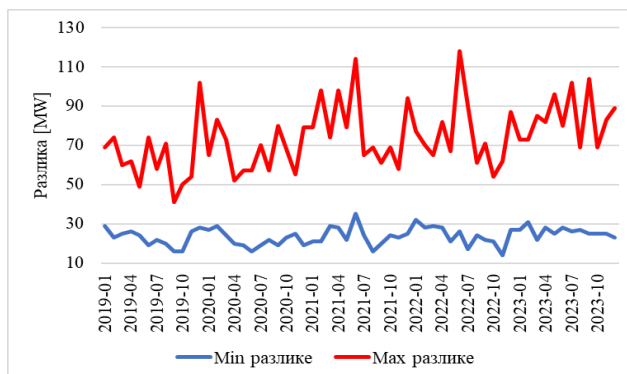
Осврнућемо се на кретање минималних и максималних обрачунских средњих сатних вредности губитака за период посматрања од 2019. до 2023. године (Слика 4).



Слика 4. Минималне и максималне средње сатне вредности губитака по месецима за период 2019–2023. године. Извор: [3]

Са Слика 4 уочава се да се минималне средње сатне вредности губитака крећу у опсегу од 35,5 MW до 88,3 MW, док се максималне средње сатне вредности губитака крећу у опсегу од 104,2 MW до 197,3 MW.

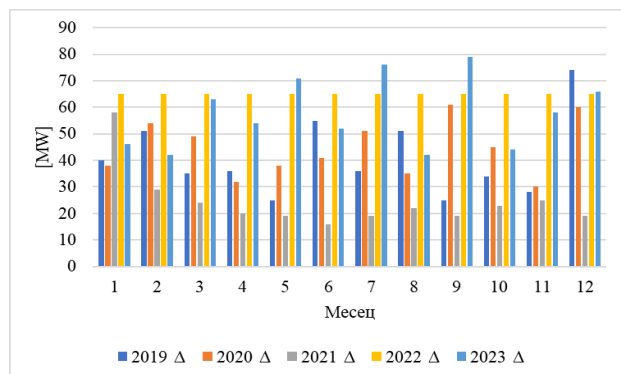
У току једног дана није очекивано да ће се јавити и минимална и максимална средња сатна вредност губитака за одређени месец. Стога, да би боље била схваћена флукутација губитака на дневном нивоу унутар једног месеца, посматрали смо разлику између минималне и максималне средње сатне вредности губитака на дневном нивоу, по месецима (Слика 5).



Слика 5. Разлика између минималне и максималне средње сатне вредности губитака на дневном нивоу по месецима за период 2019–2023. године

Са Слика 5 може се видети да у зависности од године посматрања у истом месецу разлика између минималне и максималне средње сатне вредности губитака на дневном нивоу се може кретати од 19 MW до 79 MW.

Упоредне разлике између минималне и максималне средње сатне вредности губитака на дневном нивоу приказане су на Слици 6.



Слика 6. Упоредни приказ разлике између минималне и максималне средње сатне вредности губитака на дневном нивоу по месецима за период 2019–2023. године

Слика 6 нам открива непредвидивост кретања губитака по месецима у току године и управо ова непредвидивост омогућава да се за њихову надокнаду користе интермитентни ОИЕ.

4. АНАЛИЗА ОДСТУПАЊА ОБРАЧУНСКИХ САТНИХ ВРЕДНОСТИ ГУБИТАКА ОД АПРОКСИМИРАНЕ ПРОИЗВЕДЕНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ ИЗ ОИЕ

У идеалним ситуацијама прогнозиране вредности губитака одговарале би обрачунским вредностима губитака. Под овом претпоставком започињемо анализу одступања обрачунских сатних вредности губитака од апроксимираних произведених електричне енергије из ОИЕ.

За период посматрања од 2019. године до 2023. године у сваком сату смо упоредили збир апроксимираних произведених изабраних ОИЕ у складу са Поглављем 2 и вредности обрачунских губитака. На основу спроведеног прорачуна добили смо резултате из Табеле VI (а) – (г).

На основу Табеле VI добија се јасна слика о количинама електричне енергије које је потребно докупити (мањак), односно продати (вишак) како би билансна група на тржишту електричне енергије која у свом саставу има губитке била у потпуности избалансирана. Агрегирањем месечних података из Табеле VI на годишњи ниво добијамо Табелу VII на основу које закључујемо да се на годишњем нивоу мањак електричне енергије може кретати од око 13% до скоро 20% док се вишкови могу кретати од око 6% до око 16% у односу на годишњу вредност губитака.

Табела VI Одступање апроксимираних произведених од обрачунских вредности губитака по месецима у периоду 2019–2023. године; (а) укупна производња; (б) обрачунски губици; (в) мањак енергије; (г) вишак енергије

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Јануар	55.859	55.604	59.678	58.008	58.860
Фебруар	46.656	52.316	47.299	49.147	46.126
Март	63.064	66.760	62.811	62.454	62.776
Април	50.053	50.936	48.245	48.143	45.969
Мај	62.843	68.185	66.462	64.565	64.041
Јун	67.554	70.711	67.123	67.374	65.068
Јул	81.541	83.763	83.120	82.218	80.249
Август	82.551	85.141	80.699	78.898	80.622
Септембар	74.263	77.415	72.960	72.521	73.930
Октобар	57.624	59.911	61.455	56.951	59.400
Новембар	85.126	75.079	80.618	77.589	82.243
Децембар	77.053	76.839	74.644	76.134	75.280

(а)

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Јануар	79.109	82.401	83.982	85.231	83.859
Фебруар	68.208	75.196	76.311	64.235	73.986
Март	79.692	73.995	78.363	68.618	80.263
Април	73.545	53.931	71.216	66.616	85.683
Мај	74.514	50.725	68.381	59.107	70.315
Јун	70.306	57.238	66.950	60.943	71.214
Јул	59.314	62.359	62.993	61.647	66.531
Август	55.245	60.244	58.602	60.694	69.758
Септембар	49.675	58.162	59.726	63.307	68.391
Октобар	52.191	73.139	66.322	62.337	71.426
Новембар	65.332	72.160	65.560	67.633	85.229
Децембар	78.783	78.802	86.565	81.630	99.766

(б)

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Јануар	23.924	27.444	26.272	28.396	25.882
Фебруар	22.072	23.354	29.465	15.678	27.916
Март	17.745	12.277	17.347	11.381	18.852
Април	24.089	9.189	23.635	19.310	39.776
Мај	13.938	2.171	8.294	4.447	10.294
Јун	6.902	1.231	7.716	4.147	10.187
Јул	148	525	322	601	896
Август	27	105	66	183	755
Септембар	413	615	1.304	2.411	3.452
Октобар	4.439	16.234	9.628	9.604	13.829
Новембар	459	4.446	1.514	2.074	7.289
Децембар	6.992	7.561	16.559	9.905	25.022

(в)

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Јануар	674	647	1.968	1.173	883
Фебруар	520	473	453	590	56
Март	1.117	5.085	1.795	5.217	1.365
Април	597	6.151	664	837	62
Мај	2.267	19.630	6.375	9.905	4.020
Јун	4.150	14.705	7.889	10.578	4.041
Јул	22.375	21.929	20.449	21.172	14.614
Август	27.333	25.001	22.163	18.387	11.619
Септембар	25.001	19.868	14.538	11.625	8.991
Октобар	9.872	3.006	4.761	4.218	1.803
Новембар	20.253	7.365	16.572	12.030	4.303
Децембар	5.262	5.597	4.638	4.409	536

(г)

Табела VII Одступање апроксимиране производње од обрачунских вредности губитака по годинама у периоду 2019–2023. године

Година		2019	2020	2021	2022	2023
Тип електране	Инсталисана снага	Годишња производња електрана [MWh]				
на отпад	110 MW	674.520	676.368	674.520	674.520	674.520
на ветар	30 MW	66.559	72.583	80.528	70.237	78.861
на сунце	50 MW	63.108	73.709	50.066	49.245	41.183
Укупно [MWh]		804.187	822.660	805.114	794.002	794.564
Мањак [MWh]		121.148	105.152	142.122	108.137	184.150
Вишак [MWh]		119.421	129.457	102.265	100.141	52.293
Губици [MWh]		805.914	798.352	844.972	801.999	926.420

Одступање сатне вредности производње од потрошње, у нашем случају губитака, неизоставни је део рада електроенергетског система, стога је битно радити прецизне прогнозе производње и прецизне прогнозе потрошње/губитака како би се благовремено прорачунао очекивани мањак, односно вишак електричне енергије и осмислио начин како да се мањак надокнади, односно вишак потроши или прода.

5. ЗАКЉУЧАК

Транзиција ка климатској неутралности захтева трансформацију електроенергетског система вођену огромним улагањима како би се интегрисао велики број обновљивих извора енергије и нових технологија у циљу сигурног и одрживог рада преносног система доступног за тренутне и будуће кориснике, као и остварило оптимално функционисање и даљи развој јединственог европског тржишта електричне енергије.

Климатске промене узрокују чешће екстремне временске прилике, као што су суше и олује, које додатно могу повећати варијабилност и неизвесност производње и потрошње, а понекад утичу и на доступност мрежне инфраструктуре. У оваквим околностима неизвесност прогнозе расте и грешке у планирању су неминовне. Што је већа неизвесност у раду електроенергетског система, то је прогноза губитака тежа, односно губици су теже предвидиви.

Ослањање на производњу електричне енергије из извора зависних од временских прилика захтева одговарајуће мере којима се могу превазићи ситуације када ветар и сунце нису довољни да електране које их користе као ресурсе својом производњом покрију потребну количину губитака или су пак претерани па производња из ових електрана превазилази потребне количине.

Тренутно се европски оператори преносног система не могу похвалити софтверским решењима са прецизним прогнозама губитака на временском хоризонту дан унапред када се лакше може обезбедити потребна количина електричне енергије за надокнаду губитака било на билатералном или на организованом тржишту дан унапред. У будућности ће се настојати да

се уложе додатни напори у циљу развијања софистицираних алата који ће унапредити квалитет прогнозе губитака. Доста наде се полаже у решења на бази вештачке интелигенције.

На унутардневном временском хоризонту прогнозе губитака су прецизније, али је неизвеснија могућност набавке, односно продаје очекиваног мањка, односно вишка електричне енергије. Превазилажење тренутног недостатка понуде и потражње за електричном енергијом на унутардневном временском хоризонту очекујемо да ће се догодити спајањем домаћег тржишта електричне енергије са јединственим европским тржиштем. Ступањем на снагу Закона о изменама и допунама Закона о енергетици „Сл. гласник РС” бр. 94/2024, Република Србија је преузела одредбе тзв. Пакета за интеграцију електричне енергије који садржи девет прописа ЕУ, међу којима се налазе и они који треба да омогуће спајање тржишта електричне енергије.

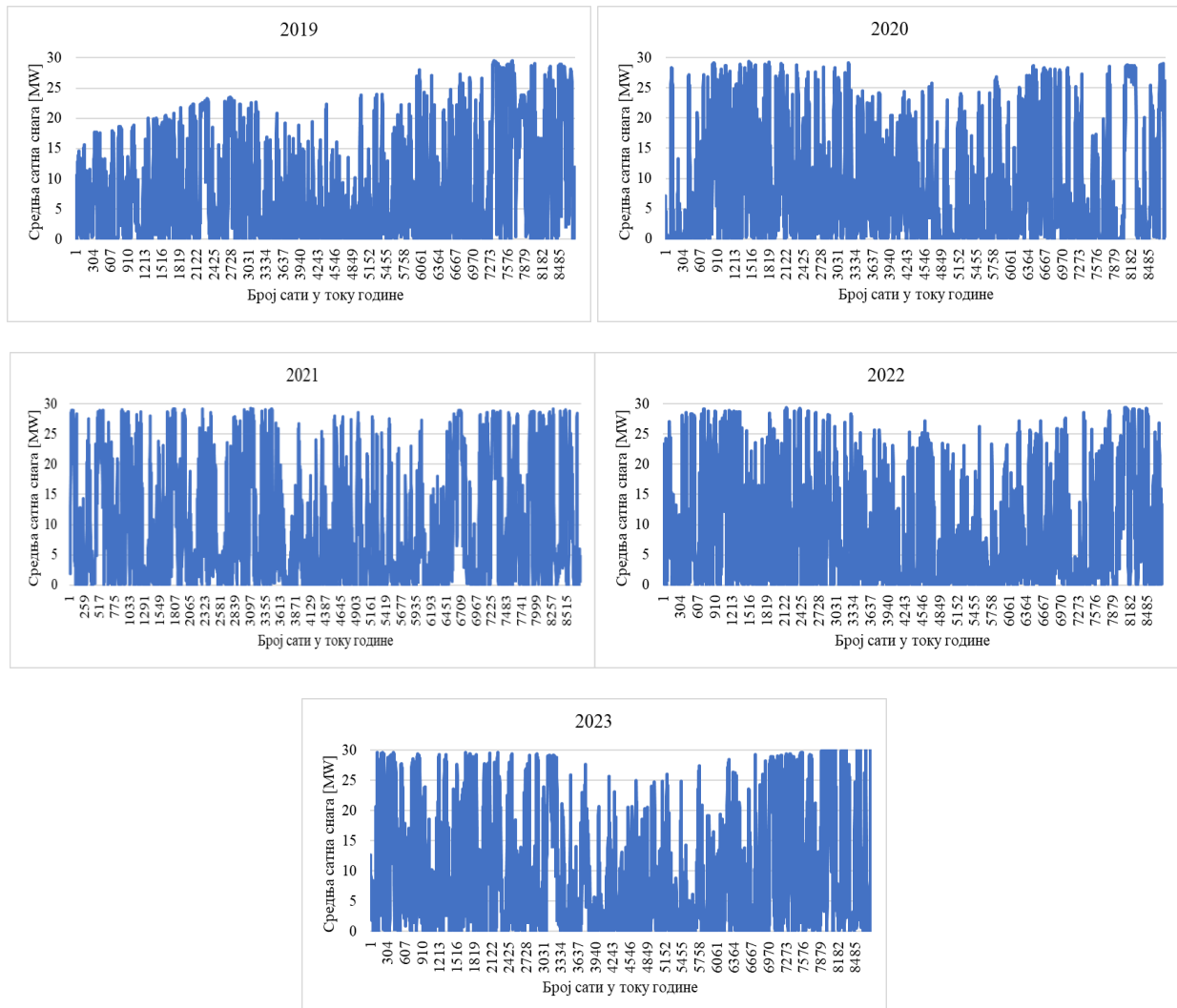
Обрачунске вредности губитака за посматрани период од пет година у прошлости шаљу нам сигнал да је вредност средње сатне снаге губитака у само 0,06% сати пала испод 45 MW, што указује да из производног портфеља електрана на ОИЕ у сваком сату током године морамо обезбедити ову вредност, односно изабрати ресурс који ће омогућити приближно константну производњу у сваком сату.

ЛИТЕРАТУРА

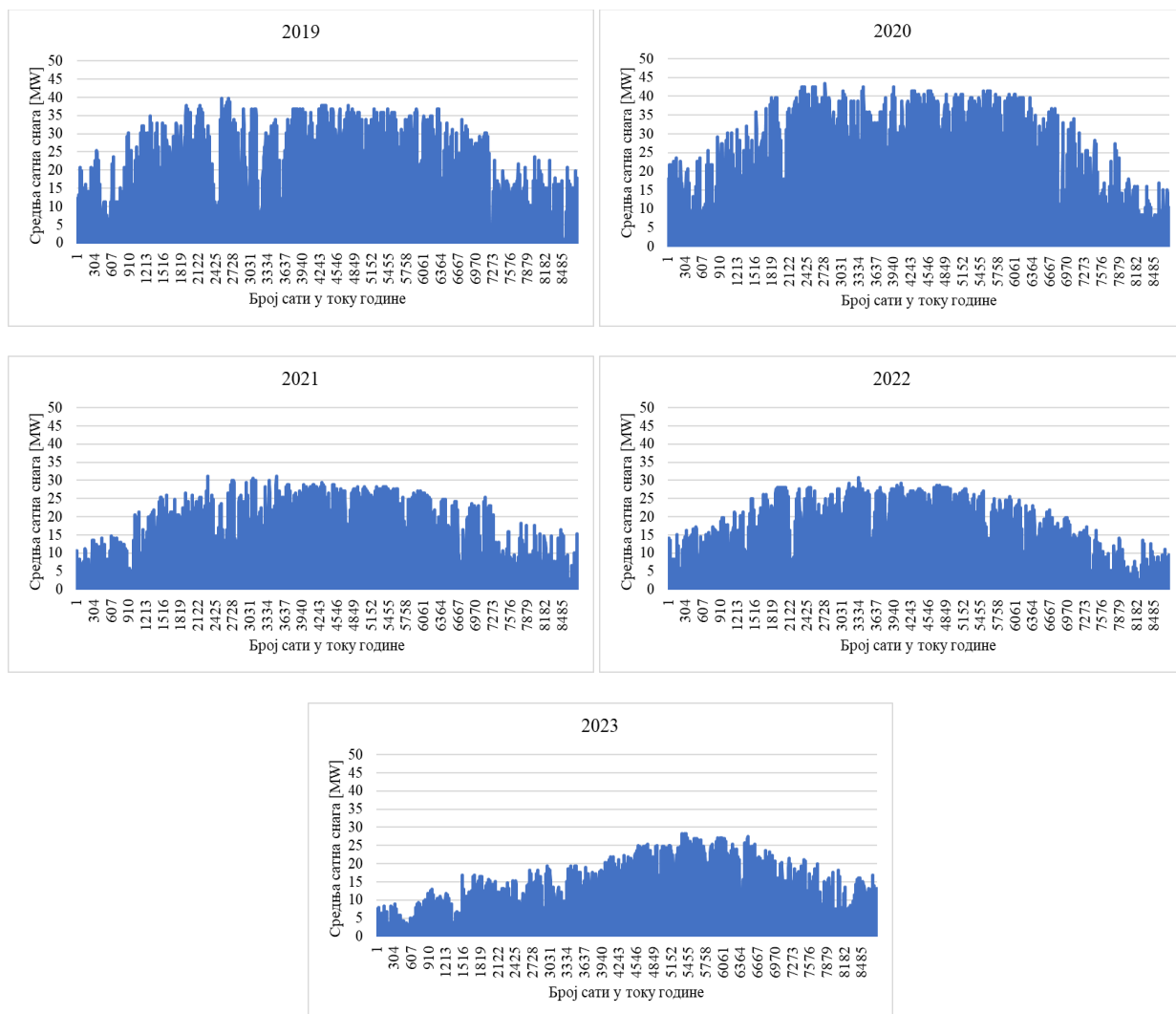
- [1] Ursula von der Leyen, Candidate for the European Commission President, „Political Guidelines for the Next European Commission 2024–2029“, pp. 5,8, [Internet]. Доступно на: https://commission.europa.eu/document/e6cd4328-673c-4e7a-8683-f63ffb2cf648_en
- [2] Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652 [Internet]. Доступно на: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>
- [3] Јадранка М. Јањанин, Жељко Р. Јовановић, Јелена Ј. Обрадовић, „Обновљиви извори енергије као ресурс за куповину електричне енергије за надокнаду губитака у преносном систему ЕМС АД Београд”, „Електропривреда”, Год. 2, Бр. 2, 2024, 49-61, [Internet]. Доступно на: <https://epijournal.eps.rs/radovi/09%20Janjanin-Jovanovic-Obradovic%20Final%20CIR%20za%20publikovanje-v2.pdf>
- [4] Бео чиста енергија д. о. о, [Internet]. Доступно на: <https://www.bcenergy.rs/rs/projekat-jpp-u-oblasti-upravljanja-otpdom-u-beogradu/ciljevi-i-benefiti-projekta/>
- [5] ENTSO-E Transparency Platform, [Internet]. Доступно на: <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show>

- [6] Eurostat, „Municipal waste statistics”, [Internet]. Доступно на: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/10360.pdf>
- [7] ЕМС АД Београд, „Правила о објављивању кључних тржишних података”, [Internet]. Доступно на: <https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/08/Pravila-o-objavljivanju-kljucnih-trzisnih-podataka-preciscen-tekst-20220307-1.pdf>
- [8] Eurostat, „Population on 1 January”, [Internet]. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/demography-2024#population-structure>
- [9] Република Србија Републички завод за статистику, „Кључни показатељи - Процењен број становника на дан 1. јануар 2023. године”, [Internet]. <https://www.stat.gov.rs/sr-latn/oblasti/stanovnistvo/procene-stanovnistva>
- [10] IRENA, [Internet]. Доступно на: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>
- [11] IRENA, [Internet]. Доступно на: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- [12] Solar Power Europe, [Internet]. Доступно на: <https://www.solarpowereurope.org/interests/research-innovation>

ДОДАТАК 1



Слика А.1. Апроксимација средњих сатних вредности производње из електране на ветар инсталисане снаге 30 MW за период 2019–2023. године



Слика А.2. Апроксимација средњих сатних вредности производње из електране на сунце инсталисане снаге 50 MW за период 2019–2023. године

БИОГРАФИЈЕ



Јадранка Јањанин је рођена у Београду. Дипломирала је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на смеру Електроенергетски системи и скоро 20 година ради у оператору преносног система ЕМС АД Београд.

Свој радни век започела је у Дирекцији за управљање преносним системом где остаје до 2012. године, након чега прелази у Дирекцију за тржиште електричне енергије. Тренутно је на позицији руководиоца Сектора за прорачун и набавку електричне енергије за надокнаду губитака у преносном систему. Досадашњим радом је стекла експертизу из области тржишта електричне енергије, а нарочито у вези са набавком и продајом електричне енергије на билатералном и организованом тржишту електричне енергије, прогнозом рада преносног система, процесима планирања и извештавања, енергетским билансом оператора преносног система, доделом преносних капацитета и спајањем тржишта електричне енергије. Члан је Организованог маркетиншког комитета за организовано тржиште електричне енергије у Србији SEEPEX.

У подручју међународне сарадње учествује у радним тимовима и групама у оквиру европске асоцијације ENTSO-E, регионалних група у контексту WB6 и радних тимова које предводе USAID/USEA.



Милан Даниловић је рођен у Ивањици. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на смеру Електроенергетски системи и већ скоро 20 година је активно присутан у самом

врху електроенергетског сектора Републике Србије. Радни век започео је у Диспечерском центру ЕПС-а, Дирекцији за трговину, а затим преко послова стручног сарадника за послове Управног одбора, а затим и Надзорног одбора ЕПС-а, радно искуство стиче у ЕПС Снабдевању на пословима комерцијалног снабдевања.

У својој досадашњој каријери је стекао експертска знања из области планирања и управљања производњом електричне енергије, тржишта електричне енергије са акцентом на снабдевање електричном енергијом, регулаторних питања из области енергетике. Тренутно се налази на позицији члана Савета Агенције за енергетику Републике Србије. Учесник је домаћих и регионалних саветовања из области електротехнике.



Жељко Јовановић је рођен у Чачку. Основне и мастер студије је завршио на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на смеру Електроенергетски системи и 2013. године стиче звање мастер инжењер електротехнике и рачунарства.

У ЕМС АД Београд започиње рад 2014. године у Дирекцији за тржиште електричне енергије, где је и данас запослен. Налази се на позицији шефа Службе за прорачун електричне енергије за надокнаду губитака у преносном систему. Поседује знање из области билатералног и организованог тржишта електричне енергије, са посебним акцентом на прогнозу техничких губитака у преносној мрежи и куповину и продају електричне енергије за њихову надокнаду.

Учесник је домаћих и регионалних саветовања из области електротехнике.

Jadranka M. Janjanin¹, Milan M. Danilovic², Zeljko R. Jovanovic¹

Analysis of Required Monthly Amounts of Electrical Energy Produced from Renewable Energy Sources for Covering Transmission System Losses

¹ EMS JSC Belgrade, Belgrade, Serbia*² Energy Agency of the Republic of Serbia

Professional paper

Highlights

- Variability of average hourly values of technical transmission system losses
- Approximation of power plant production from RES
- Possibility to cover technical transmission system losses from RES

Abstract

The transition to climate neutrality by 2050, the so-called "green" transition is underway and therefore it is important to plan and ensure the sustainability of existing processes. Identification of opportunities and selection of actions are indispensable in planning future work. It often happens that the chosen action does not achieve the desired results, so we have to undergo iterative processes. In order to avoid the application of quick actions and the impossibility of conducting the necessary analyses, it is crucial to observe and design processes in time, especially if they arise from legally defined obligations.

When we talk about the transmission system operator, we recognize the procurement of electrical energy for covering of technical transmission system losses as one of the obligations from the Energy Law. In this paper, we will devote ourselves to a more detailed analysis of the chosen method of procurement of technical transmission system losses from renewable energy sources. The authors of the paper chose wind, sun and waste as sources of electrical energy that they will use in planning the procurement of electrical energy for covering transmission system losses. This paper is a continuation of the analysis that was started in the paper "Renewable Energy Sources as a Resource for the Procurement of Electrical Energy for Covering Transmission System Losses". From the level of looking at the annual needs of electrical energy for covering of transmission system losses produced from renewable energy sources, we go down to the monthly level.

This paper can serve as a guideline for mitigating the overall risks and uncertainties of transmission system operators during procurement of electrical energy for covering technical transmission system losses on the way towards clean energy by 2050. In the paper, we will analyze whether one of the basic principles of the transition, i.e. that the transition to clean energy is objective and inclusive, is justified in the case of transmission system operator.

Keywords

Approximation of production of electrical energy from renewable energy sources,
Climate neutrality, Losses

Received: December 16th, 2024Reviewed: January 16th, 2025Modified: February 1st, 2025Accepted: February 13th, 2025

*Corresponding author: Jadranka Janjanin, +381 64 8408 661

E - mail: jadranka.janjanin@ems.rs

Note:

This article thematically follows on from the text *Renewable Energy Sources as a Resource for the Procurement of Electrical Energy for Covering Transmission System Losses*, which was published on November 1, 2024 in the second, Special Edition of "Electric Power Industry Journal", dedicated to selected award-winning papers at the 36th CIGRE Serbia Conference.



Славица Стојиљковић¹, Владимир М. Шилјут¹

Приказ управљачких система ветрогенератора

¹Акционарско друштво „Електропривреда Србије”, Београд, Република Србија*<https://doi.org/10.18485/epij.2025.3.1.3>

Приказ

Кључне поруке

- Различити начини регулације снаге ветротурбине
- Обезбеђење поузданог и ефикасног рада ветрогенератора при променљивој снази ветра
- Турбина на ветар је инхерентно нелинеарна и варијабилна са временом

Кратак садржај

У овом раду дат је приказ најновије стручне литературе у домену управљачких система ветрогенератора. Детаљније су приказане и објашњене неке технике коришћене у управљању ветротурбинама са хоризонталном осовином на појединачном нивоу турбине, код којих се управљање примењује на нагиб лопатице турбине и снагу генератора. Турбински систем је моделован као флексибилна структура која ради у присуству турбулентних сметњи ветра. Дат је преглед различитих фаза рада турбине и стратегије управљања које се користе за максимизирање претварања енергије при брзинама испод номиналних, али је нагласак на управљању ублаживања аеродинамичких оптерећења када турбина ради на максималној снази. Након прегледа основних циљева управљања турбином рад пружа преглед уобичајених основних приступа линеарног управљања, а затим се описују напредније архитектуре управљања и даје одговор на питање зашто оне могу пружити више предности.

Кључне речи

Брзина ветра, ветрогенератор, линеаризовани модел ветротурбине, регулација снаге ветротурбине, степен искоришћења ветротурбине

Примљено: 22. октобар 2024. Рецензирано: 18. јануар 2025.

Измењено: 10. фебруар 2025. Одобрено: 21. фебруар 2025.

* Кореспондирајући аутор, +381-64-83-33-277, slavica.stojiljkovic@eps.rs

1. УВОД

Ветар је бесплатан и неисцрпан енергетски ресурс. Користи се од давнина. До индустријске револуције ветар је уз дрво био највећи извор енергије. Користио се за покретање бродова, млинова и пумпи за воду. Производња електричне енергије из ветра почела се развијати тридесетих година прошлог века. Тада је почела изградња првих ветроагрегата за конверзију енергије ветра у електричну енергију. Развојем великих хидро, термо и нуклеарних електрана ветроагрегати, економски и технички неконкурентни овим капацитетима, пали су у заборав. Међутим, исцрпивост резерви фосилних горива и еколошки проблеми изазвани њиховом експлоатацијом довели су почетком деведесетих година прошлог века до велике потражње за ветроагрегатима. Енергија ветра је тако постала истакнути извор алтернативне енергије. Ову енергију користе ветротурбине, тако што лопатице њихових ротора прикупљају кинетичку енергију ветра како би произвеле ротациону енергију турбине и електричну енергију из генератора. Данас су ветротурбине један од најпопуларнијих уређаја за производњу чисте и обновљиве електричне енергије и доприносе одрживости електроенергетског система. Стога је оптимално управљање радом ветрогенератора од изузетне важности и представља стратегију која повећава ефикасност, а самим тим смањује сведене трошкове енергије ветропаркова, [1]. Ефективно управљање ветротурбинама је кључно за регулисање производње енергије, а стратегије управљања ветропарковима су усмерене на максимизирање производње енергије према потребама. Овај рад има за циљ да изложи неке основне принципе управљања ветрогенераторима и да да приказ актуелних тенденција у овој области, кроз кратак преглед најновије стручне и научне литературе.

Ветроенергетика је млада грана енергетике која се интензивно развија у погледу технолошког развоја ветроагрегата, али и у погледу њихове изграђене инсталисане снаге. Према подацима истраживачког центра „Ембера“, ветар и солар су у 2023. години произвели преко једне петине електричне енергије у Европској унији (22%). Тако су, први пут у току једне године, постигли гас (20%) и остали изнад угља (16%), [2]. У [3] може да се прочита о највећем ветрогенератору који је почео са радом у Јужном кинеском мору. Што се тиче актуелних дешавања у ветроенергетици у Србији, у [4] може да се види изглед ветрогенератора који су инсталирани у ветропарку Ковачица.

Када је реч о проблематици управљања ветрогенераторима, у [5], у Поглављу 10 – Ветрогенератори, описани су различити начини регулације снага ветрогенератора, као и њихове предности и мане. Управљање ветрогенераторима се

постиче подешавањем параметара ветротурбине, као што су угао окретања (закретања, енгл. *yaw*) ветротурбине у односу на правац ветра, углови нагиба њених лопатица или обртни момент генератора, како би се манипулисало избразданом ваздушном струјом (вртлогом) иза турбине. Наиме, због утицаја ротације својих лопатица, ветротурбина блокира део ветра који би иначе прошао кроз простор њене изградње, па је у подручју иза турбине брзина ветра смањена, а турбуленција повећана. Ово подручје са смањеном брзином ветра може значајно утицати на перформансе турбина које се налазе низводно у ветропарку, јер мање ветра значи мању производњу енергије. Контрола ових вртлога или манипулација њима може помоћи да се смањи њихов негативан утицај на друге турбине у ветропарку, чиме се оптимизује укупна производња енергије.

У литератури су идентификоване две суштински различите методе управљања ветрогенераторима: управљање избразданом струјом (*wake steering*) и мешање избраздане струје (*wake mixing*). Рад [1] се фокусира на упоређивање величина од интереса за турбине, а које се користе у овим методама, на једноставном примеру ветропарка са две турбине. Пратећи чланак [6] фокусира се на величине браздања које су интересантне за систем са једном турбином. У [1] и у [6] користи се исти скуп симулација ветропарка заснованог на високопоузданим симулацијама великих вртлога (*Large-eddy Simulations, LES*) у комбинацији са OpenFAST моделима турбина (*Fatigue, Aerodynamics, Structure and Turbulence* / замор, аеродинамика, структура и турбуленција). Најпре су извршене претходне симулације како би се ускладили услови ветра измерени LiDAR-има² у оф-шор ветропарку уз источну обалу САД. Ова мерења указују на опште услове ветра који показују знатно већи вертикални градијент ветра и његово скретање него било која од LES студија које су урађене о стратегијама управљања ветрогенераторима које су тренутно доступне у литератури. Претходне симулације се користе за процену ефикасности метода управљања. У LES симулацијама, скретање ветра доводи до врло изобличених браздања ваздушних струја иза турбина, што има значајан утицај на стратегију управљања повећањем снаге ветрогенератора. Поред основног контролера, имплементирани су четири различите стратегије управљања, од којих свака користи или контролу нагиба лопатица или контролу угла закретања турбине у односу на правац ветра, на узводној турбини једноставног, двотурбинског ветропарка. Претпостављајући да је правац ветра познат и константан током времена, симулације показују да је управљање браздањем генерално супериорна стратегија управљања ветрогенераторима, узимајући у обзир како производњу енергије у ветропарку тако и еквивалентна аеродинамичка,

² LiDAR (*Light Detection and Ranging*) је технологија која користи светлосне зраке (обично ласерске) за мерење удаљености до објеката и прикупљање података о њиховој позицији, облику и другим карактеристикама. У контексту

ветропаркова, LiDAR-и се користе за прецизно мерење услова ветра, попут његове брзине и правца, како би се оптимизовале перформансе ветротурбина.

механичка оптерећења турбина, која узрокују оштећења (*Damage Equivalent Loads, DEL*) када је присутно значајно скретање ветра. Овај резултат је доследан за различите брзине и правце ветра. Са друге стране, за сличне услове ветра са мањим скретањем, утврђено је да мешање браздања даје највећу производњу енергије, иако на рачун обично већих механичких оптерећења. Ово може имати негативне последице по дугорочни рад ветротурбине. То даље води до закључка у [1] да ефекат скретања ветра, који до сада обично није узиман у обзир, не може бити занемарен приликом одређивања оптималне стратегије управљања ветропарком.

У [7] истражена је стратегија управљања углом закретања ветротурбине, у ветроелектрани са две турбине, снаге од по 3,5 MW, са циљем оптимизације управљања енергијом. Ветроелектрана је опремљена вишераванским системом LiDAR, постављеним на гондоли, за мерење брзине ветра. Користећи аналитички модел и интегришући податке са система LiDAR и SCADA, процењују се ефекти браздања ваздушних струја и излазна снага. Резултати [7] показују повећање снаге од 2% на нивоу једногодишњег посматрања и процене, постигнуто оптималним управљањем углом закретања. Ветар је претежно био југозападни, управан на осу турбине. Оптимално закретање и добитак енергије зависе од услова ветра, с тим да већи интензитет турбуленције и брзина ветра доводе до смањених добитака. Добитак енергије прати звонасту криву у зависности од упадног угла ветра, достижући максимум од 1,7% при оптималном углу закретања од 17 степени и при упадном углу ветра од 12 степени. У [7] препоручују се даља истраживања како би се прецизирале процене и побољшале перформансе ветроелектрана кроз оптимизоване стратегије управљања закретањем турбина, што на крају доприноси унапређењу производње одрживе енергије.

Ветрогенераторе са више роторних система (*Multi-rotor System, MRS*) могу пружити конкурентну алтернативу класичним великим ветротурбинама, због њихових значајних предности у смањењу капиталних трошкова и трошкова транспорта и радова, [8]. Главни изазови MRS ветротурбина укључују сложеност носеће конструкције и математичко моделовање аеродинамичке интеракције између ротора и механизма управљања углом закретања ветротурбине. У [8] коришћен је софтвер MATLAB 2018b/Simulink® за моделовање и симулацију ветротурбине са два ротора (*Twin-Rotor Wind Turbine, TRWT*), а за верификацију излазних података модела коришћена је ветротурбина NREL 5 MW. Као улаз за сваки ротор коришћени су различити насумични сигнали брзина и правца ветра, како би се генерисала различита потисна

оптерећења, изазивајући моменте увијања на главном стубу. Систем управљања углом закретања прилагођен је тако да обезбеди да турбина буде стално окренута према ветру како би се максимизирала излазна снага. Као покретач механизма коришћен је једносмерни мотор. Циљ је био постизање компромиса између поравнања ротора са смером ветра и смањења обртног момента индукованог на главном стубу. У [8] упоређен је одговор линеарног и нелинеарног регулатора на актуатору система за закретање турбине, при различитим брзинама и правцима ветра. Изабрано је управљање клизним режимом (*Sliding Mode Control, SMC*), пошто је он био погодан за нелинеарност система, а његове перформансе су показале бржи одзив у поређењу са PID контролером³ (*Proportional-Integral-Derivative Controller*), са временом смиривања од 0,17 секунди и веома малим прекорачењем у осцилацијама. Овај контролер је користио функцију преноса мотора да би се створила клизна површина. Динамички одговори контролисаног угла су приказани и дискутовани у [8]. Контролер је показао обећавајуће резултате, са погодним одзивом и ниским сигналимашума.

Управљање периодичним избразданим ваздушним струјама (вртлозима) које настају на предњим (уздоним) ветротурбинама остварује се и помоћу стратегија подешавања положаја лопатица, као што је *Helix* приступ, како би се побољшало мешање избразданих струјања и самим тим повећала производња енергије на ветротурбинама које се налазе директно у њиховом вртлогу, [9]. Као резултат тога, циклично оптерећење се не генерише само на лопатицама турбине на којој се врши подешавање већ и на ветротурбини из ње, која је у вртлогу. Док је оптерећење на предњој турбини резултат подешавања положаја лопатица, потребног за мешање избразданих струја, оптерећење на задњој (низводној) турбини настаје из интеракције са периодичним вртлогом и узрокује само оштећења због замора материјала. Студија [9] предлаже две нове шеме управљања појединачним подешавањем лопатица којима се може третирати једно овакво периодично оптерећење на задњој турбини: смањењем или појачањем. Прва метода побољшава животни век задње турбине, док друга додатно побољшава мешање избразданих струја низводно, искоришћавањем већ присутног периодичног садржаја у вртлогу. Обе методе су потврђене у симулацијама високог нивоа тачности на примеру ветропарка са три турбине. Резултати у [9] показују да је смањење оштећења услед замора материјала од око 10% забележено у случају смањења оптерећења, док је додатно повећање снаге од 6% постигнуто на трећој турбини применом стратегије појачања. Оба циља се лако могу променити у

³ Пропорционално-интегрално-диференцијални контролер (PID контролер или трочлани контролер) представља механизам управљачке петље заснован на повратним информацијама који се најчешће користи за управљање машинама и процесима који захтевају континуирано управљање и аутоматско прилагођавање. Обично се користи у индустријским управљачким системима и разним другим

апликацијама где је неопходно стално управљање без људске интервенције. PID контролер аутоматски упоређује жељену циљну вредност (*setpoint, SP*) са стварном вредношћу система (променљива процеса – *process variable, PV*). Разлика између ове две вредности назива се вредност грешке и означава као $e(t)$.

зависности од захтева оператора ветропарка и жељеног компромиса између оптерећења и прикупљања енергије ветра.

У раду [10] предложен је регулатор за ветротурбине заснован на подешавању нагиба лопатица и процењен је утицај примењених стратегија смањења снаге на аеродинамичко оптерећење и расположивост снаге низводно, у експерименталном окружењу. Разматрајући стратегију смањења снаге засновану на закону контроле обртног момента генератора, истражена су два приступа управљању ветропарком: баланс потиска и компензација снаге. Налази из [10] указују на предности балансирања аеродинамичких оптерећења у оквиру ветрофарми, спречавајући засићење турбина и побољшавајући расположивост снаге за 3%–5% у поређењу с униформном испоруком снаге. Такође, укључивање компензације снаге резултује вишим горњим ограничењем у праћењу снаге ветропарка, што указује на побољшање од 22% у расположивости снаге ветропарка. Истраживање описано у [10] наглашава потенцијалне предности иновативних стратегија регулације турбина у циљу оптимизације перформанси ветропарка и унапређења укупне енергетске флексибилности.

У [11] користе се предности нелинеарног модела имплементираних у FAST коду, који представља свеобухватан аероеластични симулатор способан да предвиди и екстремна и заморна оптерећења ветрогенератора са две и три лопатице хоризонталне осе. У раду [12] проучава се линеаризована динамика мапе нагиба лопатица до одклона врха торња у предњем правцу ветротурбине са хоризонталном осом.

За мале ветротурбине постоји неколико метода за управљање лопатицама како би се постигла жељена брзина ротације и излазна снага. Ове методе укључују пасивни застој, активни застој и контролу угла нагиба лопатица, [13]. Управљање нагибом поставља угаону позицију лопатица тако да буду окренуте ка ветру како би се постигао унапред дефинисан однос између брзине турбине или њене снаге и брзине ветра. Обично се користе конвенционални пропорционално-интегрални (PI) контролери за постављање угаоне позиције лопатица ротора или угла нагиба. Ипак, квалитет регулације брзине или снаге може значајно варирати. Рад [13] уводи регулатор брзине ротора за прототип мале ветротурбине са контролом нагиба заснован на концептима фази-логики (fuzzy). Основни принципи фази-система потребни за имплементацију овог типа регулатора детаљно су представљени у [13] како би се надокнадио недостатак таквог материјала у техничкој литератури. База знања фази-регулатора брзине састоји се од *Takagi–Sugeno–Kang* (TSK) фази-правила закључивања која имплементирају додељени PI регулатор за било који жељени интервал брзина ветра. Сваки интервал брзине ветра дефинисан је фази-скупом. Симулација експеримената показује да TSK *fazi-PI* регулатор брзине може да надмаши конвенционални PI регулатор у брзини и тачности одговора, стабилности и робустности у целокупном опсегу рада прототипа ветротурбине.

У раду [14] упознајемо се са методом моделирања турбине као система крутих тела са флексибилним

везама. У раду [15] анализиран је Кејнов (*Kane*) метод за нумеричку симулацију кинематике модела турбине. У раду [16] дата су аеродинамичка оптерећења која су израчуната у програму *AeroDyn*. У раду [17] дат је преглед различитих фаза рада турбине и стратегија управљања које се користе за максимизирање претварања енергије при брзинама ветра испод номиналних, али нагласак је на управљању да би се ублажила оптерећења када турбина ради на максималној снази. У раду [18] дат је преглед просторних региона рада ветрогенератора, а фокус је на методама за регулацију брзине и ублажавању оптерећења конструкције.

Рад [19] предлаже модел за управљање ветротурбином која је повезана са мрежом помоћу синхроног генератора са трајним магнетима (*Permanent Magnet Synchronous Generator*, PMSG). С обзиром на то да се брзина ветра стално мења, роторски систем мора бити у могућности да се самоподеси у зависности од брзине и правца ветра како би се обезбедио ефикасан рад турбине. PMSG је одабран јер је магнетни флуks увек доступан захваљујући систему трајних магнета који су причвршћени за површину ротора. Генератор производи енергију при ниској брзини ротације, али са високом ефикасношћу. Ово су кључне предности коришћења PMSG за ветротурбину. За дизајн регулатора коришћен је MATLAB – Simulink софтвер, а резултати истраживања описаног у [19] показали су да овај систем управљања задовољава захтеве квалитета енергије приликом повезивања са мрежом и оптимизује процес претварања енергије турбинског ветра.

Емулатор ветротурбине је вредан алат који омогућава физичку симулацију понашања ветротурбине у реалном времену користећи специјализовану експерименталну тестну опрему, пружајући контролисано окружење за истраживање и развој, [20]. Једна од значајних предности коришћења овог алата је његова способност да тестира алгоритме управљања дизајниране за добијање максималне снаге ветротурбине. Рад [20] заправо представља наставак претходног рада, [21], на развоју емулятора мале ветротурбине са променљивом брзином, засноване на генератору са трајним магнетима за самосталну примену. У [20] представљена су унапређења постигнута на овом емулятору. Ова побољшања омогућавају процену стратегије управљања праћењем тачке максималне снаге (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT), дизајниране за оптимизацију снаге која се добија из ветротурбине.

Рад [22] представља детаљну студију стратегија управљања ветротурбинама које комбинују технике MPPT, користећи управљање брзином обртања ради оптимизације производње енергије. Достижање максималне излазне снаге из ветротурбина захтева ефикасне методе које се прилагођавају променљивим условима ветра. Најпре, [22] даје преглед конвенционалних MPPT метода, истичући њихове предности, али и ограничења у раду са динамичним профилима ветра. Затим [22] уводи интегрисани приступ, у ком се управљање брзином комбинује са

МРРТ, са циљем побољшања времена одзива и ефикасности прикупљања енергије из ветра. Резултати симулације показују да додавање у модел управљања брзином значајно побољшава перформансе ветротурбине. То резултира повећањем излазне снаге кроз брже време одзива, смањујући га са 65 секунди на само 2 секунде. Овај интегрисани приступ, МРРТ – управљање брзином, показује свој значај у оптимизацији снаге ветротурбина, посебно у променљивим условима ветра.

У [23] дат је преглед циљева и дизајна линеарних контролера који користе детерминистичке приступе примењене на управљање нагибом лопатица и обртним моментом. Такође, демонстрирано је како било која повратна архитектура може бити унапређена повратним компензатором сметњи, користећи мерења ветра која могу бити доступна помоћу нових технологија које се очекују у будућности.

У Поглављу 2 овог рада дат је кратак приказ историјског развоја и различитих врста и типова ветрогенератора, а у његовим потпоглављима и приказ начина регулације снаге ветротурбина. У Поглављу 3 нешто детаљније је дат преглед концепата управљања ветрогенераторима, са посебним освртом на управљање у појединачним регионима (зонама) рада ветротурбина са променљивом брзином обртања. На крају рада дати су генерални закључци.

2. ВЕТРОТУРБИНЕ

Постоје различите конструкције ветрогенератора. Циљ је да се постигне што већи степен искоришћења и стабилан рад у што ширем опсегу брзина ветра. Развој ветрогенератора је још увек интензиван.

Постоје ветрогенератори са:

- вертикалном осовином;
- хоризонталном осовином.

Код ветротурбина са вертикалном осовином ветар струји нормално на осу ротације, па се оне не морају усмеравати према смеру дувања ветра. Код њих се генератор поставља у подножје турбине, те нису потребни јаки торњеви. Вертикално вратило има Даријусова турбина, Слика 1 (а). Име је добила по инжењеру Џорџу Даријусу (George Darrius, патент из 1931. године). Даријусова турбина се обично гради са два или три лука. Ветрогенераторе са вертикалном осовином генерално имају низак степен искоришћења, па се из тог разлога данас практично не користе за ветроагрегате већих снага.

Ветрогенераторе са хоризонталном осовином могу бити постављене уз и низ ветар. Ветрогенераторе постављене низ ветар се саме прилагођавају смеру ветра. Недостатак им је што лопатице при ротацији пролазе кроз заветрину стуба, чиме се стварају механичке вибрације и бука. Осим тога стуб ствара и турбуленције што смањује ефикасност ветротурбине, па се овај концепт не користи за веће снаге.

Модерне ветротурбине се граде са хоризонталном осовином која има систем за закретање осовине у хоризонталној равни за тражење промене смера ветра. Могу имати различит број лопатица, али се за веће снаге најчешће користе три лопатице јер дају највећи

степен искоришћења, Слика 1 (б). Пречник ротора (радног кола или елисе) ових турбина зависи од снаге и креће се од 30 m за снагу од 300 kW до 180 m за снагу од 7 MW. Како се ова технологија константно развија, данас постоје и ветротурбине већих капацитета.

Ветрогенератор се поставља на вертикални стуб који, у зависности од пречника ротора турбине, може бити висок и преко 150 m. Стуб се најчешће гради као челични конусни, а ређе као челично-решеткасти.

Тренутно највећи ветрогенератор на свету, MySE 16-260, коју је развила компанија Ming Jang, средином јула 2023. године почео је са радом у Јужном кинеском мору, [3]. Према компанијском саопштењу, пречник ротора овог циновског ветрогенератора износи 260 m, док су лопатице дугачке 123 m. Висок је 152 m, али поред величине, импресивна је и снага ветрогенератора која износи 16 MW.



(а)



(б)

Слика. 1. (а) Даријусова (Darrius) турбина;
(б) трокрака ветротурбина са хоризонталном осовином, [3]

Претварање кинетичке енергије ветра у обртно кретање турбине врши се захваљујући аеродинамичком профилу лопатица ветротурбине. Као код авионских крила, лопатица турбине има

аеродинамички профил, те ваздух са задње стране лопатице струји брже од ваздуха са предње стране, гледано у смеру ветра. Услед разлике у брзинама струјања ваздуха јавља се разлика у притисцима са задње и предње стране лопатице турбине, што узрокује узгонску силу, чија пројекција на раван ротације генерише обртни момент. Поред ове силе, делује и сила директног притиска ветра на лопатицу, али је њен утицај на обртни момент много мањи.

Енергетски посматрано, ветротурбина одузима енергију ветру која је сразмерна разлици кинетичких енергија ветра пре и након проласка кроз турбину. Снага којом се врши претварање енергије ветра, односно механичка снага P_{meh} коју развија ветротурбина на свом вратилу може да се представи следећом једначином:

$$P_{meh} = \frac{1}{2} C_p \rho R^2 v^3, \quad (1)$$

где су:

v – брзина ветра на улазу у ветротурбину;

R – полупречник ветротурбине;

ρ – густина ваздуха;

C_p – коефицијент искоришћења снаге ветротурбине, који се дефинише као однос механичке снаге ветротурбине према одговарајућој снази ветра P_v на улазу у ветротурбину, ($C_p = \frac{P_{meh}}{P_v}$).

Максимална теоријска снага коју ветротурбина може развити дефинисана је Бецовим (Betz) законом. Беџ је показао да се максимална снага идеализоване ветротурбине постиже ако је однос брзина ветра пре (v)

и након (v') проласка кроз турбине, $\frac{v'}{v} = \frac{1}{3}$. При овом

односу брзина ветра степен искоришћења снаге има максималну вредност, $C_{pmax} = 0,5926$. Теоријски максимум степена искоришћења енергије ветра у ветротурбини је 59%. За стандардну густину ваздуха $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, израз (1) даје:

$$P_0 = 0,369 A v^3 \quad (2)$$

где је $A = R^2 \pi$ површина круга који при обртању направе лопатице, а R је полупречник тог круга.

При некој брзини ветра, променом брзине обртања ветротурбине ω_{tur} мења се упадни угао релативне брзине ветра, те се мења сила узгона и степен искоришћења снаге, C_p . Обично се C_p даје у функцији параметра TSR (*Tip Speed Ratio*) односно λ :

$$\lambda = \frac{\omega_{tur} R}{v}, \quad (3)$$

који представља однос брзине врха лопатице и брзине ветра, v . Дакле, $C_p = f(\lambda, \beta)$, где је β – нагиб лопатица ветрогенератора, у ($^\circ$), у односу на упадни угао правца дувања ветра.

При промени брзине ветра потребно је мењати брзину обртања ротора ветрогенератора да би се постигао режим са највећим степеном искоришћења. Зато савремени ветроагрегати великих снага раде са променљивом брзином обртања. Када ветрогенератор покреће турбина којој се брзина обртања не може мењати, та брзина се бира тако да степен искоришћења буде највећи при доминантној брзини ветра на месту инсталације ветроагрегата.

С обзиром на (3), турбине мањег пречника имаће већу оптималну брзину обртања од турбина већег пречника при истој брзини ветра. Зато ветротурбине ветроагрегата мање снаге имају већу брзину обртања.

Постоје различити начини регулације снаге ветротурбине, како је описано у наставку.

2.1 Регулација конструкцијом лопатица

Ово је пасивни систем регулације снаге ветротурбине. Постиге се конструкцијом лопатица ветротурбине. Лопатице су конструисане тако да при брзинама ветра блиским номиналној брзини v_n , нападни угао ветра, α , на одређеном делу лопатица постане релативно велики ($15^\circ \div 20^\circ$). При том нападном углу струје ваздуха се одвајају од профила лопатице и започиње турбуленција, те сила узгона слаби. Ово се назива стол-ефекат (*stall*). Са порастом брзине ветра, стол-ефекат постаје израженији и захвата све већи део лопатице. Турбуленција смањује узгонску силу и снагу ветротурбине. Мана овог начина регулације снаге је та што он није у потпуности контролисан, а карактерише га опадање снаге турбине испод номиналне вредности након појаве стол-ефекта. Стол-ефекат се може појавити и при нижим брзинама ветра од номиналне уколико су лопатице ветротурбине задржане или оштећене. Предности овог начина контроле су једноставност и ниска цена. Користи се углавном код ветротурбина са константном брзином обртања, [5].

2.2 Регулација закретањем лопатица

Користи се за ветроагрегате веће снаге са променљивом брзином обртања. Лопатице ветротурбине закрећу се помоћу хидрауличног сервомотора. Опсег промене угла лопатице (*pitch angle*, β) је 0° до 35° . Закретањем лопатица мења се нападни угао ветра, те се мења узгонска сила односно снага ветротурбине. Закретање лопатица ветротурбине је аналогно закретању лопатица обртног кола код Капланових хидротурбина. Закретањем лопатица при покретању ветротурбине подешава се нападни угао ветра тако да се постигне највећи полазни момент. Предност овакве регулације је контролисативност, а мане су сложен механизам и висока цена, [5].

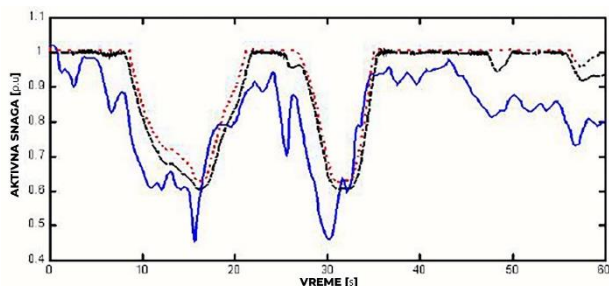
2.3 Регулација закретањем и конструкцијом лопатица

Ово је комбинација претходна два начина регулације, па се назива *Combi Stall* регулација. Код овог система опсег промене угла закретања је мали.

Циљ је да се елиминишу негативни ефекти стол-регулације. Овај и претходни систем регулације штите ветроагрегат у случајевима непланираног искључења са мреже или кратког споја у мрежи при јаком ветру. У таквим случајевима долази до растерећења ветрогенератора и повећања брзине обртања ветроагрегата. Услед великих центрифугалних сила може доћи до хаварије. При брзинама ветра већим од максималне радне брзине ветроагрегат се из сигурносних разлога зауставља и одржава у закоченом стању помоћу хидрауличне диск кочнице која је смештена на високобрзинској (генераторској) осовини, [5].

Основни проблем при претварању енергије ветра у електричну је обезбеђење поузданог и ефикасног рада ветрогенератора при променљивој снази ветра. Ефикасан рад ветроагрегата захтева прилагођавање ветротурбине брзини ветра тако да се оствари максималан степен искоришћења уз задовољење електричних и механичких ограничења. При великим варијацијама брзине ветра, јавља се проблем нестабилног рада ветроагрегата, али и електричних величина које он генерише (напонски фликери – пропади напона, ниво хармоника и слично). Зато се у ветроагрегатима не могу користити стандардни синхрони генератори и стандардни системи управљања и регулације какви се примењују у хидроелектранама и термоелектранама где је могуће планирати снагу агрегата.

Поређење карактеристика генерисања активне снаге различитих типова ветрогенератора, у условима стохастичке промене брзине ветра, илустровано је на Слици 2. На њој су дати резултати симулације рада ветротурбине која погони различите ветрогенераторе.



Слика 2. Карактеристике генерисања снаге ветроагрегата са разним типовима ветрогенератора, [5]

Графици на Слици 2 односе се на следеће случајеве:

- 1 – ветрогенератор је индукциони генератор са краткоспојеним ротором директно прикључен на мрежу; турбина је регулисана конструкцијом лопатица (*stall* регулација);
- 2 – ветрогенератор је двострано напајани индукциони генератор са променљивом брзином обртања; турбина је регулисана закретањем лопатица (*pitch* регулација);
- 3 – ветрогенератор је синхрони спороходни генератор са перманентним магнетима; турбина је регулисана закретањем лопатица.

3. ПРЕГЛЕД КОНЦЕПАТА УПРАВЉАЊА КОД ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

У овом одељку ћемо размотрити модел структуралне динамике турбине и посматраћемо генератор као једноставни статички (јединични) појачавач који тренутно преводи командовани обртни момент у механички обртни момент. Турбина на ветар је инхерентно нелинеарна и варијабилна са временом. Аеродинамичка торзија и моменти савијања зависе нелинеарно од брзине ветра, угла нагиба и савијања торња и лопатица. Одговарајући резултати су постигнути коришћењем линеарних, временски инваријантних модела турбине. Многи од ових модела су аналитички развијени линеаризујући модел турбине у одређеној радној тачки користећи теорију момента елемента лопатице. За детерминисање аеродинамичких оптерећења користи се метод претпостављених модова савијања модела турбина, [12]. Други метод је моделовање турбине као система крутих тела са флексибилним везама, [14] – приступ који може да користи теорију момента елемента лопатице (*Blade Element Momentum*, BEM) за аеродинамичка оптерећења.

У [16] усвојене су предности нелинеарних модела имплементираних у FAST коду, [11], који користи Кејнов (Kane) метод, [15], да нумерички симулира кинематику модела турбине засновану на претпостављеним модовима и BEM теорију са аеродинамичким оптерећењем израчунатим у програму *AeroDyn*. FAST симулира турбину у константним (а по могућству – неравномерним) условима ветра у потрази за решењем које се мења само као функција позиције ротора и затим одређује линеаризовани модел израчунавањем коефицијената који дефинишу поремећаје конфигурације система у односу на скуп одређених улазних поремећаја.

Линеаризацијом се добија кинематички модел система у облику:

$$M(Q)\Delta\ddot{q} + C(Q)\Delta\dot{q} + K(Q)\Delta q = F(Q)\Delta u + F_d(Q)\Delta v_d \quad (4)$$

где су коефицијенти M , C , K зависни од радне тачке и могу бити параметризовани позицијом азимута ротора, Q . Вектор конфигурационих променљивих Δq представља девијацију турбине од номиналне радне тачке (при свакој позицији ротора). Најсложенији модел турбине који се овде користи укључује јединствен степен слободе генератора (*Degree of Freedom*, DOF), флексибилни мод погона и мод лепршања за сваку од три лопатице. FAST подржава до 24 степена слободе кретања за тролопатичну турбину. Вектор Δu представља девијације нагиба лопатице и/или торзију генератора од њихових номиналних нивоа, а Δv_d представља девијације у чвору брзине ветра (која се појављује јединствено по површини ротора). Систем се може представити у форми простора стања:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(Q)x + B(Q)u + B_d(Q)v_d \\ \dot{y} &= C(Q)x + D(Q)u + D_d(Q)v_d\end{aligned}\quad (5)$$

где $x = [\Delta q^T \Delta \dot{q}^T]^T$ представља девијацију у позицији или брзини конфигурационих променљивих. Излазни вектор u може садржати сваку вредност која се може одредити из стања система. Бележимо поремећаје брзине високобрзинског вратила и лопатице и момента закривљења сваке лопатице. Будући да све променљиве представљају поремећаје далеко од њихових номиналних вредности, одбацујемо Δ ради поједностављења. Коефицијенти матрице у (4) – (5), за било коју одређену радну тачку у константним (али не и неопходно униформним) условима ветра, добијени су нумеричком линеаризацијом коју спроводи FAST.

У [23] процењен је модел турбине на примеру турбине од 600 kW, са три лопатице, уз ветар, променљиве брзине, хоризонтално осне CART3 турбине (*Control Advanced Research Turbine* – истраживачка турбина са напредним системом управљања) која се налази у националној лабораторији за обновљиву енергију (NREAL). Турбина CART3 има процењену брзину ротора од 41,7 o/min, док се фреквенција нискобрзинске осовине (повезане са ротором) степенасто увећава уз помоћ мултипликатора тако да високобрзинска осовина и генератор раде на номиналној брзини од 1800 o/min.

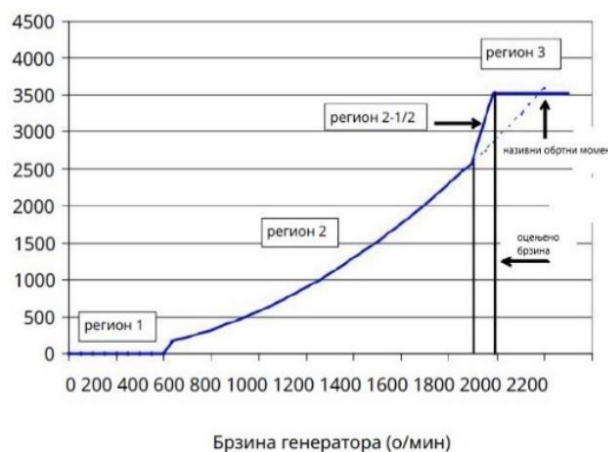
Промене у линеаризацији модела турбине зависе од радне тачке (укупна брзина ветра, брзина ротора и лопатица, нагиба) с обзиром на то да турбине раде у различитим регионима (деловима погонског дијаграма).

За типичне ветротурбине постоје различити региони рада, илустровани на Сlici 3. У региону 2, испод номиналне брзине ветра, циљ је максимизирање снаге турбине. У региону 3, изнад номиналне брзине ветра, циљ је да се снага турбине одржи на константном нивоу, да се ограничи оптерећење турбине и снага генератора. Остали региони рада укључују покретање (регион 1) и гашење машине, [17]. Ови се региони могу генерално описати како следи у наставку, [18].

У региону 1 брзина ветра је премала да гарантује покретање турбине. Лопатице су постављене тако да имају пун захват (степен угла генерише најмањи аеродинамички момент). Када у једном тренутку брзина ветра буде довољно велика за покретање машине (преко 5 m/s за CART3), лопатице су нагнуте под углом наведеним за регион 2. При номиналном нагибу аеродинамички узгон је усмерен тако да произведе обртни момент и убрза ротор. Када генератор достигне брзину од 430 o/min за CART3, генератор обртног момента је укључен и турбина почиње обртање генератора, а он производњу електричне енергије.

У региону 2 брзина ветра и обртни момент генератора су испод номиналних вредности. Нагиб лопатица, β , одржава се константним на оптималној вредности, β^* , која даје максимални аеродинамички обртни момент. За било коју брзину ветра постоји одговарајућа брзина ротора при којој се генерише највећи могући аеродинамички обртни момент, τ_a .

Показује се да, када је степен лопатица одржаван оптималним, постоји константна вредност или λ (тј. TSR), (3), који максимизира аеродинамички обртни момент τ_a . Обично су функција TSR и нагиб део аеродинамичких сила добијених од укупне снаге ветра када је она максимална, $\lambda = \lambda^*$. Дакле, циљ управљања у региону 2 јесте достићи обртни момент при коме брзина врха лопатице прати брзину ветра, v , на начин да се постигне оптимална вредност TSR, λ^* .



Слика 3. Радни региони турбина са променљивом брзином, [17]. Обртни момент турбине у функцији брзине генератора

У региону 2-1/2 брзине ветра се приближавају онима које обезбеђују номиналну снагу. Ово је прелазни регион где се командни обртни момент обично рачуна као слична функција брзине генератора тако да је номинални обртни момент достигнут пре номиналне брзине генератора.

Брзина обртања генератора је често једина мера и за обртни момент и за управљање нагибом лопатица ветрогенератора. Надзор над управљањем може имати додатне мере, укључујући и мерење брзине ветра уз помоћ анемометра. Напредније турбине могу такође укључивати индивидуална мерења момента савијања лопатице, [23].

У региону 3 брзина ветра је 11,7 m/s или преко те вредности (за CART3), оне која ће генерисати номиналну снагу. Обртни момент генератора се одржава константним, на номиналној вредности, и управљање нагибом лопатице се користи да ограничи аеродинамичку снагу регулисањем брзине турбине на номиналној вредности брзине. Напредне контроле су такође дизајниране тако да смање оптерећење на лопатице и торањ.

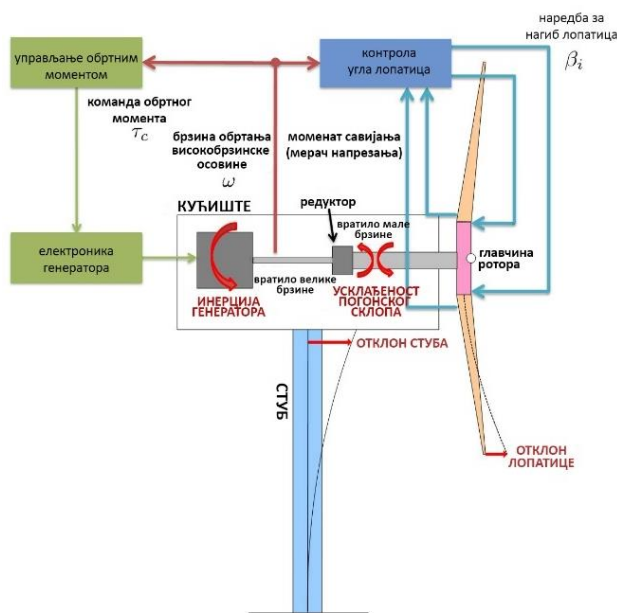
Користећи скуп описа различитих стања из FAST, истражујемо како се линеаризовани модели мењају у зависности од радне тачке уз процену фреквентног одзива система на различитим тачкама. Прво, користимо FAST да линеаризујемо турбину у свакој од 36 позиција ротора, док турбина ради на просечној брзини од 41,7 o/min и при константном нагибу лопатице од 12,6°, али са различитим профилима ветра. Два скупа линеаризације су добијена у

временски константним условима ветра у линији са кабином и имајући просечну брзину од 18 m/s преко равни ротора. Међутим, за један скуп линеаризације услови ветра су униформни, а за други скуп ветар вертикално струји, тако да се хоризонтална брзина ветра на дну ротора разликује од оне на врху за 40%.

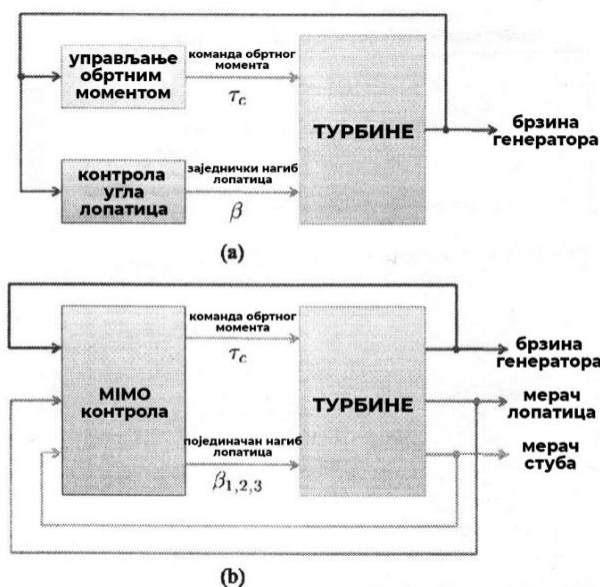
Све чешће модерне турбине имају индивидуалне актуаторске системе за подешавање нагиба на свакој лопатици, чиме се повећава број контролних улаза доступних дизајнеру система у односу на традиционално управљање обртним моментом. Команде за нагиб индивидуалних актуатора приказане су шематски на Сlici 4. Поред тога, сензори за силу/момент или акцелерометри могу се инсталирати на свакој лопатици појединачно, као и на гондоли и стубу. Ови додатни улази и излази, у комбинацији са чињеницом да структурални модови турбине утичу на погонски склоп и актуацију нагиба путем обртног момента и момента савијања (отклона), чине ветротурбину једним инхерентним системом са више улаза и више излаза (MIMO). Заправо, како величина турбине расте и разматрања тежине/трошкова мотивишу прилагођавање већој флексибилности, постаје све важније узети у обзир међусобно повезивање различитих структуралних модова и користити софистицираније методе управљања како би се носили са овим ефектима. Даље, повећана флексибилност структура турбине ставља акценат на задатак смањења штетних оптерећења у кореновима лопатица и на бази стуба, [23].

Напредне методе управљања за решавање ових проблема истраживане су већ више од деценије, али очигледно се већина комерцијалних система још увек имплементира користећи више једноструких контрола са једним улазом и једним излазом (SISO⁴). На пример, Слика 4 приказује два различита контролера за петље управљања генератором и управљања нагибом; ако су команде за нагиб идентичне и засноване само на брзини високобрзинске осовине, онда ова конфигурација садржи два SISO контролера који раде независно један од другог, као што је приказано на Сlici 5(a).

Супротно томе, напредни приступи управљања одликују се тиме што се несигурност система експлицитно узима у обзир при његовом пројектовању, дизајнира се контролер са више улаза и излаза (MIMO⁵) који узима у обзир међусобно повезивање између петљи, Слика 5(b), или се користи робусна MIMO метода. Такође, постоје и методе које користе адаптивне или нелинеарне технике, [23].



Слика 4. Уобичајена управљачка петља турбине, [23]



Слика 5. Регулација ветротурбина, [23]

(a) Традиционално управљање турбином, засновано на повратној информацији о брзини генератора. Обртни момент и угао лопатица (нагиб) третирају се као одвојене SISO петље;

(b) MIMO контрола је обележје контролера у [23]; контролер има приступ појединачним мерењима угла лопатице и повећању брзине генератора

⁴ SISO (Single-Input Single-Output) традиционални је дизајн система управљања код кога свака управљачка петља ради независно. На пример, може постојати засебан регулатор за нагиб лопатица ветротурбине и за генератор. Међутим, ово може бити неефикасно када петље међусобно утичу једна на другу (промене у једној петљи могу утицати на другу), што доводи до субоптималног учинка.

⁵ MIMO (Multi-Input Multi-Output) системи могу истовремено управљати већим бројем улаза и излаза. Ово је од кључног значаја за системе као што су ветротурбине, где су различите променљиве, као што су нагиб лопатица и обртни момент, међусобно повезане. MIMO регулатор је дизајниран да управља овим интеракцијама и побољша укупни учинак система.

Проблеми које решавају напредне методе управљања су несигурност система (услови ветра су непредвидиви), повезаност између контролних петљи, робустност (чини систем отпорнијим на сметње и промене параметара).

Еволуција система управљања ветротурбинама описана је у [23], показујући прелаз са традиционалних, независних SISO петљи на софистицираније, интегрисане MIMO системе. Ови напредни приступи – који укључују адаптивне, нелинеарне и робусне стратегије – нуде потенцијал за много бољу ефикасност и робустност, посебно у суочавању са стварним несигурностима као што су варијације у ветру. Такође, интеграција мерења ветра у управљачки систем може значајно побољшати његову способност да проактивно одговори на сметње, чинећи ветротурбине поузданијим и ефикаснијим.

Фреквентни одзив на поремећај брзине високобрзинске осовине генератора (*High-speed Shaft Velocity*, HSSV) и момента савијања у корену лопатица израчунати су за нагиб поремећаја (пертурбације) заједно за све лопатице. Овај прорачун је урађен за линеаризован модел на свакој позицији азимута. Слика 6 показује криву величине одговора добијених налажењем минималних и максималних добитака на свакој фреквенцији, за све одговоре. Горњи дијаграм описује одговор HSSV, а доњи дијаграм приказује одговор момента савијања.

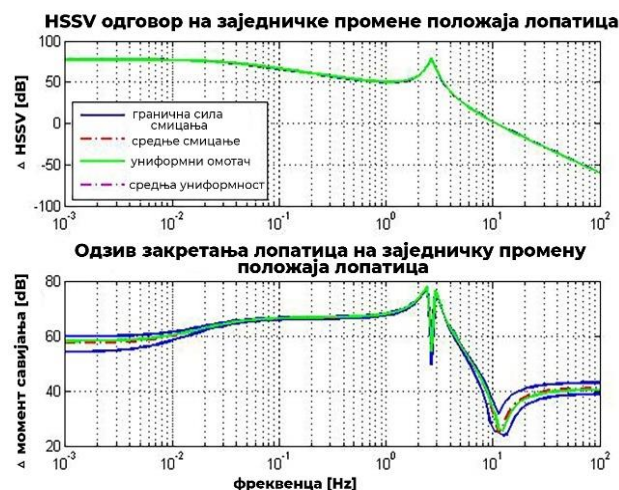
На доњем дијаграму, плава пуна линија означава криву модела добијених у присуству вертикалног струјања, а зелена пуна линија означава криву добијену из модела у равномерним условима. Средњи модел представља турбину са свим угловима азимута, добијен нумерички, у просеку за сваки коефицијент матрице (5). На Сlici 6 одговор средњих модела обележен је испрекиданом црвеном линијом, а љубичаста линија представља смицање и равномерне услове, редом.

Слика 6 приказује да су веома мале вредности варијације у одговору момента савијања и практично нема битних варијација у одговору HSSV. Минималне варијације добијене у одговорима указују да средњи модел (упросечен за све позиције ротора) може бити довољан као основа за пројектовање система управљања.

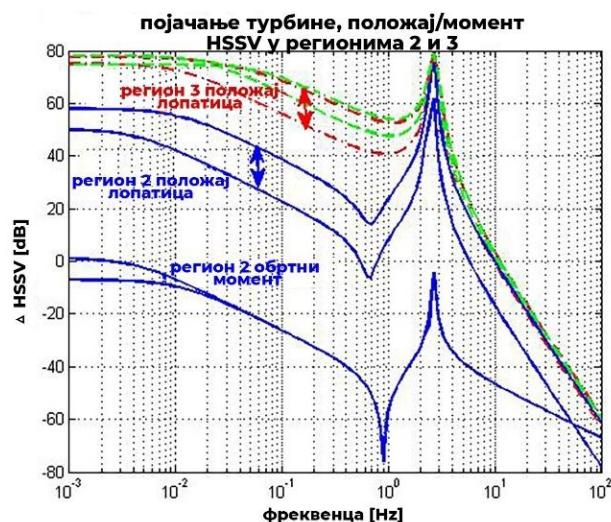
Даље, вршена су испитивања [23] варијација у средњим моделима за широк опсег радних тачака у односу на HSSV одговор на поремећај у нагибу и обртном моменту, али у равномерним условима ветра. Слика 7 приказује криве добијене из просечних модела за вредности брзина генератора испод номиналних (регион 2) и при номиналним условима (регион 3) за различите нивое брзине ветра (униформно, без смицања). У региону 2, где је брзина регулисана преко обртног момента генератора, постоји правилан износ неслагања у одговору турбина. Две криве на Сlici 7 за рад турбине у области региона 2 показују одговор у HSSV због поремећаја обртног момента генератора и нагиба лопатица, редом.

Поред тога, постоје и две криве приказане на Сlici 7, за рад турбине у региону 3. Једна крива је за радне

тачке при различитим брзинама ветра, са нагибом подешеним да одржава номиналну брзину ротора, а друга је за различите углове нагиба са брзином ветра од 18 m/s који се могу појавити током одговора на пролазне нагибе. У региону 3 брзина је регулисана подешавањем угла нагиба лопатица, а мање промене се добијају у просечним линеарним моделима преко очекиваних радних тачака. Ово сугерише да је довољан један контролер када турбина ради при номиналној снази.



Слика 6. Анализа линеарног модела турбине у зависности од позиције азимута ротора, [23]



Слика 7. Поремећаји у одговору HSSV за различите регионе рада и брзине ветра, [23]

Оба дијаграма приказују минимум и максимум (криве) реакције на заједничке поремећаје нагиба на свим позицијама ротора. Одговор високобрзинске осовине (HSSV) на нагиб (горњи дијаграм) веома је независан од позиције ротора, док момент савијања лопатица (доњи дијаграм) показује извесну зависност азимута у присуству смицања, [23].

Доње две криве на Сlici 7 (пуне плаве линије) показују промене у одговору на обртни момент и поремећаје нагиба преко опсега брзине ветра

(5-13 m/s), региона 2. Горње две криве (испрекидане црвена и зелена) показују промене у одговору на поремећаје нагиба преко различитих радних тачака региона 3. Постоје велика неслагања у одговору HSSV на нагиб турбине кроз регион 2 (5-13 m/s). У региону 3, где је нагиб прилагођен одржавању брзине ротора од 41,7 o/min, одговор HSSV мање варира, и са променом брзине ветра (зелена крива, 16-24 m/s) и са нагибом (црвена, 4-18°, брзина ветра од 18 m/s), [23].

3.1 Стандардно управљање ветротурбином

3.1.1 Управљање у региону 2

У региону 2, обртни момент који постиже генератор добија се као функција брзине ротора:

$$\tau_c = K\omega^2 \quad (6)$$

где је појачање:

$$K = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_*^3} \quad (7)$$

ρ је густина ваздуха, а C_{pmax} је оптимални коефицијент снаге, $C_{pmax} = f(\lambda^*, \beta^*)$. По конвенцији, позитиван τ_c је у правцу који успорава ротор, тако је (6) начин како јача обртни момент и може се показати да доприноси стабилном систему затворене петље, [17]. Како се мења брзина ветра тако ротор убрзава због аеродинамичке разлике и обртног момента генератора. Подешавање обртног момента генератора у складу са (6) узрокује да брзина ротора буде подешена исто тако као у условима константног ветра, тј. λ^* је достигнуто. Овај закон управљања (који је статички и пре је одређен апсолутном брзином него брзином поремећаја) може бити проширен додатним динамичким компензацијама за смањење оптерећења, [16].

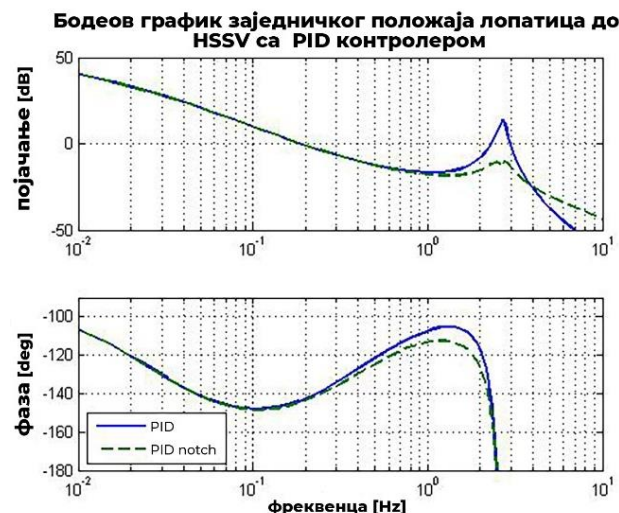
3.1.2 Управљање у региону 3

Позивајући се на Сliku 4, брзина генератора се мери и одговара и обртном моменту и нагибу. Класична техника PID контролера обично се користи за израду контролера нагиба лопатице у региону 3, [23], за регулисање брзине турбине, за различите услове ветра. У овом случају, поремећај ΔQ номиналног нагиба рачуна се као:

$$\Delta Q(s) = \left[K_p + \frac{K_1}{s} + \frac{K_D s}{s\tau + 1} \right] \Delta \omega(s) \quad (8)$$

где је $\Delta \omega$ грешка брзине обртања генератора или грешка брзине обртања ротора. Користећи само грешку брзине ротора као повратну информацију, команда нагиба ΔQ обавезно је заједничка (исти је за све лопатице). Појачања K_p , K_1 и K_D бирају се тако да дају жељене карактеристике затворене петље. Често су стандардни PID контролери проширени (умножени) функцијама нивоа преноса да додају пригушење познатих резонанци.

Пример употребе PID контролера за филтрирање врхова је да треба да пригушује препознате резонанце погонског склопа које су приказане на сликама 6 и 7, са пригушењем од 2,8 Hz. Појачање петље за PID контролере заједно са регионом 3, линеаризовани је модел приказан на Сlici 8. Врх даје пригушење резонанце тако да се пресек петље може поставити на 0,2 Hz уз задржавање више од 10 dB маргине појачања на вишим фреквенцијама.



Слика 8. Употреба PID контролера за филтрирање врхова, [23]

4. ЗАКЉУЧАК

Ветротурбине су сложени, нелинеарни, динамички системи изложени гравитацији, стохастичким сметњама ветра и гравитационим, центрифугалним и жirosкопским оптерећењима. Аеродинамика ветротурбина је нелинеарна, нестабилна и сложена. Ротори турбина су подвргнути компликованим 3D турбулентним пољима дотока ветра.

Исправна карактеризација тока ветра до турбине је важна за унапређење дизајна турбине. Концентрисани налети ветра, промене правца ветра, пролаз структуре атмосферске енергије стварају критична оптерећења на индивидуалне ветротурбине и на лопатице. Ови екстремни догађаји смањују животни век турбина, узрокују квар компоненти, а понекад и потпуни квар целе машине. Круцијално је разумети сложеност тока ветра до турбине у намери да дизајнирамо управљање њоме у циљу смањења оптерећења, чиме турбине адекватно реагују на ове сложене атмосферске феномене, стохастичке природе.

Моделовање ветрогенератора је сложено и изазовно. Прецизни модели морају да садрже много степена слободе да би приказали најважније динамичке ефекте. Дизајн контролних алгоритама за ветротурбине мора узети у обзир ове сложености. Ови алгоритми морају да обухвате најважнију динамику турбине а да не буду превише сложени.

Класичне методе пројектовања управљања заснивају се на једном улазу и једном излазу. Њихов недостатак је што се мора користити више регулационих петљи за

истовремено пригушивање неколико флексибилних режима турбина. Ако ове контроле нису пројектоване са великом пажњом, ове контролне петље ометају једна другу и узрокују нестабилност турбине. Напредне методе мултиваријабилног пројектовања система управљања са више улаза и излаза (MIMO) могу се користити за постизање ових вишеструких циљева управљања.

Због свих набројаних проблема који се јављају приликом мерења ветра, рада контролера и грешака услед наглих промена у јачини и правцу деловања ветра, али и увећања и поскупљења израде уређаја, циљ будућих истраживања у овој области је пројектовање „паметних” лопатица ротора са сопственим сензорима, контролерима и уређајима за управљање нагибом лопатице (тј. регулисањем оптерећења лопатице) а да при томе буде минимално повећање габарита и цене уређаја.

Осим тога, велике варијације генерисане снаге стварају проблеме у планирању производње, напонским варијацијама и стабилности рада, како ветрогенератора тако и целог електроенергетског система.

У овом раду смо дали приказ новије литературе из ове области и преглед и анализу региона рада ветротурбина и са њима повезаних циљева управљања. Акценат је стављен на методе за регулацију брзине и ублажавање оптерећења конструкције.

ЛИТЕРАТУРА

- 1] Frederik J.A., Simley E., Brown K.A., Yalla G.R., Cheung L.C., and Fleming P.A., Comparison of Wind-farm Control Strategies Under Realistic Offshore Wind Conditions: Turbine Quantities of Interest, *EAWC, Wind Energy Science – Discussions*, 2 December 2024, <https://doi.org/10.5194/wes-2024-164>
- [2] <https://klima101.rs/evropska-unija-solar-vetar-maj-2023/>
- [3] <https://klima101.rs/najveca-vetrenjaca-na-svetu/>
- [4] <https://www.vpkovacica.rs/>
- [5] Миленко Ђурић, Жељко Ђуришић, Александар Чукарић, Веселин Илић, Електране, Грађевинска књига, 2008.
- [6] Brown, K., Houck, D., Maniaci, D., Westergaard, C., and Kelley, C.: Accelerated Wind-turbine Wake Recovery through Actuation of the Tip-vortex Instability, *AIAA Journal*, 60, 3298–3310, 2022.
- [7] Mahmoodi, E., Khezri, M., Ebrahimi, A., Ritschel U., Kamandi, M., A LiDAR-Based Yaw Control for Wind Turbines, Preprints.org (www.preprints.org), 07-10-2024, doi:10.20944/preprints202410.0366.v1
- [8] Elkodama, A., Abdellatif, A., Shaaban, S., Rushdi, M. A., Yoshida Sh., Ismaiel A., Investigation into the Yaw Control of a Twin-Rotor 10 MW Wind Turbine, *Appl. Sci.* 2024, 14, 9810, <https://doi.org/10.3390/app14219810>
- [9] Van Vondelen A. A. W., Pamososuryo A. K., Navalkar S. T., and van Wingerden J.W., Control of Periodically Waked Wind Turbines, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2024.
- [10] Gonzalez Silva, J., van der Hoek, D., Ferrari, R., and van Wingerden J. W., Wind Tunnel Testing of Wind Turbine and Wind Farm Control Strategies for Active Power Regulation, *J. Renewable Sustainable Energy* 16, 053302 (2024); DOI: 10.1063/5.0215493
- [11] Jonkman, J. M., and Buhl, M. L., FAST User's Guide, NREL Report No. EL-500-38230, National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [12] Suryanarayanan, S., and Dixit, A., On the Dynamics of the Pitch Control Loop in Horizontal Axis Large Wind Turbines, *Proc. Amer. Ctrl. Conf.*, pp. 686–690, June 2005.
- [13] Borunda M., Garduno R., de la Cruz Soto J., Díaz R.A.F., Intelligent Control of an Experimental Small-Scale Wind Turbine, *Energies*, Nov. 2024, DOI: 10.3390/en17225656
- [14] Stol, K. A., and Bir, G. S., SymDyn User's Guide, NREL Report No. EL-500-33845, National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [15] Kane, T. R., and Levinson, D. A., Dynamics: Theory and Applications, McGraw-Hill, 1985.
- [16] Hansen, A. C., User's Guide to the Wind Turbine Dynamics Computer Programs YawDyn and AeroDyn for ADAMS, version 11.0, Mech. Eng. Dept., Univ. of Utah, 1998.
- [17] Wright, A.D., and Fingersh, L.J., Advanced Control Design for Wind Turbines, Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, Technical Report NREL/TP-500-42437, March 2008.
- [18] Pao, L. Y., and Johnson, K. E., A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms, *Proc. Amer. Ctrl. Conf.*, June 2009.
- [19] Van Minh P., Control for Wind Turbine System using PMSG when Wind Speed Changes, *International Journal of Electrical and Electronics Research (IJEER)*, 2024, Volume 12, Issue 2, p.p. 520-528, e-ISSN: 2347-470X, www.ijeer.forexjournal.co.in
- [20] Benhacine T.Y., Mouzai A., Azaz A.A., Boudraf M., MPPT Optimal Torque Control Strategy for a PMSG-based Wind Turbine Emulator, *Journal of Renewable Energies, IREnDAYS'24 Algiers* (2024), p.p. 289 – 295, DOI: <https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1271>
- [21] Benhacine, T. Z. E., Dali, A., Tata, M., Kherbachi, A., Boudraf, M., & Kaabeche, A., Design of a Test Bench for a Small Wind Turbine Emulator, *Journal of Renewable Energies*, 27(1), 2024.
- [22] Chahb A., Yesséf M., Amharech A., A Comprehensive Approach to Wind Turbine Optimization Integrating MPPT and Speed Control, 2024, DOI: 10.1109/ISAECT64333.2024.10799765
- [23] Laks, J. H., Pao, L. Y., and Wright, A. D., Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future, Conference Paper in Proceedings of the American Control Conference, July 2009, DOI: 10.1109/ACC.2009.5160590

БИОГРАФИЈА



Славица Стојиљковић је рођена 1969. године у Прокупљу, где је завршила основну школу и гимназију. Дипломирала је 1994. године на Машинском факултету Универзитета у Нишу, на образовном профилу

Аутоматско управљање, на ком је 2014. одбранила магистарску тезу „Примена неуро-фази-генетског управљања на аутоматизацији система грејања и климатизације у интелигентним зградама” и стекла академско звање магистра машинских наука – област аутоматско управљање.

Од 1996. до 2015. године радила је у Дирекцији за изградњу и урбанизам општине Прокупље као пројектант термотехничких система.

Године 2015. прелази у Електродистрибуцију Београд. Од 2021. године ради у Управи ЈП ЕПС-а (сада: ЕПС АД), у Служби за енергетску ефикасност Сектора за енергетску ефикасност и заштиту животне средине у производњи енергије и угља, Техничких послова производње угља и енергије, као главни инжењер за енергетску ефикасност.

Године 1999. у СМЕИТС-у је положила стручни испит прописан за дипломираног машинског инжењера.

Септембра 2005. постаје члан Инжењерске коморе Србије (ИКС) са лиценцом за дипломираног машинског инжењера – одговорни пројектант термотехнике, термоенергетике, процесне и гасне технике.

Године 2009. стиче сертификат енергетског менаџера, 2010. полаже стручни испит из противпожарне заштите, а 2012. добија и лиценцу ИКС-а за енергетску ефикасност у зградарству.

Године 2021. завршава обуку за енергетског менаџера у индустрији, на Машинском факултету у Београду, и добија лиценцу за обављање послова енергетског менаџера за област индустријске енергетике.

Slavica Stojiljković¹, Vladimir M. Šilikut¹

An Overview of Wind Turbines Control Systems

¹ Joint Stock Company Elektroprivreda Srbije, Belgrade*

Report

Highlights

- Different methods for regulation of wind turbine power
- Ensuring reliable and efficient operation of wind turbines under variable wind speeds
- Wind turbines are inherently nonlinear and time-varying

Abstract

This paper provides an overview of the latest expert literature on wind turbine control systems. Some techniques used in the control of horizontal-axis wind turbines at the individual turbine level are presented and explained in more detail. These controls apply to the blade pitch and generator power. The turbine system is modeled as a flexible structure operating under the presence of turbulent wind disturbances. A review of various turbine operating phases and control strategies aimed at maximizing energy conversion at sub-nominal wind speeds is provided, with a focus on managing aerodynamic loads when the turbine operates at maximum power. After reviewing the basic objectives of turbine control, the paper gives an overview of common linear control approaches and then describes advanced control architectures, addressing why they may provide greater benefits.

Keywords

Linearized wind turbine model, wind generator, wind speed, wind turbine efficiency, wind turbine power regulation

Received: October 22nd, 2024Reviewed: January 18th, 2025Modified: February 10th, 2025Accepted: February 21st, 2025

*Corresponding author: Slavica Stojiljković, +381-64-83-33-277

E - mail: slavica.stojiljkovic@eps.rs

Татјана Цинцар Вујовић^{1*}

Примењена метрологија у Електродистрибуцији Србије

¹ Електродистрибуција Србије д. о. о. Београд, Нови Београд, Србија<https://doi.org/10.18485/epij.2025.3.1.4>

Стручни рад

Кључне поруке

- Развијена метрологија у привреди доприноси побољшању квалитета производа/услуга и побољшању конкурентних способности на тржишту
- Међулабораторијска поређења су један од најзначајнијих критеријума за процену упоредивости и осигурања поверења у резултате мерења
- Резултат мерења је комплетан само уколико га прати квантитативна изјава о његовој мерној несигурности, која је важна за добијање доброг квалитета мерења

Кратак садржај

Испуњавањем прописаних захтева за бројила електричне енергије требало би да се обезбеди висок ниво заштите од случајног или намерног утицаја на параметре и перформансе бројила, на законски релевантан софтвер у бројилу, те утицај на резултат мерења, а оцењивањем усаглашености бројила електричне енергије требало би да се обезбеди висок ниво поверења.

Међулабораторијска поређења и испитивања оспособљености су веома важан аспект контроле квалитета резултата мерења и недвосмислена потврда компетентности лабораторија.

У раду су приказани резултати међулабораторијских поређења које је спровело Контролно тело Електродистрибуције Србије у периоду од 2020. до 2023. године, у циљу осигурања поверења и поузданости резултата мерења електричне енергије у дистрибутивном систему.

Кључне речи

Евалуација резултата, међулабораторијско поређење, мерна несигурност

Примљено: 27. фебруар 2024.

Рецензирано: 30. децембар 2024.

Измењено: 12. фебруар 2025.

Одобрено: 13. фебруар 2025.

*Кореспондирајући аутор: +381 11 36 55 524, +381 64 83 54 293

Имејл: Tatjana.Cincar-Vujovic@ods.rs

1. УВОД

Контролно тело Електродистрибуције Србије је значајан део метролошког система Републике Србије са дугом традицијом. Поред основног задатка у контролисању и оверавању бројила електричне енергије у својих 17 лабораторија, Контролно тело Електродистрибуције Србије обезбеђује систем следивости до крајњих корисника и подиже инфраструктуру система квалитета организовањем и спровођењем међулабораторијских поређења, у складу са ISO/IEC 17043 [1] и ILAC-G13 [2].

Међулабораторијско поређење је организовање извођења и вредновања испитивања/еталонирања истих или сличних предмета испитивања/еталонирања које су спровеле две лабораторије или више лабораторија у складу са унапред утврђеним условима [1].

Испитивање оспособљености је утврђивање способности лабораторије за испитивање/еталонирање, за специфична испитивања или мерења кроз учествовање у међулабораторијским поређењима [1].

У пословима потврђивања усаглашености мерила са прописаним техничким и метролошким захтевима, примарно се разматрају компетентност и техничка оспособљеност тела за оцењивање усаглашености.

Учешће у међулабораторијским поређењима (МЛП) и испитивањима оспособљености (ПТ шеме) представља један од значајних предуслова успостављања и одржавања метролошког система у Републици Србији. Међулабораторијска поређења су веома важан аспект контроле квалитета резултата мерења и недвосмислена потврда компетентности лабораторија. Неминовност и потреба укључивања у шеме провере стручности, као једног од најзначајних критеријума за процену упоредивости резултата мерења, обезбеђују препознавање и прихватање резултата мерења, а све у сврху уклањања техничких баријера у трговини.

Учешће у МЛП/ПТ обавезује сваку лабораторију да резултате мерења искаже у форми типичног буџета мерне несигурности [3, 5, 6], чиме резултат мерења добија значај доброг квалитета мерења [6]. Резултат мерења је комплетан само уколико га прати квалитативна изјава о његовој мерној несигурности. Успешно мерење зависи од разумевања и изражавања мерне несигурности, те квантификације сумње у резултат мерења. Ради добијања доброг квалитета мерења и разумевања самог резултата мерења, мерна несигурност је важан податак, параметар који се придружује резултату мерења и који одражава расипање измерених вредности. Мерна несигурност се дефинише и приказује у циљу њеног смањења и откривања фактора који могу утицати на мерну несигурност.

У општем случају, мерна несигурност садржи више компоненти [3, 4, 5, 6]. Неке од њих се могу оценити из статистичке расподеле резултата серије мерења и окарактерисати експерименталном стандардном девијацијом. Друге компоненте, које се

такође могу окарактерисати стандардном девијацијом, оцењују се на основу претпостављених расподела вероватноће заснованих на искуству или другим информацијама.

Стандардна мерна несигурност се може одредити методом оцене типа А или оцене типа Б.

Тип А је оцењивање мерне несигурности статистичком анализом серије резултата мерења. Статистичка сигурност која одговара мерној несигурности тип А зависи од статистичке расподеле. Може се усвојити Гаусова расподела.

Тип Б је оцењивање мерне несигурности свим осталим методама изузев статистичке анализе серија поновљених мерења. Мерну несигурност тип Б проузрокују систематски ефекти.

При изражавању мерне несигурности најчешће се користе три функције расподеле: равномерна (униформна), троугаона и Гаусова.

Методологија одређивања комбиноване мерне несигурности у случају некорелисаних величина описана је у Поглављу 2 овог рада.

У Поглављу 3 овог рада приказане су шеме поређења и резултати МЛП/ПТ које је Контролно тело Електродистрибуције Србије спровело у периоду од 2020. до 2023. године, у сврху доказивања еквивалентности резултата мерења електричне енергије у свим лабораторијама Контролног тела Електродистрибуције Србије, са Националном метролошком институцијом и националним еталонем електричне енергије, са Електромрежом Србије на местима примопредаје електричне енергије из преносног у дистрибутивни систем, са домаћим произвођачима бројила електричне енергије чија су бројила најчешће заступљена на мрежи.

Доказивањем еквивалентности метода и резултата мерења електричне енергије у Контролном телу Електродистрибуције Србије интерно и са екстерним субјектима метролошког система Републике Србије утврђује се и осигурава поверење у резултате мерења електричне енергије Контролног тела Електродистрибуције Србије, наглашено је у Поглављу 4 овог рада.

2. ОДРЕЂИВАЊЕ МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ

У процени мерне несигурности, полазило се од релативне грешке мерења исказане математичким моделом мерења

$$e = e_{sr} + \delta_E + \delta_U \quad (1)$$

где су:

e – релативна грешка мерења, у процентима (%);

e_{sr} – средња вредност 10 измерених релативних грешака мерења, у процентима (%);

δ_E – корекција релативне грешке због спецификације референтног еталона коју је дао произвођач, у процентима (%);

δ_U – корекција релативне грешке због мерне несигурности еталонирања референтног еталона, у процентима (%).

Извори несигурности, сагласно моделу мерења (1) су:

- 1) несигурност услед понављања мерења, тип А, нормална (Гаусова) расподела, број степени слободе је девет;
- 2) несигурност референтног еталона, тип Б, правоугаона (равномерна, униформна) расподела, број степени слободе је бесконачан;
- 3) несигурност услед еталонирања референтног еталона, тип Б, нормална (Гаусова) расподела, број степени слободе је 50.

Имајући у виду карактеристике артефакта (бројило електричне енергије), занемарене су несигурности услед дугорочне стабилности референтног еталона, температуре средине и утицаја каблова, јер се велика важност придаје доступним подацима из историје еталонирања еталонске опреме. Одабрани резултати еталонирања значајних мерних тачака се испржавају у односу на време. Из ових графика и дисперзија резултата еталонирања може се израчунати заносење или помак у једном интервалу еталонирања. У случају веома стабилне еталонске опреме, заносење или средњи помак, може се израчунати из неколико интервала еталонирања.

За некорелисане улазне величине комбинована стандардна мерна несигурност дата је формулом [3]

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N (c_i u(x_i))^2 \quad (2)$$

где су:

u_c – комбинована стандардна несигурност;

c_i – коефицијенти осетљивости;

$u(x_i)$ – стандардна несигурност појединих величина из формуле (1).

Ефективни број степени слободе је рачунат према Welch–Satterthwaite формули [3, 5]

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (3)$$

где су:

v_{eff} – ефективни број степени слободе;

u_c – комбинована стандардна несигурност;

u_i – стандардна несигурност појединих величина из формуле (1);

v_i – ефективни број степени слободе за несигурност појединих величина.

За евалуацију резултата и прорачун еквивалентности коришћен је E_n број. За рачунање овог броја примењена је формула [4]

$$E_n = \frac{\Delta x_{lab} - \Delta x_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (4)$$

где су:

Δx_{lab} – резултат лабораторије учеснице поређења;

Δx_{ref} – резултат референтне договорене лабораторије;

U_{lab} – мерна несигурност лабораторије учеснице за одређени резултат;

U_{ref} – мерна несигурност усвојене референтне вредности.

Услов за потврђивање еквивалентности резултата мерења је да апсолутна вредност E_n броја буде мања или једнака 1.

3. ОСИГУРАЊЕ ПОВЕРЕЊА И ПОУЗДАНОСТ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА

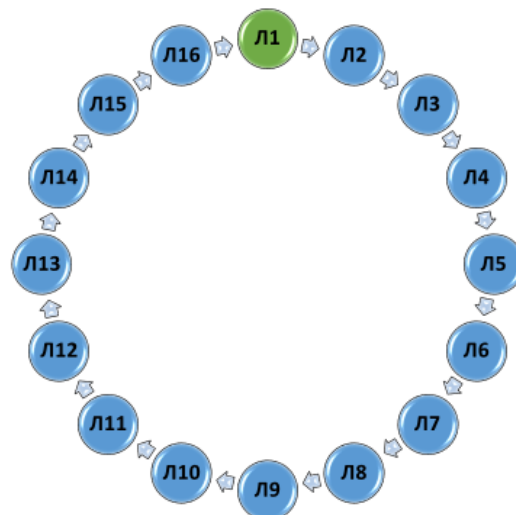
Развијена метрологија у привреди доприноси побољшању квалитета производа и побољшању конкурентних способности на тржишту. Испуњавањем прописаних захтева за бројила електричне енергије требало би да се обезбеди висок ниво заштите од случајног или намерног утицаја на параметре и перформансе бројила, на законски релевантан софтвер у бројилу, те утицај на резултат мерења. Оцењивањем усаглашености бројила електричне енергије требало би да се обезбеди висок ниво поверења.

Техничка оспособљеност 17 лабораторија за контролисање/оверавање бројила електричне енергије у Електродистрибуцији Србије потврђује се одржавањем акредитације по захтевима стандарда SRPS ISO/IEC 17020 и Закона о акредитацији и одржавањем уписа у регистар овлашћених тела за оверавање мерила министарства надлежног за послове метрологије, у складу са Законом о метрологији.

Осигурање поверења и поузданост резултата мерења електричне енергије у лабораторијама Електродистрибуције Србије на пословима оцењивања усаглашености бројила електричне енергије са прописаним техничким и метролошким захтевима обезбеђује се међулабораторијским поређењем.

3.1 Интерна ПТ шема

Прва интерна ПТ шема лабораторија Контролног тела Електродистрибуције Србије спроведена је 2020. године [8], као кружно поређење 16 једнаких лабораторија Контролног тела (КТ) Електродистрибуције Србије, приказано на Слици 1.



Слика 1. Кружно поређење

За договорену референтну вредност изабрана је једна (Л1) од 16 једнаких лабораторија Контролног тела Електродистрибуције Србије, која је имала улогу пилот-лабораторије. Због тога је лабораторија Л1 спровела мерења на почетку и на крају интерне ПТ шеме.

Добра организација међулабораторијског поређења подразумевала је израду Протокола у којем су били дефинисани природа и сврха ПТ шеме, распоред извршења поређења, избор артефакта, информације о транспорту и руковању артефактом, планирано, ограничено време извођења мерења, информације о методи мерења и процедурама, одговорност за спровођење мерења у дефинисаним мерним тачкама, назнака спровођења статистичке анализе резултата мерења која ће бити спроведена са предоченим начином дефинисања договорене, референтне вредности, начин евалуације резултата мерења, критеријум за позитивну оцену у складу са SRPS ISO/IEC 17043 и одговорност за израду нацрта и коначног Извештаја о резултатима међулабораторијског поређења.

За артефакт је изабрано електронско бројило електричне енергије, основних метролошких карактеристика 3x230/400 V, 5/6 A, класе тачности мерења активне електричне енергије 0,2 S. Мерења у лабораторијама су спроведена у референтним условима, а вредности температуре средине и релативне влажности у току мерења реферисане су заједно са резултатима мерења.

Протоколом је било дефинисано мерење на једном мерно-испитном систему у лабораторији која има више мерно-испитних система. Лабораторије су реферисале средње вредности резултата 10 узастопних мерења у задатим мерним тачкама.

Сва еталонска бројила електричне енергије која су лабораторије користиле у мерењу следила су до националног еталона, имају декларисану тачност $\pm 0,05\%$ и придружену мерну несигурност која је за свако еталон бројило дата у њему припадајућем Уверењу о еталонирању, након еталонирања у Дирекцији за мере и драгоцене метале, у складу са SRPS ISO/IEC 17025.

Очекивани извори мерне несигурности су били:

- Тип А, статистички резултати добијени мерењем;
- Тип Б, несигурност методе, односно еталонског бројила електричне енергије.

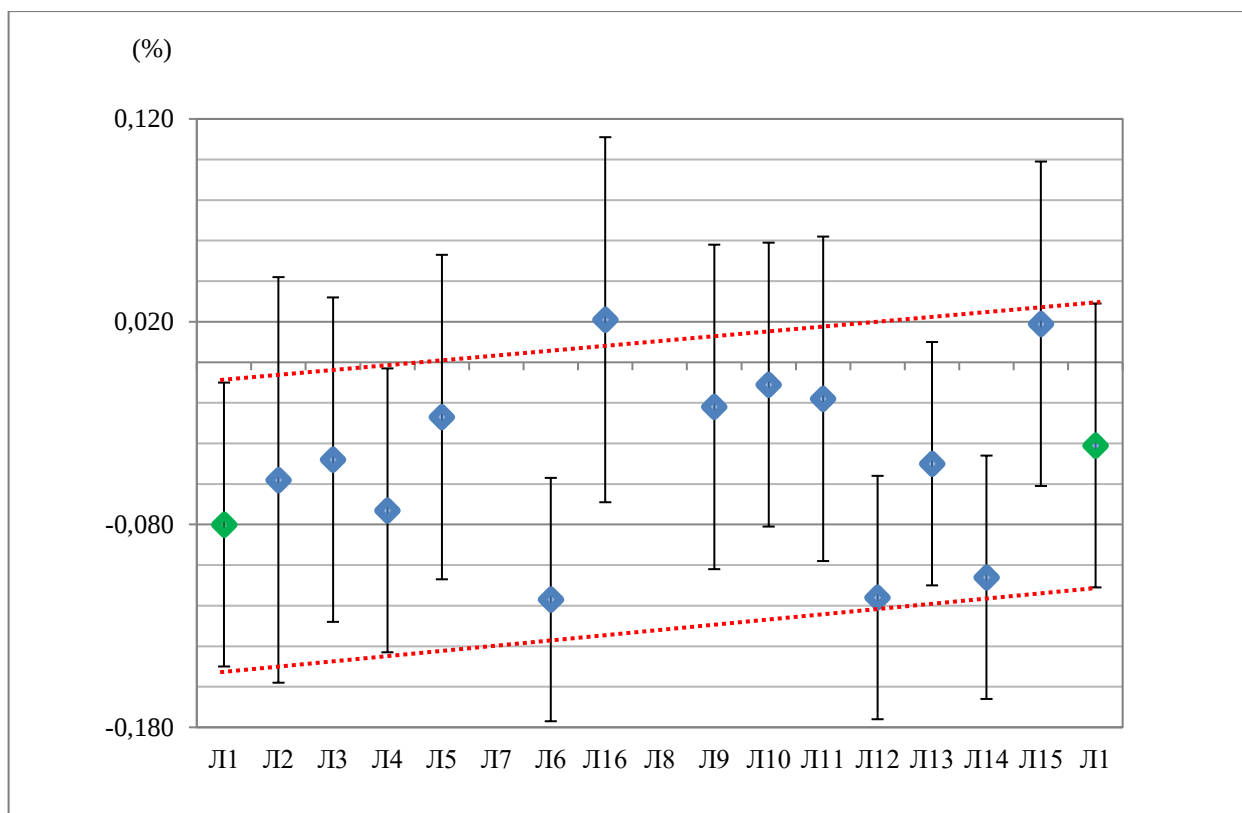
Од међусобно некорелисане мерне несигурности типа А и типа Б одређена је стандардна комбинована мерна несигурност и проширена (комбинована) мерна несигурност, што представља крајњи циљ обраде мерних података.

Све лабораторије КТ су реферисале вредности резултата мерења и придружене мерне несигурности. Прорачун буџета мерне несигурности са детаљима мерне несигурности дат је на примеру резултата мерења пилот-лабораторије (Л1), на почетку интерне ПТ шеме, у специфичној форми буџета мерне несигурности, приказаној у Табели I.

Резултати прорачуна E_n броја [8] приказани су на Слици 2.

Табела I Типична форма буџета мерне несигурности

Величина X_i	Процена x_i	Стандардна мерна несигурност (x_i) (%)	Расподела вероватноће / Метода вредновања (А, Б)	Коефи- цијент осетљи- вости c_i	Релативни допринос мерне несигурности $c_i u(x)$ (%)	Број степени слободе ν_i
ε_{sr}	0,087	0,002	Тип А	1	0,002	9
u_{B1}	0	0,029	Тип Б	1	0,029	∞
u_{B2}	0	0,006	Тип Б	1	0,006	50
$\varepsilon =$	0,087	Ефективан број степени слободе $\nu_{\text{ef}} =$				331186,214
Комбинована стандардна мерна несигурност u_C (%)						0,03
Фактор прекривања (обухвата) $k =$						1,99
Проширена мерна несигурност $U = k \cdot u_C$ (%)						0,06



Слика 2. Резултати прорачуна E_n броја у КТ Електродистрибуције Србије

Израчуната апсолутна вредност E_n броја је мања од 1, чиме је доказана еквивалентност резултата мерења у свим лабораторијама Контролног тела Електродистрибуције Србије.

Посебна вредност ових резултата огледа се у мерењу истог узорка бројила електричне енергије, истом мерном методом, али коришћењем еталон бројила различитих произвођача.

Резултати ПТ шеме су увек позив за преиспитивање. Због високе стандардне девијације поновљених резултата мерења, лабораторија Л16 има већу несигурност типа А, мањи ефективни број степени слободе $\nu_{eff} = 28,39$ и стога већи фактор прекривања $k = 2,05$, те већу проширену мерну несигурност 0,09%. Тумачење резултата мерења указује на недовољну посвећеност извршиоца мерења самом мерењу. Резултате мерења треба пратити у неколико планираних серија мерења, како би се избегла грешка оператора или случајно нарушавање осетљивости интерфејса за читавање импулса на артефакту.

3.2 Билатерално поређење са Дирекцијом за мере и драгоцене метале

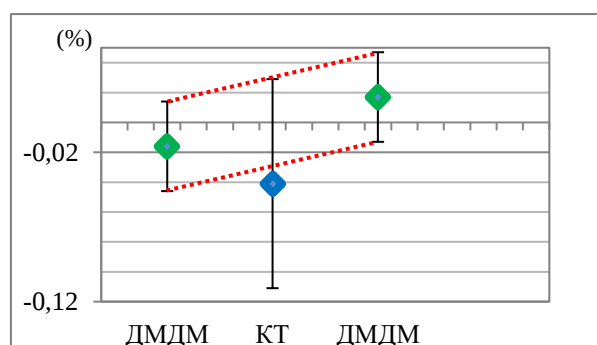
У билатералном поређењу Контролног тела Електродистрибуције Србије са Националном метролошком институцијом – Дирекцијом за мере и драгоцене метале (ДМДМ), пилот-лабораторија из претходне Интерне ПТ шеме имала је улогу референтне лабораторије Електродистрибуције Србије.

Резултати прорачуна E_n броја, у поређењу у којем је пилот-лабораторија била национална лабораторија у ДМДМ [9], приказани су на Слици 3.

Еталонска бројила КТ Електродистрибуције Србије еталонирана су у ДМДМ, те је очекивано ширина опсега мерне несигурности мерења КТ већа од мерне несигурности мерења ДМДМ.

Резултати билатералног поређења са ДМДМ су недвосмислена потврда техничке компетентности лабораторија Електродистрибуције Србије.

Посебна вредност овог билатералног поређења огледа се у „везивању” сваког мерења електричне енергије у лабораторијама Електродистрибуције Србије са националним еталоном електричне енергије Републике Србије, приказано на Слици 4.

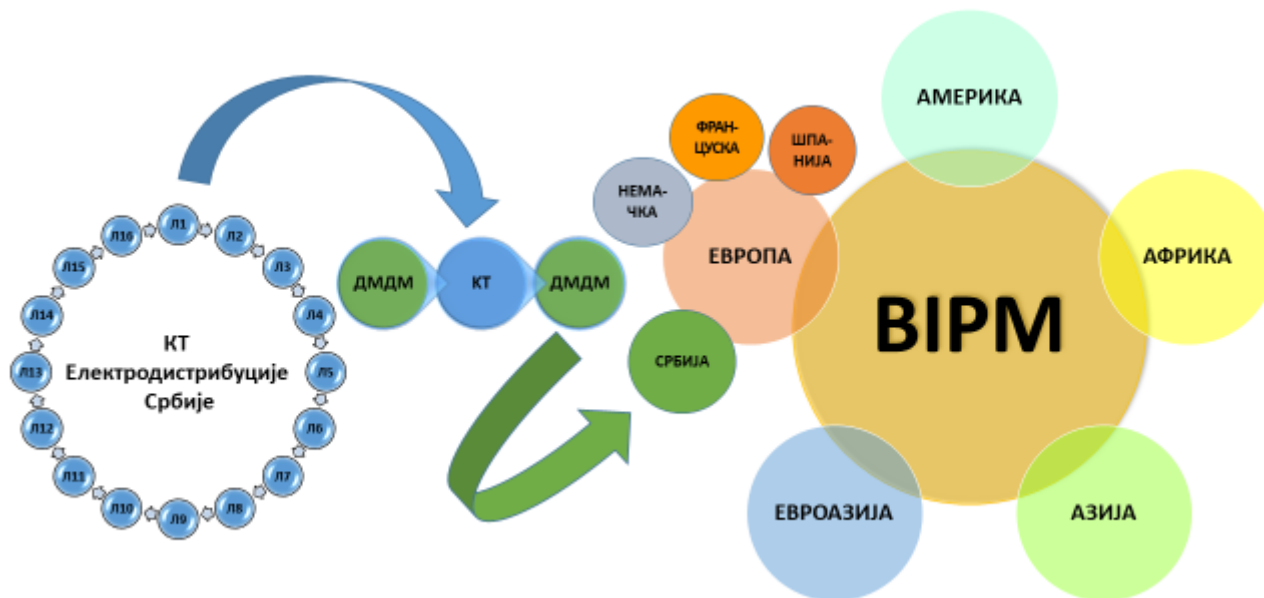


Слика 3. Резултати прорачуна E_n броја у односу на ДМДМ

Према успостављеној хијерархијској шеми, кроз учешће ДМДМ у поређењима Европске асоцијације

НМИ (*The European Association of National Metrology Institutes – EURAMET*) и кључним поређењима са Међународним бироом за тегове и мере (*International Bureau of Weights and Measures – BIPM*), приказано на Слици 4, свако мерење у лабораторијама Контролног тела Електродистрибуције Србије везује се са

мерењима електричне енергије у Европи и даље са међународним еталоном у BIPM, чиме се обезбеђује веродостојност мерења, а самим тим и квалитет услуга контролисања/оверавања бројила електричне енергије у Контролном телу Електродистрибуције Србије.



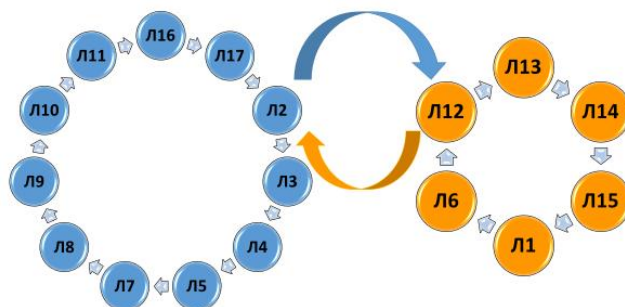
Слика 4. Веза резултата мерења

3.3 Интерна ПТ шема – „осмица”

Унапређење пословања Електродистрибуције Србије огледало се, између осталог, и у формирању нове, седамнаесте лабораторије Контролног тела Електродистрибуције Србије 2022. године. За потребе доказивања еквивалентности резултата мерења те новоформиране лабораторије спроведена је интерна ПТ шема, организована као кружно поређење „осмица”, приказано на Слици 5.

Имајући у виду да лабораторије Електродистрибуције Србије имају мерно-испитну опрему два различита произвођача, грану „осмице” чине лабораторије које користе мерно-испитну опрему истог произвођача.

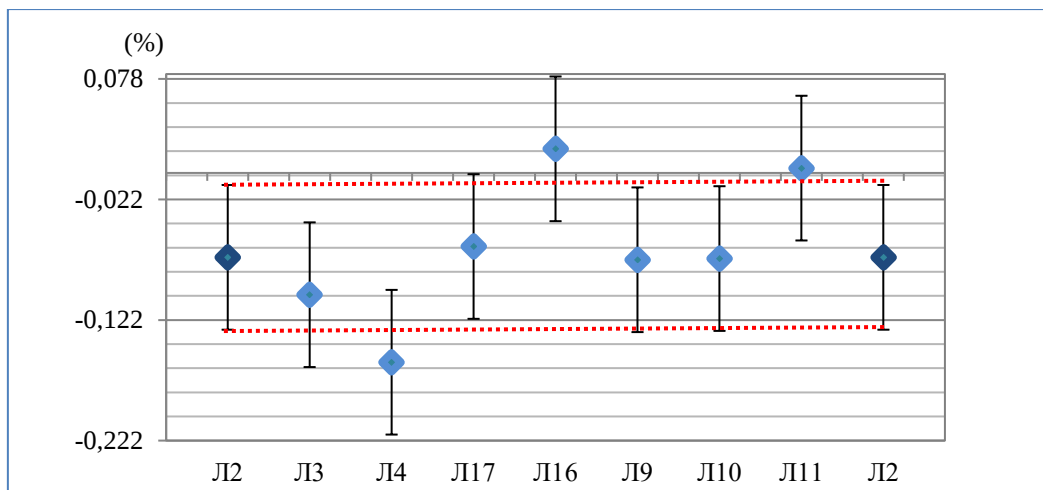
За плаву грану је изабрана договорена референтна вредност лабораторије Л12, за кружно поређење 11 једнаких лабораторија, које све користе мерно-испитну опрему произвођача А.



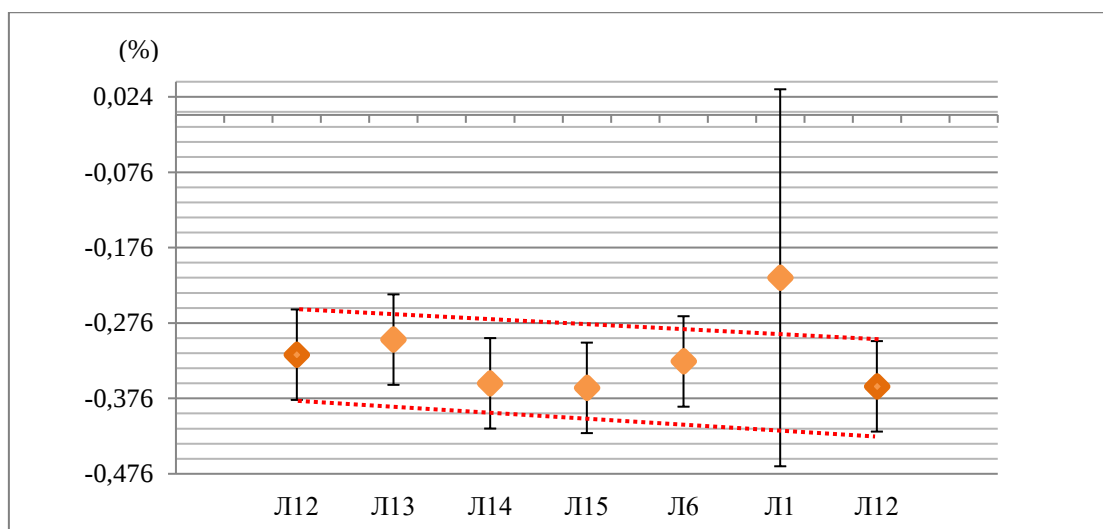
Слика 5. Интерна ПТ шема – кружно поређење „осмица”

За наранцасту грану је изабрана договорена референтна вредност лабораторије Л12, за кружно поређење 6 једнаких лабораторија, које све користе мерно-испитну опрему произвођача Б.

На сликама 6 и 7 приказане су израчунате вредности за еквивалентност за сваку грану „осмице”.



Слика 6. Резултати прорачуна E_n броја за плаву грану „осмице“



Слика 7. Резултати прорачуна E_n броја за наранџасту грану „осмице“

На Слици 6 види се незнатно одступање резултата мерења Л4, Л16 и Л11. Апсолутне вредности E_n броја резултата мерења Л4 и Л16 веће су од 1 и износе: 1,025 за Л4 и 1,086 за Л16.

Апсолутна вредност E_n броја резултата мерења Л11 је 0,872 и задовољен је услов $|E_n| \leq 1$. На Слици 6 резултат Л11 читава се на референтној линији.

На Слици 7 резултат мерења Л1 има велику мерну несигурност због високог фактора прекривања $k = 2,23$, што је последица малог ефективног броја степени слободе $v_{\text{eff}} = 10,44$ на који утиче комбинована стандардна мерна несигурност, у којој је допринос мерне несигурности еталонирања преузет из претходног Уверења/Сертификата о еталонирању, а не из новог, који је ДМДМ доставила са закашњењем.

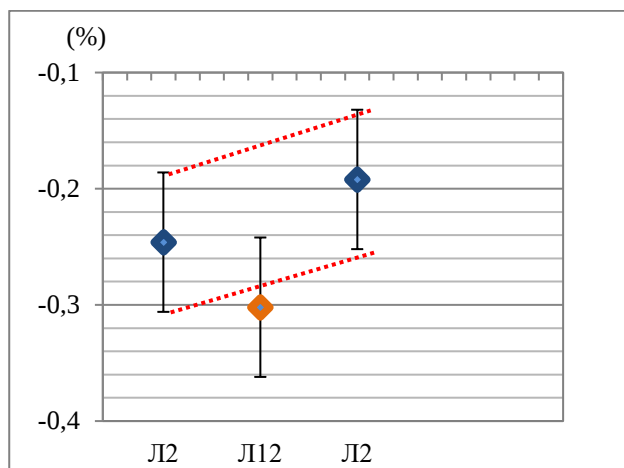
Апсолутна вредност E_n броја резултата мерења Л1 је 0,872 и задовољен је услов $|E_n| \leq 1$. На Слици 7 резултат Л1 читава се изван референтне линије.

Протоколом поређења је задат услов $|E_n| \leq 1$ који је услов у поређењима резултата лабораторија за еталонирање [4] које су акредитоване по захтевима стандарда SRPS ISO/IEC 17025. Овде је спроведено поређење резултата лабораторија акредитованих за

контролисање по захтевима стандарда SRPS ISO/IEC 17020, па је договорен услов могао да буде и $|E_n| \leq 2$. У неким међународним поређењима лабораторија за еталонирање, услед карактеристика артефакта, његове стабилности, учешћа великог броја лабораторија или вишегодишњег трајања поређења, за договорен услов се узима $|E_n| \leq 2$. За поређење резултата лабораторија за контролисање (SRPS ISO/IEC 17020) услов $|E_n| \leq 2$ би био прихватљив, али КТ Електродистрибуције Србије се определило за „строжи“ услов, који је „осетљивији“ на индикацију перформанси лабораторија учесника поређења.

Након завршетка кружног поређења сваке гране „осмице“, пилот-лабораторије сваке гране „осмице“, као договорене референтне вредности гране „осмице“, лабораторије Л2 и Л12 извршиле су двоструко међулабораторијско поређење.

У првом међулабораторијском поређењу, договорена референтна вредност плаве гране, лабораторија Л2 је имала улогу пилот-лабораторије. Резултати прорачуна E_n броја за прво међулабораторијско поређење у форми Л2 – Л12 – Л2, приказано је на Слици 8.

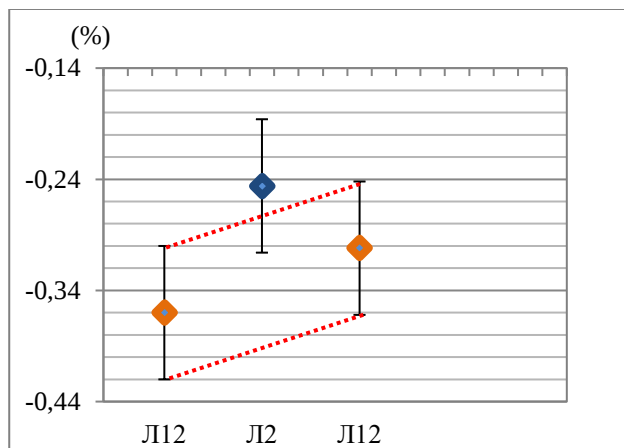


Слика 8. Резултати прорачуна E_n броја за пилот-лабораторију Л2

Апсолутна вредност E_n броја резултата мерења Л12 у односу на договорену референтну вредност плаве гране „осмице” је 0,9782 и задовољен је услов $|E_n| \leq 1$.

У другом међулабораторијском поређењу, договорена референтна вредност наранџасте гране, лабораторија Л12 имала је улогу пилот-лабораторије. Резултати прорачуна E_n броја за друго међулабораторијско поређење у форми Л12 – Л2 – Л12, приказано је на Слици 9.

Апсолутна вредност E_n броја резултата мерења Л2 у односу на договорену референтну вредност наранџасте гране „осмице” је 1,0018 и блиско је услову $|E_n| \leq 1$.

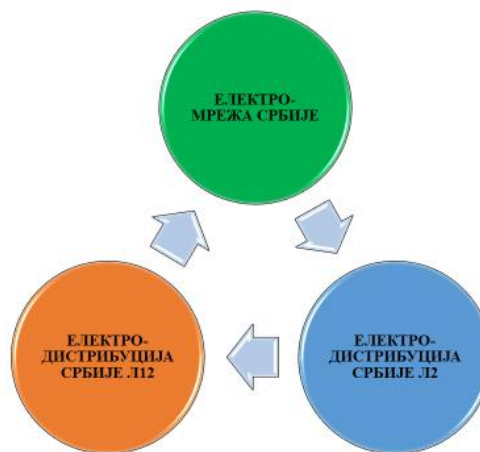


Слика 9. Резултати прорачуна E_n броја за пилот-лабораторију Л12

Евалуације резултата мерења у овом комплексном поређењу указују на перформансе еталонских бројила којима се, у поређењима, додељује улога договорене референтне вредности и закључује да је за учешће КТ у екстерним ПТ шемама препорука изабрати договорену референтну вредност лабораторије КТ која користи еталонско бројило произвођача А (плава грана „осмице”).

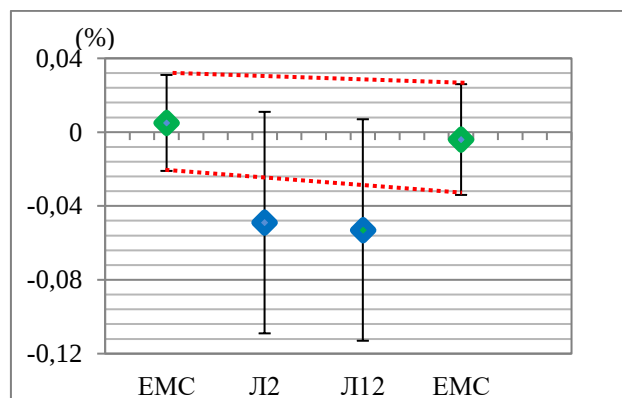
3.4 Екстерна ПТ шема

У циљу успостављања везе и показивања еквиваленције резултата мерења електричне енергије у лабораторијама Контролног тела Електродистрибуције Србије и лабораторији Контролног тела Електромреже Србије, спроведена је екстерна ПТ шема између Електромреже Србије и Електродистрибуције Србије. Улога пилот-лабораторије у овој екстерној ПТ шми поверена је лабораторији Електромреже Србије. Две лабораторије Контролног тела Електродистрибуције Србије Л2 и Л12 које су у претходној интерној ПТ шми имале улогу пилот-лабораторија, свака у својој грани „осмице”, представљале су Контролно тело Електродистрибуције Србије. Екстерна ПТ шема је организована као кружно поређење приказано на Слици 10.



Слика 10. Екстерна ПТ шема – кружно поређење

Резултати прорачуна E_n броја, у односу на договорену референтну вредност Електромрежа Србије (ЕМС), приказана је на Слици 11.



Слика 11. Резултати прорачуна E_n броја за пилот-лабораторију Електромреже Србије

Све лабораторије учеснице екстерне ПТ шеме су користиле исту мерну методу и вршиле су мерења у приближно истим лабораторијским условима средине.

Расипање резултата мерења је очекивана последица коришћења еталонских бројила различите тачности. Лабораторија Електромреже Србије користи еталонско бројило тачности $\pm 0,02\%$, док лабораторије Електродистрибуције Србије користе еталонска бројила тачности $\pm 0,05\%$.

Апсолутна вредност E_n броја резултата мерења Л2 је 0,757, а апсолутна вредност E_n броја резултата мерења Л12 је 0,818 што потврђује закључак претходне интерне ПТ шеме „осмица” у Поглављу 3.3 овог рада.

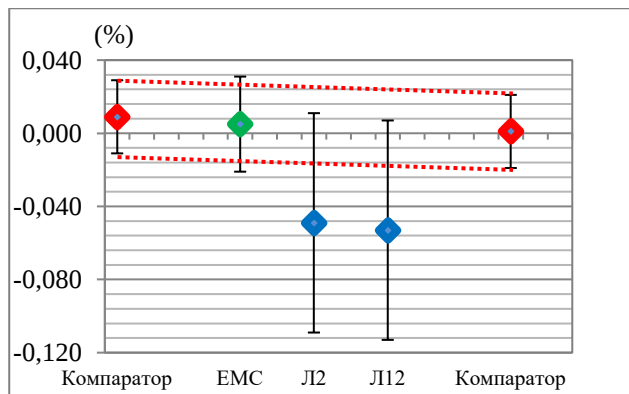
Потврђивање еквивалентности резултата мерења у Електромрежи Србије и у Електродистрибуцији Србије је од нарочитог значаја у ланцу тока електричне енергије, на местима примопредаје енергије из преносног у дистрибутивни систем.

Посебна вредност ове екстерне ПТ шеме је у додатно спроведеном „контролном” мерењу на компаратору, чија је следивост 1 : 1 у односу на национални еталон електричне енергије Републике Србије. Тачност компаратора је $\pm 0,01\%$, а његова излазна фреквенција је реда 60 kHz, што га чини осетљивијим и стабилнијим.

Апсолутна вредност E_n броја, у односу на компаратор (контролно мерење), резултата мерења ЕМС је 0. Апсолутна вредност E_n броја резултата мерења Л2 је 0,871, а резултата мерења Л12 је 0,935.

Резултати прорачуна E_n броја указују на утицај тачности договореног референтног еталонског бројила. Коришћењем компаратора у својству референтног еталонског бројила прорачунава се и већа вредност E_n броја.

Резултати прорачуна E_n броја у односу на компаратор (контролно мерење), приказани су на Слици 12.



Слика 12. Резултати прорачуна E_n броја у односу на компаратор

3.5 ПТ шема са произвођачима бројила

Интензивним радом Електродистрибуције Србије на унапређењу електродистрибутивне мреже и коришћењем дигиталних технологија у систем се имплементирају бројила електричне енергије са интегрисаним приступом читавања измерених величина са свих бројила електричне енергије.

У циљу успостављања везе између резултата мерења електричне енергије бројила различитих

домаћих произвођача, Контролно тело Електродистрибуције Србије је у току 2023. године спровело ПТ шему са домаћим произвођачима бројила електричне енергије, организовану као кружно поређење, приказано на Слици 13.



Слика 13. ПТ шема – кружно поређење са домаћим произвођачима бројила

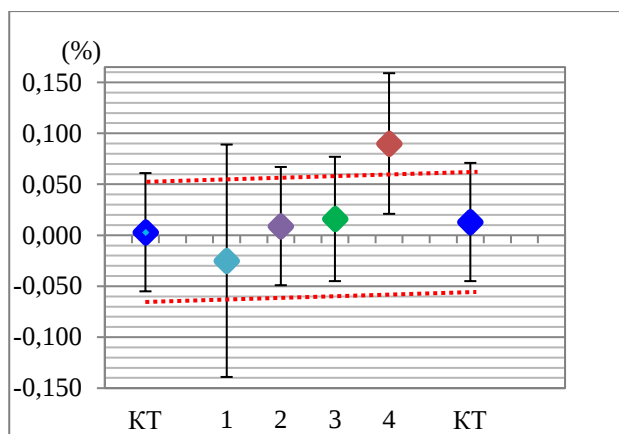
Резултати прорачуна E_n броја у односу на договорену референтну вредност лабораторије Контролног тела Електродистрибуције Србије, приказана је на Слици 14.

Апсолутна вредност E_n броја је мања од 1, чиме је потврђена еквивалентност резултата мерења електричне енергије у различитим, компетентним лабораторијама.

Пилот-лабораторија Контролног тела Електродистрибуције Србије и учесник ПТ шеме, Произвођач 3, у поређењу користе еталонска бројила еталонирана у ДМДМ, са следивошћу до националног еталона електричне енергије Републике Србије. Остали учесници ПТ шеме, произвођачи 1, 2 и 4 користе еталонска бројила еталонирана у акредитованој лабораторији за еталонирање, при чему учесник ПТ шеме Произвођач 1 доказује ланац следивости преко две акредитоване лабораторије, а учесници поређења Произвођач 2 и Произвођач 4 доказују ланац следивости преко акредитоване лабораторије следиве до ДМДМ.

С друге стране, тачност мерења електричне енергије еталонског бројила Произвођача 1 је $< \pm 0,1\%$, а тачност мерења електричне енергије еталонских бројила произвођача 2, 3 и 4 је $< \pm 0,05\%$ и то је разлог ширег опсега мерне несигурности мерења електричне енергије Произвођача 1.

Произвођач 4 има апсолутну вредност E_n броја 0,689 и то је највећа вредност E_n броја у овом поређењу, у односу на апсолутне вредности E_n броја осталих учесника ове ПТ шеме. Примарно објашњење апсолутне вредности E_n броја Произвођача 4 је у Уверењу/Сертификату о еталонирању еталонског бројила које је у поређењу користио Произвођач 4, у којем је, за задату мерну тачку, фактор прекривања (обухвата) $k = 2,18$ а проширена мерна несигурност 0,0375%.



Слика 14. Резултати прорачуна E_p броја ПТ шеме са домаћим произвођачима бројила

Посебна вредност ове ПТ шеме је њен међународни значај, имајући у виду упоређивање резултата мерења између лабораторија које су, у складу са захтевима референтног стандарда SRPS ISO/IEC 17020 акредитоване од стране Акредитационог тела Србије (АТЦ) и Босанског акредитационог тела (БАТА), те чињеницу да лабораторије за своја еталонска бројила доказују следивост преко различитих компетентних лабораторија за еталонирање, Националних метролошких институција или лабораторија акредитованих у складу са захтевима SRPS ISO/IEC 17025.

4. ЗАКЉУЧАК

Свакодневно суочавање са захтевима за поуздано снабдевање електричном енергијом, енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије, подразумева организовани систем праћења свих процеса у ланцу токова електричне енергије, а њихово сагледавање и анализа са аспеката различитих квантитативних и квалитативних параметара ствара услове за предузимање одговарајућих мера и активности.

Повећање ефикасности захтева развој инфраструктуре која подразумева одговарајућу тачност и поузданост мерења. Развој постојећих и примена нових технологија, као и широко прихваћени алати инфраструктуре квалитета, треба да омогуће остваривање ових циљева.

Доказивање еквивалентности метода и резултата мерења обезбеђује препознавање и прихватање резултата мерења и утврђује и осигурава поверење у резултат мерења.

Додатна корист сваког међулабораторијског поређења, интерне или екстерне ПТ шеме је у процењивању перформанси лабораторија и утврђивању способности сваке лабораторије за специфична мерења електричне енергије.

Осим доказивања техничке компетентности, то је и додатна могућност за стално напредовање и потврђивање могућности мерења применом најбољих мерних техника и најтачније мерне опреме.

Контролно тело Електродистрибуције Србије, одабраним методама мерења које одговарају врсти и обиму предузетог посла за предвиђену намену и у складу са потребама корисника, стално демонстрира компетентност и доприноси корпоративном имиџу и побољшању видљивости Електродистрибуције Србије међу операторима дистрибутивних система у региону и у Европи, јер мерење електричне енергије нема искључиво национални значај, већ представља међународну обавезу којом се обезбеђује да национални оператори дистрибутивних система делују на усаглашен и јединствен начин.

ЗАХВАЛНИЦА

Топле речи признања и захвалности цењеним колегама у Сектору за контролисања мерила електричне енергије Електродистрибуције Србије, на непоколебљивом савладавању процењивања мерне несигурности и раду на развоју мерних техника. Својим несебичним залагањем одиграли су изузетно важну улогу у спровођењу конкретних мерења и постизању завидних резултата.

У складу са принципима и правилима пословне етике, највише руководство Електродистрибуције Србије обезбеђује независност Контролног тела од било каквих утицаја и притисака који би могли да угрозе самосталност техничког одлучивања и интегритет особља Контролног тела.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] SRPS ISO/IEC 17043:2011 Оцењивање усаглашености – Општи захтеви за испитивање оспособљености
- [2] ILAC-G13:08/2007 ILAC Guidelines for the Requirements for the Competence of Providers of Proficiency Testing Schemes
- [3] ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of Measurement – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)
- [4] ISO 13528:2015 Statistical Methods for Use in Proficiency Testing by Interlaboratory Comparison
- [5] JCGM 100:2008 Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
- [6] EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration
- [7] Станковић, Д., „О мерној несигурности”, XLVI Конференција ETRAN, том III, од 4. 6. до 7. 6. 2002. Бања Врућица – Теслић
- [8] Цинцар Вујовић, Т., Наранчић И., Радосављевић, Д., Максимовић, З., Деак, П., „Поређење лабораторија за контролисање бројила електричне енергије у Електродистрибуцији Србије”, XII саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије, CIRED, од 30. 8. до 3. 9. 2021. Врњачка Бања

[9] Цинцар Вујовић, Т., Наранчић И., Радосављевић, Д., Максимовић, З., Деак, П., „Билатерално поређење између Контролног тела Електродистрибуције Србије и Националне

метролошке институције”, XIII саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије, CIRED, од 12. 9. до 16. 9. 2022, Копаоник

БИОГРАФИЈА



Татјана Цинцар Вујовић је рођена у Београду 1964. године. Метрологија је примарна сфера њеног интересовања од дипломирања на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Искуство је стекла дугогодишњим радом у Националној метролошкој институцији на метрологији електричних величина и активним учешћем у раду техничких и секторских комитета, поткомитета и радних група Европске комисије за мерила (European Commission MI), Европске асоцијације Националних метролошких института (EURAMET), Европске сарадње у законској метрологији (WELMEC), Међународне организације за законску метрологију (OIML), Акредитационог тела Србије (ATC) и Института за стандардизацију (ИС). Посветила се

развоју националне лабораторије за електричну енергију и потврђивању њене компетентности на међународном нивоу, учешћем у бројним међународним поређењима. Радилa је на развоју међународне препоруке за бројила електричне енергије (OIML R46), транспоновану ЕУ Директиве о мерилима (Measuring Instruments Directive – MID) у законодавство Србије, на смерницама за имплементацију, уједначену и хармонизовану примену MID и успостављању усаглашеног и доследног приступа европској законској метрологији у области бројила електричне енергије. На домаћим и међународним конференцијама, као аутор/коаутор објавила је више од 50 стручних радова. Мотивисана жељом за наставком професионалног успеха, транспарентним доказивањем у складу са најбољом праксом извођења мерења електричне енергије, од 16. 11. 2019. године ради на месту директора Сектора за контролисање мерила електричне енергије у Електродистрибуцији Србије.

Tatjana Cincar Vujovic^{1*}

Applied metrology in Elektrodistribucija Srbije Ltd.

¹ Elektrodistribucija Srbije Ltd. Belgrade, Serbia

Professional paper

Highlights

- Developed metrology in the economy contributes to the improvement of the quality of products/services and improvement of competitive abilities on the market.
- Interlaboratory comparisons are one of the most important criteria for assessing comparability and ensuring confidence in measurement results.
- The measurement result is complete only if it is accompanied by a quantitative statement about its measurement uncertainty, which is important for obtaining a good measurement quality.

Abstract

Meeting the prescribed requirements for electrical energy meters should ensure a high level of protection against accidental or intentional tampering with the parameters and performance of the meter, with the legally relevant software in the meter, and with the measurement result, and assessing the conformity of electrical energy meters should ensure a high level of confidence.

Interlaboratory comparisons and proficiency tests are a very important aspect of quality control of measurement results and unambiguous confirmation of laboratory competence.

The paper presents the results of interlaboratory comparisons conducted by the Control Body of Elektrodistribucija Srbije Ltd. in the period from 2020 to 2023, with the aim of ensuring trust and reliability of the results of electrical energy measurements in the distribution system.

Keywords

Evaluation of results, interlaboratory comparison, uncertainty of measurement

Received: February 27th, 2024Reviewed: December 30th, 2024Modified: February 12th, 2025Accepted: February 13th, 2025

*Corresponding author: +381 11 36 55 524, +381 64 83 54 293

E - mail: Tatjana.Cincar-Vujovic@es.rs

УРЕЂИВАЧКА ПОЛИТИКА И ТЕМАТСКЕ ОБЛАСТИ ЧАСОПИСА

При поновном покретању издавања часописа „Електропривреда” одлучено је да он има научно-стручни карактер и да буде припреман и публикован по новој, широј концепцији и двојезично, на српском и енглеском. При томе ће на енглеском језику бити објављивани само они рукописи за које аутори из Србије и региона искажу такву жељу, а рецензенти и Уредништво процене да имају одговарајући допринос и да би могли бити од интереса и за читалачку публику ван српског говорног подручја. Часопис је, наравно, отворен и за рукописе страних аутора чији су оригинали на енглеском језику. Уз сагласност ових аутора, одобрени рукописи ће бити превођени и објављивани и на српском језику. На српском језику доступне су ћирилична и латинична верзија објављених чланака.

Часопис се, по правилу, издаје два пута годишње, искључиво електронски (*on line*). Часопис је отвореног приступа (*Open Access*), при чему је објављивање прихваћених рукописа бесплатно, без било каквих финансијских обавеза аутора. Са друге стране, такође нема ни финансијских обавеза издавача према ауторима, како пријављених рукописа тако и објављених чланака.

Садржај рукописа пријављеног за објављивање у Часопису мора бити оригинално дело аутора и не сме бити већ објављен или јавно представљен (нити објављен или представљен у међувремену, пре првог објављивања у „Електропривреди”), било где у свету, у било ком облику. Ово правило се неће примењивати на рукописе пријављене за посебна, специјална издања Часописа, која буду посвећена већ презентованим, изабраним радовима са партнерских конференција, при чему такав рукопис мора бити проширен најмање 30% у односу на презентовани конференцијски рад, унапређен и додатно рецензиран по истој процедури као и рукописи пријављени за редовна издања Часописа.

У Часопису се објављују само они рукописи који добију најмање две позитивне рецензије од стране рецензираног експерата у области на коју се рукопис односи, односно већину позитивних рецензија, у случају ангажовања већег броја рецензента.

Часопис прихвата на разматрање рукописе и објављује радове научно-истраживачког и стручног карактера, а посебно рукописе/радове у областима:

- нових технологија за обезбеђивање, обраду и коришћење примарних енергената;
- производње, преноса и дистрибуције електричне енергије;
- складиштења и конверзије електричне и топлотне енергије;
- рационалне потрошње електричне и топлотне енергије;
- развоја обновљивих извора енергије;
- информационих и телекомуникационих система;
- организације рада електроенергетског система;
- заштите животне средине;
- ревитализације електроенергетских објеката;
- проналазаштва и иновација;
- реструктурирања и приватизације у енергетском сектору;
- тржишта електричне енергије;
- примене правне регулативе Европске уније у области енергетике;
- друге сродне области.

Часопис је замишљен као платформа и алат за приказивање искустава, конструктивно исказивање и сучељавање ставова, стручне дискусије експерата из струке и праксе и из научно-истраживачких институција и иновативних центара. Наиме, отворена размена њихових мишљења и искустава, по питањима стратешког развоја и одређивања за нове технологије може допринети изналажењу адекватних и оптималних техничко-технолошких, правно-економских и организационо-пословних одговора на све изазове декарбонизације, дигитализације и транзиције електроенергетике ка одрживом развоју.

У име Уредништва,

Др Владимир Шилкут
Главни и одговорни уредник

КАТЕГОРИЗАЦИЈА (РАНГИРАЊЕ) РУКОПИСА

Приликом прегледа рукописа и попуњавања извештаја о томе, рецензенти предлажу, а Уредништво – у случају прихватања рукописа за објављивање – утврђује његову категорију (ранг). Категоризација (рангирање) рукописа врши се према *Правилнику о категоризацији и рангирању научних часописа* („Службени гласник РС”, бр. 159 од 30. 12. 2020) и овде приложеној табели:

Научни чланци:	
Оригинални/изворни научно-истраживачки рад	Рад у коме се износе претходно необјављивани резултати сопствених истраживања научним методом
Прегледни рад	Рад који садржи оригиналан, детаљан и критички приказ истраживачког проблема или подручја у коме је аутор остварио одређени допринос
Кратко или претходно саопштење	Оригинални научни рад пуног формата, али мањег обима или прелиминарног карактера
Научна критика, односно полемика и осврти	Расправа на одређену научну тему заснована искључиво на научној аргументацији и коришћењем научне методологије
Стручни чланци:	
Стручни рад	Прилог у коме се нуде искуства корисна за унапређење професионалне праксе, али која нису нужно заснована на научном методу
Информативни прилог	Уводник, коментар и сл.
Приказ	Приказ књиге, рачунарског програма, случаја, научног догађаја и сл.
Стручна критика, односно полемика и осврти	Расправа/дискусија на одређену стручну тему

Први А. Аутор¹, Други Б. Аутор², Трећи В. Аутор³, ...



Упутство за припрему радова - наслов рада (НЕ ВИШЕ ОД ЧЕТИРИ РЕДА)

¹ Афилијација првог аутора - институција, град, земља*

² Афилијација другог аутора - институција, град, земља (ако се разликује од 1)

³ Афилијација трећег аутора - институција, град, земља (ако се разликује од 1,2)

...

Категорија рада: (уноси Редакција)
UDK: (уноси Редакција)

Кључне поруке

- У највише четири кратке ставке/*bullets* треба изложити кључне аспекте и поруке рада
- Реченице ових ставки морају бити кратке, језгровите, помоћни глаголи могу бити изостављени
- Нпр: Упутством сагледани структура и обликовање рада за публикување

Кратак садржај

Кратак садржај рада треба да садржи сажет опис проблема, примењене методе и закључке. Он је есенцијални део рада и треба да буде јасан и концизан. Кратак садржај треба да буде информативан, дајући преглед проблематике, поступка и главних закључака, резултата и њиховог значаја. Не треба писати у првом лицу, не наводити референце и једначине и избегавати скраћенице. Не треба да садржи више од 300 речи (на српском) до 350 (на енглеском, укључујући и одређене и неодређене чланове испред именица).

Кључне речи

Навести до максимално шест кључних речи, одвојених међусобно запетама

Примљено: (уноси Редакција)

Рецензирано: (уноси Редакција)

Измењено: (уноси Редакција)

Одобрено: (уноси Редакција)

*Кореспондирајући аутор: (име и презиме, телефон)

E - mail:

1. УВОД

У часопису „Електропривреда” се објављују категорисани чланци: оригинални научни радови, претходна саопштења, прегледни и стручни радови из области електропривреде и енергетике.

Сви радови подлежу рецензији. За оригиналност рада, квалитет и веродостојност резултата одговорни су искључиво аутори. Предајом рада аутори прихватају сва правила наведена у овом упутству.

Овај документ садржи упутства за припрему радова. Моле се аутори да се у припреми радова у потпуности придржавају овог упутства како би се избегли проблеми при штампању рада.

Документ је узорак за *Microsoft Word* (верзија 7 и виша) и уједно је и пример жељеног изгледа рада. У њему су садржане све потребне информације о формату рада, типу и величини фонтова, као и правила која објашњавају поступке у вези са једначинама, мерним јединицама, сликама, табелама и осталим деловима рада.

Комплетан рад који садржи рукопис, табеле, графиконе, цртеже, фотографије и пуна имена и презимена аутора са афилијацијама треба доставити постављањем онлајн на апликацију за руковање рукописима, доступну на веб-сајту Часописа, <https://epijournal.eps.rs/prijava> или, алтернативно, слањем на имејл адресу: epijournal.editor@eps.rs.

Обим рада је највише десет страна (не рачунајући списак литературе и наслов, кључне поруке, кратак садржај и кључне речи на енглеском језику), осим у случајевима прегледних радова и специјалних издања Часописа са проширеним награђеним радовима са конференција, у ком случају број страница није ограничен, али се препоручује да буде до 16.

Оригинал рада треба да буде презентован у формату A4 (210x297) mm. Текст рада треба да буде поравнат по обе маргине. Све маргине треба да буду подешене на 2 cm. Текст рада треба да буде урађен са *single* проредом. Рад може бити написан на српском или енглеском језику. (Уредништво одлучује који радови ће бити преведени и на други језик, како би били доступни што већем скупу читалаца.) Величина фонта за поједине делове текста је као у овом Упутству. У раду треба избегавати целовита математичка извођења. Неопходна извођења могу се дати, по потреби, као целине, у виду једног или више прилога.

Овај документ може се директно преузети са веб адресе <https://epijournal.eps.rs> и користити као подлога за припрему рукописа, једноставним уношењем делова текста рада на одређена места у овом документу.

Препорука је да текст рада почне уводом у коме се формулишу проблем и задатак рада. Даје се преглед и коментар коришћене литературе из наведене области и указује на позицију и допринос рада у односу на наведену литературу.

2. НАСЛОВ ПОГЛАВЉА (на пример: ПРИПРЕМА ТЕКСТА)

Ради веће јасноће текст рада треба поделити на поглавља и потпоглавља. Поглавља и потпоглавља треба нумерисати арапским бројевима, потпоглавља бројевима раздвојеним тачком. Наслове поглавља и потпоглавља од текста пре и после наслова одвојити једним празним редом. Треба избегавати прелом текста на наслову или поднаслову у тексту.

2.1 Нивои потпоглавља

Са потпоглављима није пожељно ићи ниже од другог нивоа, на пример 2.1, 3.3 и сл.

2.1.1 Трећи ниво потпоглавља. Дозвољен је само изузетно, уколико доприноси методолошкој и генералној јасноћи текста рада и пише се, као и наслови потпоглавља, болдираним малим словима, али се завршавају тачком, након које, у наставку тог реда и писана нормалним фонтом, почиње прва реченица тог потпоглавља.

2.2 Позиционирање табела и графичких прилога

Табеле, слике и графици могу, по потреби, да буду у једној колони или преко обе колоне. Све слике и табеле треба да буду постављене у текст близу, али никако испред, места у тексту на коме се први пут помињу. Слике и табеле у прилозима треба да буду означене на исти начин као у тексту рада.

2.3 Прва страна

На средини прве стране наводи се наслов рада **bold** словима величине 16, типа *Times New Roman*. Испод наслова наводе се пуна имена и презимена аутора словима величине 11. Испод имена и презимена наводе се афилијације аутора, словима величине 10. После навођења података о ауторима, на првој страни се наводе кључне поруке рада, резиме рада и кључне речи, словима величине 11.

Уколико је рад писан и за објављивање одобрен само на српском језику, после садржаја описаног у претходном пасусу, у коначној верзији рада за публикување наводе се и наслов рада, кључне поруке, резиме рада и кључне речи на енглеском језику.

Уколико је рад писан на енглеском језику и одобрен за објављивање, у целости се преводи и објављује и на српском језику, у идентичном форматирању.

Уколико је рад писан на српском језику и одобрен за објављивање на оба језика, у целости се преводи и објављује и на енглеском, у идентичном форматирању.

У доњем левом углу прве стране треба дати пуне податке потребне за остварење контакта са првим аутором рада.

Све ово се једноставно реализује коришћењем датог модела прве стране једноставним уношењем предвиђеног текста на за то предвиђена места у Упутству.

2.4 Поднаслов (на пример: Текст рада)

Текст рада се једноставно уноси уместо текста упутства у овај формат уношењем или копирањем делова текста који су урађени у складу са овим упутством на за то предвиђене места у упутству.

2.5 Једначине

Једначине треба поставити на средину текста и нумерисати их арапским бројевима у малим (округлим) заградама уз десну маргину текста. За једначине треба користити математички софтвер (*Microsoft Equation Editor for MS Word* или *MathType*). На пример:

$$I_F = I_B = -I_C = \frac{-J\sqrt{3}E_A}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

Једначине треба одвојити од текста пре и текста после размаком од 6 поинта. Символи који се користе у једначини морају бити дефинисани пре него што се појаве у једначини или непосредно после једначине. Позивање на неку једначину у тексту врши се навођењем броја једначине у малој загради (1). Ако се реченица почиње позивом на једначину тада користити „Једначина (1) је ...”.

2.6 Табеле

Табеле треба да буду убачене у текст на местима где се први пут помињу или непосредно после. Треба да буду означене римским бројевима, а број и назив табеле треба да буду изнад табеле. На пример:

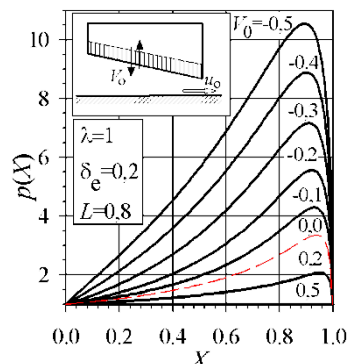
Табела 1 Трајање симулација и заузеће меморије

ИСЦАС	ЦПУ време [с]	заузеће меморије [МБ]
ц17	2	3.9
ц432	62	68.7
ц880	160	152.6
ц1355	283	178.8

2.7 Сlike

Сlike треба да буду брижљиво припремљене и унесене у текст на предвиђено место. Број и назив сlike морају бити испод сlike. Бројеве сlike означавају арапским бројевима. Ради бољег разумевања избегавају прекомерне информације на сликама. Сви коментари који се односе на сlike треба да се налазе у заглављу. Куцане ознаке треба да буду изабране пажљиво да би се обезбедила јасноћа. Покушати да се осе на сликама опишу и речима, не само симболима. На пример, боље је написати *време t*,

него само *t*. Ознаке за мерне јединице треба ставити у заграде.



Слика 1. Опис сlike

3. ЗАКЉУЧАК

Иако закључак треба да садржи преглед кључних резултата рада, у њему не треба понављати део наведен у кратком садржају. Закључак може да објасни значај рада или предложи могуће примене остварених резултата и да смернице за даља истраживања проблематике третиране у раду.

ЗАХВАЛНИЦА

Захвалнице за спонзорство, финансирање или помоћ у раду, ако их има, треба да буду као посебан, нумерисан део пре списка литературе. У наслову користити једину и када има више захвалница.

ЛИТЕРАТУРА

Списак коришћене литературе треба да буде на крају рада у посебном, нумерисаном делу. Референце се нумеришу арапским бројевима у средњим (угластим) заградама, по редоследу цитирања у тексту рада. При навођењу обратити пажњу на то да референце буду тачне и комплетне, тј. да потпуно описују изворе података.

Све наведене референце морају бити директно цитиране у самом тексту рада навођењем броја референце у средњој (угластој) загради. Не ограничавати се само на навођење својих референци, већ навести и релевантне референце из посматране области.

У наставку се дају примери начина навођења литературе: рад објављен у часопису [1], књига [2], поглавље у књизи више аутора [3], рад објављен у зборнику радова са конференције [4] и чланак преузет са веб сајта [5].

- [1] Šiljak D. D, Stipanović D. M, “Robust Stabilization of Nonlinear Systems – the LMI Approach”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp. 461-493, 2000.

- [2] Марковић З., „Гранична стања челичних конструкција према еврокоду”, Академска мисао, Београд, 2014.
- [3] Deavours D., “UHF RFID Antennas”, in: Bolić M. (Ed.), *RFID Systems – Research Trends and Challenges*, Ch. 3, Wiley, New York, 2010.
- [4] Ocokoljić G., Živković S., Subotić S., “Aerodynamic Coefficients Determinations for the ATM Model with Lateral Jets Simulation – Experimental and Numerical Methods”, *Proc. 4th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2011*, Belgrade, Serbia, pp. 17-22, 6-7 October 2011.
- [5] Вукић Б., „Друштвене игре за високопозициониране пословне људе” [Internet]. Beograd; Novi Sad: Adizes Southeast Europe; 2010 [citirano 19.03.2012]. Dostupno на: <http://www.asee.rs/?page=142&oi=69>

ДОДАТАК (ПРИЛОГ) 1

Додаци, уколико су неопходни, треба да буду наведени после Литературе. Ако их има више, треба да буду нумерисани арапским бројевима. У случају да прилози садрже табеле или слике, они се нумеришу словом „А” иза кога следи тачка и редни број (и то: за табеле римски, од „I” надаље, редом јединствено за све прилоге; а за слике арапски, од „1” надаље, јединствено за све прилоге).

ДОДАТАК (ПРИЛОГ) 2

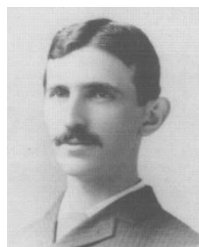
У зависности од њиховог садржаја, прилози могу бити форматирано двостубачно или једностубачно. У случају када то читаоцу омогућава бољу прегледност, слике и табеле у прилозима могу бити заротиране улево за 90°.

Табела А.1 Назив прве табеле у Прилогу

Заглавље	Колона 1	Колона 2	Колона 3	Колона 4	Колона 5	Колона 6	Колона 7
Ред 1							
Ред 2							
Ред 3							
Ред 4							
Ред 5							
Ред 6							

БИОГРАФИЈЕ

Треба дати кратку биографију за сваког аутора. Почети именом и презименом аутора и дати његову кратку, претежно стручну биографију. Треба укључити и фотографију аутора. Пример биографије је дат у наставку.



Никола Тесла је рођен у Смиљану у Аустријском царству, 9. јула 1856. Завршио је Аустријску политехничку школу у Грацу и студирао на Универзитету у Прагу. Његово радно искуство укључивало је *American Telephone Company*, Будимпешта, *Edison*

Machine Works, *Westinghouse Electric Company* и *Nikola Tesla Laboratories*. Његова посебна поља интересовања су биле области високих фреквенција. Тесла је добио почасне дипломе од институција високог образовања

укључујући Универзитет Колумбија, Универзитет Јејл, Универзитет у Београду и Универзитет у Загребу. Добио је медаљу *Elliott Cresson* Института Френклин и Едисонову медаљу IEEE. Године 1956. термин *тесла* (Т) је усвојен као јединица за густину магнетног флука у систему MKSA. Године 1975. Електроенергетско друштво (*Power Engineering Society*) је установило награду Никола Тесла у његову част. Тесла је преминуо 7. јануара 1943. године.

Аутори су обавезни да Редакцији часописа приликом доставе рада доставе и потписану изјаву о ауторству и оригиналности рукописа, чији се образац може преузети са сајта Часописа, <https://epijournal.eps.rs>.

First A. Author¹, Second B. Author², Third C. Author³, ...



Instructions for the preparation of article - the title of the article

(NOT MORE THAN FOUR LINES)

¹ Affiliation of the first author - institution, city, country*

² Affiliation of the second author - institution, city, country (if differs from 1)

³ Affiliation of the third author - institution, city, country (if differs from 1, 2)

...

Category of article: (Editor's input)

UDK: (Editor's input)

Highlights

- Key aspects and messages of the work should be presented in a maximum of four short items/bullets
- The sentences of these items must be short, concise, auxiliary verbs can be omitted
- E.g.: The structure and design of work for publication are considered by the instruction

Abstract

The Abstract of the article should contain a concise description of the problem, applied methods and conclusions. It is an essential part of the article and should be clear and concise. The Abstract should be informative, giving an overview of the issues, the procedure and the main conclusions, results and their significance. Do not write in the first person, do not list references and equations, and avoid abbreviations. It should not contain more than 300 words (in Serbian) to 350 (in English, including definite and indefinite articles before nouns).

Keywords

Specify up to six keywords, separated by commas

Received: (Editor's input) Reviewed: (Editor's input)

Modified: (Editor's input) Accepted: (Editor's input)

*Corresponding author: (name, phone)

E - mail:



