

31. PROCESING

6–8
jun | 2018

31. Međunarodni kongres o procesnoj industriji PROCESING '18

6–8. jun 2018, Bajina Bašta

31st International Congress on Process Industry PROCESING '18

June 6–8, 2018, Bajina Bašta, Serbia



ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS

ZBORNİK RADOVA
pisanih za 31. kongres o procesnoj industriji
PROCESING 2018

„Zepter hotel Drina“, Bajina Bašta
6–8. jun 2018.

Izdavač

Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije (SMEITS)
Društvo za procesnu tehniku
Kneza Miloša 7a/II,
11000 Beograd

Predsednik Društva za procesnu tehniku
pri SMEITS-u

prof. dr Miroslav Stanojević, dipl. inž.

Urednici

Prof. dr Miroslav Stanojević, dipl. inž.
Prof. dr Aleksandar Jovović, dipl. inž.

Tiraž

550 primeraka

Štampa

Bside, Beograd

ISBN

978-86-81505-86-1

CIP- Katalogizacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije

621(082)(0.034.2)
66.01(082)(0.034.2)

КОНГРЕС о процесној индустрији ПРОЦЕСИНГ (31 ; 2018 ; Бајина Башта)

Zbornik radova [pisanih za 31. kongres o procesnoj industriji] - PROCESING 2018 [Elektronski izvor] : 6-8. jun 2018, Bajina Bašta / [organizator Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Društvo za procesnu tehniku ; urednici Miroslav Stanojević, Aleksandar Jovović]. - Beograd : Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Društvo za procesnu tehniku, 2018 (Beograd : Bside). - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemska zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovnog ekrana. - Tiraž 550. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-81505-86-1

1. Савез машинских и електротехничких инжењера и техничара Србије (Београд). Друштво за процесну технику

a) Машинство - Зборници

b) Процесна индустрија - Зборници

COBISS.SR-ID 265427980

SADRŽAJ

1. Procesne tehnologije

1. UPRAVLJANJE LINIJOM ZA BELJENJE I BOJENJE PREDIVA
U TEKSTILNOJ INDUSTRIJI
Stanko P. STANKOV, Dragan S. ANTIĆ, Nikola B. DANKOVIĆ,
Milutin P. PETRONIJEVIĆ 15
2. ISPITIVANJE NOVOG POSTUPKA SINTEZE SCHIFF-OVE BAZE U
MIKROREAKTORSKOM SISTEMU
Julijana TADIĆ, Petra PAVLOVIĆ, Marina MIHAJLOVIĆ,
Dušan MIJIN, Mića JOVANOVIĆ 23

2. Projektovanje, izgradnja, eksploatacija i održavanje procesnih postrojenja

3. ANALIZA LOMA ZAVARENE BOCE ZA TRANSPORT TEČNOG HLORA
Radomir JOVIČIĆ, Simon SEDMAK, Sanja PETRONIĆ,
Katarina JOVIČIĆ BUBALO, Vuk ADŽIĆ 27
4. ODREĐIVANJE OTPORNOSTI PREMA LOMU MATERIJALA CEVOVODA PRIMENOM
EPRUVETA OBLIKA PRSTENA
Bojan MEĐO, Walid MUSRATI, Nenad GUBELJAK,
Primož ŠTEFANE, Miodrag ARSIĆ, Marko RAKIN 35
5. KAKO PRIPREMITI TEHNIČKI IZVEŠTAJ
– OD NAUČNOG DO ŽURNALISTIČKOG PRISTUPA
Marija STEVANOVIĆ, Mirjana STAMENIĆ, Srbislav GENIĆ,
Petar KOLENDIĆ, Marko SAVANOVIĆ 41

4. Energija u procesnoj industriji

6. STANDARDNI I SAVREMENI PRISTUPI U ODREĐIVANJU ENERGETSKIH
KARAKTERISTIKA VELIKIH I MALIH HIDROELEKTRANA
Ivan BOŽIĆ, Radiša JOVANOVIĆ 49
7. PRIMENA METODA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U OBNOVLJIVIM IZVORIMA
ENERGIJE I ENERGETSKOJ EFIKASNOSTI
Radiša JOVANOVIĆ, Ivan BOŽIĆ 63
8. STANDARDIZACIJA U OBLASTI OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE
Aleksandra VUKIČEVIĆ, Ivana TOPALOVIĆ, Marijana PETKOVIĆ,
Mirjana MIRKOVIĆ ĐORĐEVIĆ 83

5. Inženjerstvo životne sredine i održivi razvoj u procesnoj industriji

9. EKONOMSKI INDIKATORI ODRŽIVOSTI
U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU
Mirjana JOKANOVIĆ, Dušan GOLUBOVIĆ, Blagoje ŠUPIĆ,
Aleksandra KOPRIVICA 93
10. UTICAJ VRSTE PLASTIFIKATORA NA MEHANIČKE KARAKTERISTIKE I
PROPUSLJIVOST VODENE PARE POLISAHARIDNIH FILMOVA
Pavle SPASOJEVIĆ, Sanja ŠEŠLIJA, Vesna PANIĆ 99
11. ISPITIVANJE BARIJERNIH I MEHANIČKIH SVOJSTAVA FILMOVA
NA BAZI MODIFIKOVANOG PEKTINA
Sanja ŠEŠLIJA, Pavle SPASOJEVIĆ, Vesna PANIĆ, Ivanka POPOVIĆ 103
12. NAČINI SMANJENJA EMISIJA OTPADNIH GASOVA
IZ RAFINERIJSKIH POSTROJENJA
Stojan SIMIĆ, Goran ORAŠANIN, Miroslav STANOJEVIĆ 107

7. Sušenje i sušare

13. STRUJNO-TERMIČKI PRORAČUN VERTIKALNE SUŠARE ZA SUŠENJE ZRNASTIH
MATERIJALA U A.D. „KIKINDSKI MLIN“, KIKINDA
Duško SALEMOVIĆ, Matilda LAZIĆ, Aleksandar DEDIĆ, Dragan HALAS 115

СТАНДАРДНИ И САВРЕМЕНИ ПРИСТУПИ У ОДРЕЂИВАЊУ ЕНЕРГЕТСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ВЕЛИКИХ И МАЛИХ ХИДРОЕЛЕКТРАНА

STANDARD AND CONTEMPORARY APPROACHES IN DETERMINING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF LARGE AND SMALL HYDROPOWER PLANTS

Иван БОЖИЋ*, Радиша ЈОВАНОВИЋ
Универзитет у Београду Машински факултет, Београд

Рад по позиву

<https://doi.org/10.240/ptk.018.30.1.49>

У области обновљивих извора енергије хидроенергија се сврстава у економски и еколошки прихватљиве изворе за чију се енергетску трансформацију примењују изузетно ефикасни и поуздани системи. Пројектовање и експлоатација таквих система у динамички тржишном орјентисаном окружењу захтевају континуално ажурирање и квалитетно одређивање битних енергетских карактеристика. Одређивање хидроенергетских потенцијала река, енергетско вредновање нових и ревитализованих малих и великих хидроелектрана и предикција производње електричне енергије у њима се врше на основу бројних критеријума, помоћу енергетских и економских показатеља и коришћењем различитих методолошких приступа. Предуслов за добијање поузданих података и ваљане предикције, независно од примењене методологије, заснива се на добром познавању хидролошких прилика, експлоатационих карактеристика хидроагрегата у широкој радној области и промене потрошње у времену. Електроенергетска производња у хидроелектранама је преваходно заснована на показатељима хидролошких и метеоролошких услова који су по свом карактеру стохастичке, нестационарне и неравномерне величине. Потрошња као квантитативан параметар припада истој категорији величина, док се у хидроелектране уграђују турбине чије се експлоатационе карактеристике одређују опсежним и изузетно скупим експерименталним испитивањима. Постојећи стандарди дефинишу услове, процедуре и поступке мерења, мерну опрему, обраду и анализу резултата мерења у зависности од врсте захтеваних испитивања. У циљу рационализације услова за добијање карактеристика хидрауличних турбина све више се примењују савремени нумерички експерименти засновани на несавршеним нумеричким симулацијама струјања. Последњих година, примена метода вештачких неуронских мрежа за одређивање поузданих параметара хидрауличних турбина, предикцију производње и оптимизацију рада хидроелектрана показује своја преимућства. У раду су приказане уобичајене методе које прописују стандарди за лабораторијско и теренско испитивање великих и малих хидроелектрана, као трендови коришћења савремених приступа, указујући на њихове предности и недостатке.

Кључне речи: хидроенергетика; хидрауличне турбине; стандарди; вештачке неуронске мреже

In the field of renewable energy sources, hydropower is classified as economically and environmentally acceptable source where highly efficient and reliable systems are applied in energy transformation. Designing and exploiting such systems in a dynamic market-oriented environment require continuous updating and quality determination of essential energy characteristics. Determination of hydroenergy potentials of rivers, energy evaluation of new and revitalized small and large hydropower plants and the prediction of their electricity generation are carried out on the basis of numerous criteria, using energy and economic indicators and using different methodological approaches. The prerequisite for obtaining reliable data and valid predictions, regardless of the applied methodology, is based on a good knowledge of hydrological conditions, exploitation characteristics of hydropower plants in a wide operating range and consumption changes in time. Electricity generation in hydropower plants is primarily based on indicators of hydrological and meteorological conditions that are in their character stochastic, non-stationary and unevenly distributed. Consumption as a quantitative parameter belongs to the same category as above, while hydropower plants are equipped with turbines whose operating characteristics are determined by extensive and extremely expensive experimental tests. The existing standards define the conditions and measurement procedures, measuring equipment and analysis of measurement results depending on the type of required testing. In order to rationalize the conditions for obtaining the characteristics of hydraulic turbines, modern numerical

* Аутор за кореспонденцију: ibozic@mas.bg.ac.rs

experiments based on imperfect numerical simulations of flow are increasingly applied. In recent years, the application of artificial neural network methods for determining reliable parameters of hydraulic turbines, production prediction and optimizing the operation of hydroelectric power plants has shown its strengths. The paper presents the usual methods prescribed by the standards for laboratory and field testing of large and small hydropower plants, as well as trends of using contemporary approaches, pointing out their advantages and disadvantages.

Key words: *hydropower; hydraulic turbines; standards; artificial neural networks*

1. Увод

Стратешки приоритети развоја домаће и регионалне енергетике указују на значај хидроенергетских објеката у остваривању енергетске безбедности и одрживости, као и на њихову улогу у савременом врло динамичном тржишту енергије. Управо тежња ка што већем учешћу енергије из обновљивих извора у бруто финалној потрошњи енергије промовише преимућства коришћења хидроенергије и потврђује потребу за изградњом нових и за ревитализацијом постојећих великих и малих хидроелектрана, као и њиховом експлоатацијом у саставу сложених електроенергетских система.

Вредновање хидроелектрана (ХЕ) се остварује помоћу бројних критеријума и енергетских и економских параметара. Вишедимензионалност при вредновању ХЕ и предикцији производње електричне енергије у њима додатно компликују стохастички, нестационарни и неравномерни хидролошки и метеоролошки показатељи, као и посебности конзума кога карактерише флукутирајућа потрошња. Вишедеценијски истраживачки и инжењерски напори да се успоставе поуздане функционалне везе између свих релевантних параметара довели су до разних методолошких приступа и бројних математичких модела којима се симулирају процеси и одређују карактеристике у ХЕ и врше прогнозе и предвиђања њихове експлоатације.

У наставку рада биће дат кратак осврт на класичне и савремене методе одређивања битних енергетских карактеристика ХЕ са посебним освртом на одређивање енергетских карактеристика хидрауличних турбина које се уграђују у велика и мала хидроенергетска постројења.

2. Енергетске карактеристике хидроелектрана

Независно од улоге коју има у електроенергетском (ЕЕС) и вишенаменском водoprивредном (ВПС) систему, свака ХЕ, и велика и мала, се одликује специфичностима, које се квантификују великим бројем параметара [1]. Све параметре није могуће једноставно груписати по значају и приоритету, али их је могуће условно сврстати у две класе. Првој класи припадају параметари који дефинишу основне енергетске карактеристике ХЕ, а у другој класи су параметри који приказују особености ХЕ у саставу сложенијег ЕЕС и ВПС.

Првој класи припадају следећи показатељи ХЕ: укупна и корисна запремина акумулације, инсталисани проток, гарантовани еколошки проток, карактеристични бруто и нето падови, геометрија деривационог система, инсталисана, максимална и гарантована снага, тип и број хидроагрегата, степен корисности и друге битне хидролошке и погонске особености.

Другу класу између осталих чине: захтевани протоци, захтевана производња електричне енергије, расположивост, могућа средња годишња производња енергије, годишња производња одређених вероватноћа, потреба за снабдевањем водом и наводњавањем, улога у дијаграму оптерећења и структура у ЕЕС, карактеристике ХЕ у ЕЕС, утицај структура и карактеристика других енергетских система у ЕЕС на разматрану ХЕ итд.

У циљу квалитетног планирања, пројектовања и оптималног коришћења ХЕ неопходно је анализирати међусобне утицаје и везе свих претходно наведених параметара у довољно дугом временском домену. Такве анализе изискују квалитетне методолошке приступе и формирање комплексних хидродинамичких и хидроенергетских математичких модела који се једино могу решавати компјутерским симулацијама узимањем у обзир разних хидролошких прилика и понашања конзума у динамички тржишно орјентисаном окружењу. У те сврхе истраживачки тимови широм света имплементирају своја мултидисциплинарна знања у моћне модерне софтверске алате. Разноврсност и комплексност математичких модела условљена је пре свега захтевима и потребама крајњих корисника, али и концептуалним развојним приступима ка моделима заснованим на коришћењу реалних измерених података, физички заснованим моделима и комбинованим тзв. хибридниим моделима [2].

Предуслов за добијање квалитетних математичких модела, верификованих и поузданих података, као и ваљане предикције било које енергетске карактеристике ХЕ се, у основи, заснива на добром познавању хидролошких података и експлоатационих карактеристика хидроагрегата у широкој рад-

ној области. Остали фактори се уводе у моделе у зависности од значаја и доступности релевантних величина и/или као претпоставке и/или као вредности које имају занемарљив утицај.

1.1 2.1. Проток – основни енергетски показатељ

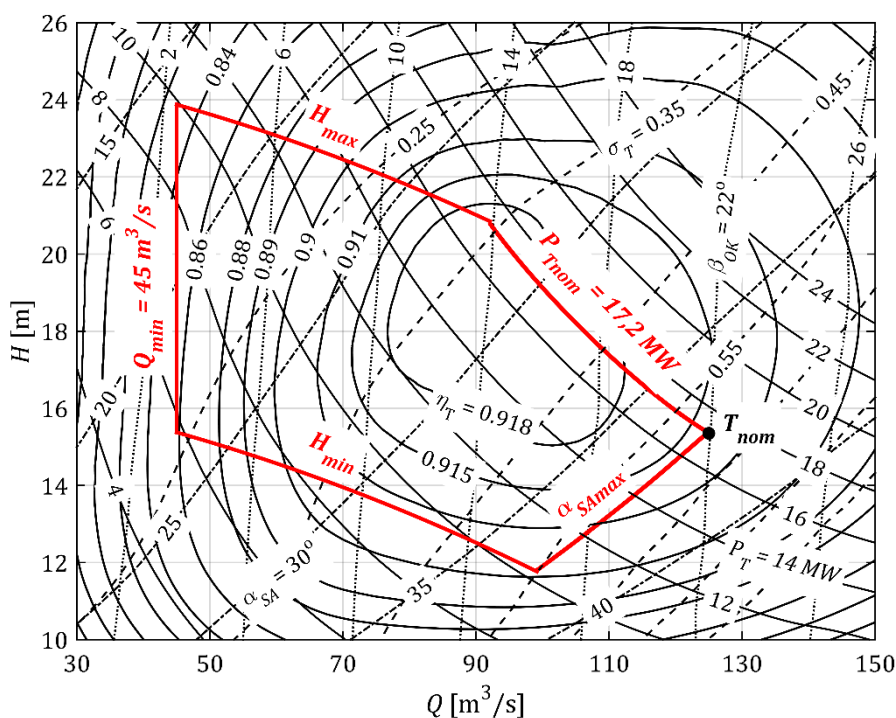
Изучавање бруто и нето хидроенергетског потенцијала, а затим и поуздано одређивање техничког и економски искористивог потенцијала, заснива се на перманентним хидролошким истраживањима. Значај тих истраживања је немерљив при разматрању и доношењу одлука за најповољније интегрално управљање сложеним водопривредним и електроенергетским системима. Од првих теоријских истраживања, графоаналитичких метода, формирања хидрограма (хидрографа), затим преко предвиђања и анализа вероватноћа појаве великих вода, дефинисања кривих трајања, па до статистичких и савремених нумеричких анализа, хидрологија се увек ослањала на хидрометрију. Поуздани подаци добијени дуготрајним мерењима представљају основ за доношење закључака о стварном интензитету промена посматране величине [3].

Поред пада који је углавном последица конфигурације терена и изабране шеме (прибранска, деривациона или комбинована) хидроенергетског коришћења вода, проток је један од најзначајнијих параметара за хидроелектране. Проток је стохастичка величина изразито променљивог и неравномерног карактера у времену која директно утиче на расположиву снагу и могућу производњу ХЕ. Поуздан податак о расположивом протоку у условима природних и регулисаних експлоатационих режима, помаже правилном расподељивању протока по хидроагрегатима у циљу максимизације степена искоришћења енергије воде.

Иако је доток на профилу ХЕ динамички врло променљив, његова интегрална вредност је функција многих других такође стохастичких варијабли, које потичу од: падавина, испаравања, отицаја, процуривања и других ефеката. Стога, поузданост добијеног податка о протоку у смислу симулационог математичког моделирања и његове предикције је у опсегу збирне грешке предикције и одређивања сваке утицајне величине, док је мерењем добијени податак о протоку искључиво у границама мерне несигурности.

2.2. Енергетске карактеристике хидроагрегата

У хидроелектране се уграђују агрегати чије се карактеристике одређују опсежним експерименталним испитивањима. Хидроагрегат се састоји од хидрауличне турбине, која има своје експлоатационе карактеристике одређене за широк опсег радних режима, и генератора са припадајућим погонским карактеристикама.



Слика С.2.1 Експлоатациона карактеристика Каплан турбине са линијама ограничења рада [4]

Енергетске и кавитацијске карактеристике турбина зависе од многих утицајних параметара и имају вишедимензионални карактер, па се уопштено могу приказати следећим релацијама:

$$\eta_T = \eta_T(D_1, \beta_{OK}, \alpha_{SA}, Q, n, H, P_T, \theta, \rho, g, \dots) \quad (1)$$

$$\sigma_T = \sigma_T(D_1, \beta_{OK}, \alpha_{SA}, Q, n, H, P_T, \theta, \rho, g, \dots) \quad (2)$$

где су: η_T – степен корисности турбине, σ_T – кавитациони коефицијент турбине, D_1 – пречник обртног кола, β_{OK} – отвор лопатица обртног кола, α_{SA} – отвор лопатица спроводног апарата, Q – проток кроз турбину, n – брзина обртања, H – нето пад, P_T – снага турбине, θ – температура воде у струјном простору турбине, ρ – густина воде и g – убрзање Земљине теже. Уобичајено је графичко представљање ових релација као просторних расподела карактеристичних величина турбине на начин дат на слици С.2.1. На слици је, примера ради, приказана експлоатациона карактеристика једне турбине двојне регулације са линијама ограничења рада за конкретну хидроелектрану.

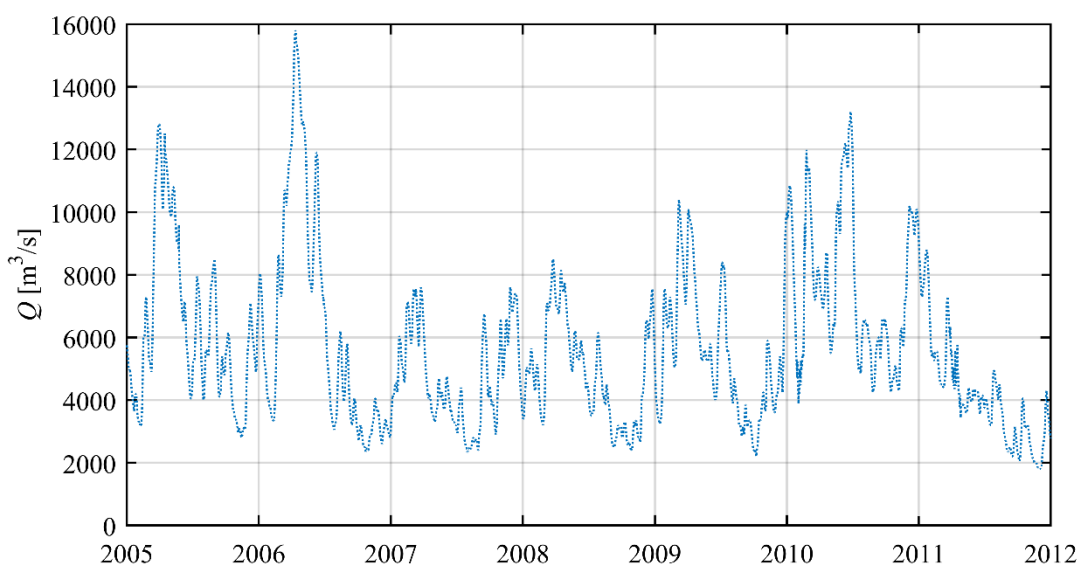
3. Одређивање енергетских карактеристика хидроелектрана

3.1. Хидрометријски приступ у одређивању протока

Вишедеценијска, а у неким случајевима и вишевековна, мерења водостаја и протока на рекама су и даље неприкосновени и незамењиви показатељи хидролошких прилика при којима се експлоатишу постојеће и на основу којих се димензионишу будуће мале и велике ХЕ. Бројни савремени покушаји и приступи у моделирању и предикцији протока на речним профилима, који су наведени у потпоглављу 4.1 овог рада, управо су засновани на мереним подацима. Међутим, резултати добијени симулацијама нису, и даље, на нивоу очекиваних [3]. С друге стране, недоступност или неажурирање података о протоцима на мањим рекама воде ка погрешним одлукама при пројектовању малих ХЕ.

У природно регулисаним хидролошким условима, производња електричне енергије је директна последица дотицаја воде у проточним ХЕ, док се вишеструки значај акумулационих ХЕ испољава управо могућношћу да се проток може регулисати уз поштовање одређених ограничења. Ограничења углавном потичу од водопривредних потреба и еколошких захтева, али и стања у ЕЕС, захтева конзума и расположивости производних капацитета, али и ситуација као што су појаве екстремно великих и екстремно малих вода. Водопривредне потребе су детерминисане потрошњом различитих корисника у системима водоснабдевања, док се међу еколошким захтевима истиче ограничење у виду тзв. протока животне средине (еколошки прихватљиви проток, гарантовани еколошки проток (ГЕП), биолошки минимум).

Одређивање еколошког протока је од посебног значаја за планере, пројектанте и кориснике хидротехничког система. Критеријуми и разноврсност метода и приступа за одређивање овог протока су наведени у раду [5]. Посебно је приказана тзв. ГЕП метода која је развијена и примењена на више водотока на западу Балканског полуострва.



Слика С.3.1 Хидролошки подаци у условима природних и делимично регулисаних режима протока Дунава

Уобичајено је да се хидролошки подаци о појединим рекама систематизују према местима где се мерења врше. Управо такве систематизације у Републици Србији налазе се у хидролошким годишњацима за површинске воде [6]. Мерења водостаја и температура површинских вода обављају се на мрежи хидролошких станица којима располаже Републички хидрометеоролошки завод. На 58,3% од укупног броја хидролошких станица у Србији водостаји се мере дигитално, на 23,2% водомерном летвом и на 18,5% лимниграфом. Протоци воде се рачунају на основу вредности водостаја. Податке са мерних станица могуће је искористити за потребе моделирања, анализа и предикције протока. Обично се на основу расположивих података формирају хидрограми и криве трајања протока који служе за анализе и одлучивање у вези са инсталисаним протоцима за новопроектване и будуће мале и велике ХЕ, али и за разматрања могућности повећања инсталисаног протока након ревитализације постојећих ХЕ.

Када су у питању мерне станице које се налазе низводно од акумулационих ХЕ које имају могућност недељног, месечног или годишњег регулисања протока, подаци о измереним протоцима су истовремено и посредни показатељи производње у таквим ХЕ, при нормалним експлоатационим условима ХЕ (без преливања и испуштања воде) и при унутарстанично оптимално управљаним агрегатима. Подаци о дневним протоцима на реци Дунаву, приказани су на слици С.3.1, за 8 година рада. Наведени подаци се могу искористити за предикцију будућих протока, што је и дато у наставку рада, као и учешћа производње ХЕ Ђердап 1 у ЕЕС за одређени временски период.

Као и све инжењерске области и хидрологију уређују бројни ISO стандарди којима се дефинишу начини мерења и одређивања протока и одговарајућа мерна несигурност. У зависности од применене методе на отвореним водотоковима опсеги грешке мерења могу бити различити, од око 3%, па и више и од 25%.

3.2. Стандардни приступи у одређивању карактеристика хидрауличних турбина

Одређивање енергетских карактеристика хидрауличних турбина за широку област рада подразумева једну од следећих стандардних активности: експериментална лабораторијска моделска испитивања уз прерачунавање карактеристика модела на карактеристике прототипа (главног извођења) и/или теренска испитивања на хидроелектранама.

Стандард ИЕС 60193:1999-11 [7] дефинише услове, процедуре и поступке мерења, мерну опрему, обраду, анализу резултата мерења и мерну несигурност за лабораторијска испитивања модела турбина и пумпи-турбина које су уграђују у велике ХЕ, односно реверзибилне ХЕ, чија су главна извођења са референтним пречницима већим од 3 m и који остварују снаге веће од 5 MW.

У зависности од обима и свеобухватности експерименталних лабораторијских истраживања на моделу турбине добијају се поуздани мерни подаци са релативно малом укупном мерном несигурношћу. Стандардом [7] прописана вредност укупне релативне грешке мерења за степен корисности у оптималној радној тачки износи око $\pm 0.3\%$, што се употребом савремених мерних метода и мерне опреме остварује у софистицираним лабораторијама. Удаљавањем од оптималног режима у коме је вредност степена корисности највећа, вредности укупне грешке мерења расту, поготово за мање протоке.

Хидраулички степен корисности модела η_{hM} се прерачунава на хидраулички степен корисности прототипа η_{hP} помоћу стандардом [7] предвиђене формуле (3) која је у употреби последњих деценија:

$$\eta_{hP} = \eta_{hM} + \frac{1 - \eta_{hMopt}}{\left(\frac{Re_{ref}}{Re_{Mopt}}\right)^{0.16} + \frac{1 - V_{ref}}{V_{ref}}} \left[\left(\frac{Re_{ref}}{Re_M}\right)^{0.16} - \left(\frac{Re_{ref}}{Re_P}\right)^{0.16} \right] \quad (3)$$

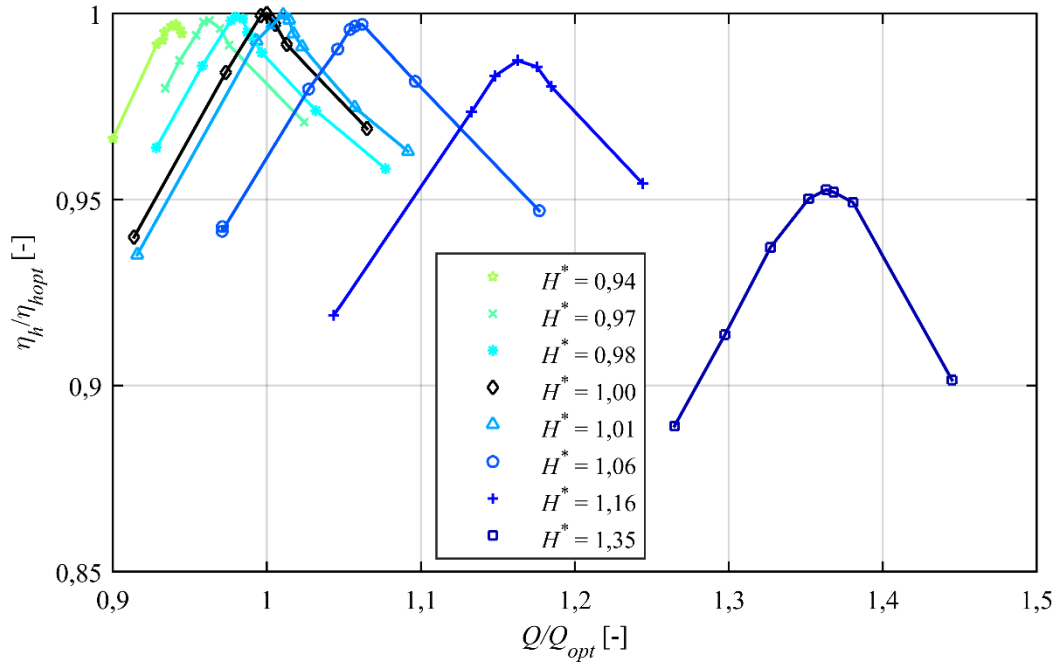
где су: η_{hMopt} – оптимални (максимални) степен корисности модела турбине, $Re_{ref}=7 \cdot 10^6$ референтни Рејнолдсов број турбине, Re_M – Рејнолдсов број модела турбине, Re_{Mopt} – Рејнолдсов број модела турбине при максималном степену корисности, Re_P – Рејнолдсов број прототипа турбине и V_{ref} – коефицијент прерасподеле губитака у турбини.

У табели Т.1 је дат приказ неопходних процедура, провера и поступака које се врше пре, за време и након моделских испитивања.

Након прерачунавања моделских карактеристика, а пре добијања општије експлоатационе карактеристике, врши се одређивање тзв. линијских карактеристика турбине једном од стандардних предложених интерполацијских метода [7]: полиномијалне, нормалне сплајн (spline) и B-spline функције. Примера ради, на слици С.3.2 представљене су сведене линијске карактеристике $\eta_h/\eta_{hopt} = f(Q/Q_{opt})$ једне пропелерне турбине за различите нето падове $H^*=H/H_{opt}$.

Табела Т.1 Процедуре, провере и поступци пре, за време и након моделских испитивања хидрауличне турбине[7]

<p>Пре испитивања</p>	<p>Дефинисање:</p> <ul style="list-style-type: none"> - димензије модела у одговарајућој размери у односу на прототип - конструктивних карактеристика модела - захтева за успостављање сличности између модела и прототипа - услова енергетских испитивања - вредности Рејнолдсовог броја за модел реакцијске турбине (Франсис, Каплан, пропелерна, цевна) и Фрудовог броја за акцијске турбине (Пелтон) када су гаранцијске експлоатационе вредности прототипа реферисане на модел - референтних мерних пресека на улазу и излазу струјног простора турбине за које се одређује нето пад - гарантоване вредности снаге, протока, степена корисности, побега и утицаја кавитације на енергетске карактеристике - вредности кавитационих коефицијената постројења - услова кавитационих испитивања - осталих специфичности моделских испитивања - особља и одговорних лица за спровођење испитивања - обима, програма и методологије испитивања - величина које се односе на прототип: убрзање Земљине теже, температура, густина и кинематска вискозност воде, брзина обртања, референтни Рејнолдсов број, очекивани опсег кавитацијске резерве постројења, максимални нето пад при условима побега, механички губици... <p>Провера:</p> <ul style="list-style-type: none"> - калибрационих карактеристика мерне опреме и калибрација пре мерења - геометрије целог модела - зазора између лопатица обртног кола и кућишта турбине - хрпавости оквашених површина модела - функционалности мерне опреме и система за прикупљање и обраду података
<p>У току испитивања</p>	<ul style="list-style-type: none"> - успостављање и одржавање жељеног мерног режима турбине покривајући широк опсег експлоатационих услова на хидроелектрани (од минималних до максималних падова, протока, отвора обртног кола и спроводног апарата, снага ...) - мерење главних величина: угао отвора лопатица спроводног апарата, угао отвора лопатица обртног кола (за турбине двојне регулације), проток, притисци у референтним пресецима, момент на вратилу, брзина обртања, температура воде, садржај кисеоника у води, амбијентални притисак и температура - рачунање основних енергетских параметара: нето пад, снага, степен корисности, густина и кинематска вискозност воде, Рејнолдсов број, кавитациони коефицијент, провера стабилности и поновљивости мерног режима
<p>Након испитивања</p>	<p>Одређивање:</p> <ul style="list-style-type: none"> - мерне несигурности: систематска, случајна и укупна грешка мерења - основних димензионалних и бездимензионалних параметара турбине - корекције мерних вредности на моделу узимајући у обзир утицај кавитације - услова за прерачунавање и прерачунавање енергетских и кавитацијских карактеристика са модела на главно извођење - основних карактеристика прототипа <p>Представљање:</p> <ul style="list-style-type: none"> - свих измерених и рачунатих резултата у табеларној форми - битних енергетских и кавитацијских параметара турбине у јасно дефинисаним дијаграмима са потребним интерполацијама и - упоредних вредности гарантованих параметара са измереним, па прерачунатим параметрима турбине уважавајући опсег мерне несигурности <p>Извештаји:</p> <ul style="list-style-type: none"> - завршни протокол садржи све дневне извештаје у вези са одређивањима карактеристика турбине и изјавом о испуњености гарантованих параметара - коначни извештај садржи сву потребну документацију везану за пријемна или гаранцијска испитивања турбине



Слика С.3.2. Зависност степена корисности од протока за различите нето падове

У циљу добијања графичког приказа енергетске карактеристике као што је дато на слици С.2.1, врши се просторна интерполација степена корисности. Просторна интерполација се своди на задатак да се за N одређених степена корисности $\eta_{(j)}$ у измереним радним режимима $r_{(j)} = (\alpha_{SA(j)}, Q_{(j)}, H_{(j)})$ где је $j=1, \dots, N$ нађе функција $F(r)$ која ће проћи кроз дате тачке тако да се испуни услов да је $F(r_{(j)}) = \eta_{(j)}$. Претходно наведени захтев може бити испуњен помоћу многих функција.

У претходном веку постојали су бројни истраживачки покушаји да се унапреде формуле за прерачунавање степена корисности [8]. Нова сазнања о струјним феноменима и расподели хидрауличких губитака у струјном простору турбина водила су ка побољшавању претходних формула, али и њиховој сложености, и довела до нових метода прерачунавања садржаних у стандарду ИЕС 62097:2009-02 [9].

$$\eta_{hP} = \eta_{hM} (1 + \Delta_E) (1 + \Delta_T) (1 + \Delta_Q) \quad (4)$$

$$\Delta_E = \sum_{k=1}^P \frac{\delta_{Eref(k)}}{1 + 0,35(\kappa_{u(k)} \cdot \kappa_{d(k)})^{0,2}} \left[\left(4 \cdot 10^5 \kappa_{u(k)} \frac{Ra_{(k)M}}{D_M} + \frac{Re_{ref}}{Re_M} \right)^{0,2} - \left(4 \cdot 10^5 \kappa_{u(k)} \frac{Ra_{(k)P}}{D_P} + \frac{Re_{ref}}{Re_P} \right)^{0,2} \right] \quad (5)$$

$$\Delta_Q = 0,01 \left[1 - \left(\frac{K_M}{K_P} \right)^{0,5} \right] \quad (6)$$

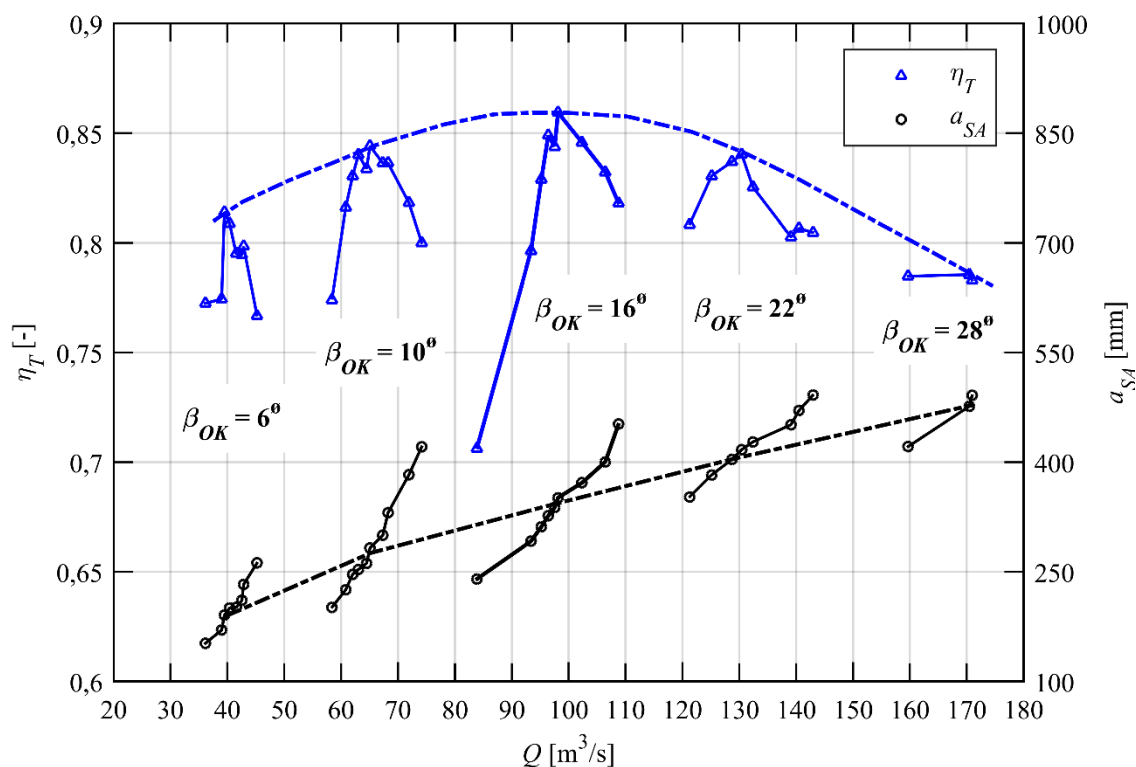
$$\Delta_T = \frac{\delta_{Tref}}{1 + 0,154 \kappa_T^{0,4}} \left[\left(7,5 \cdot 10^4 \kappa_T \frac{Ra_{TM}}{D_M} + \frac{Re_{ref}}{Re_M} \right)^{0,2} - \left(7,5 \cdot 10^4 \kappa_T \frac{Ra_{TP}}{D_P} + \frac{Re_{ref}}{Re_P} \right)^{0,2} \right] \quad (7)$$

где су: D_M – референтни пречник модела, D_P – референтни пречник прототипа, $\delta_{Eref(k)}$ – референтни прерачунаљиви губитак за k -ти део струјног простора турбине (спирално кућиште, прстен статорских лопатица, спроводни апарат, обртно коло и сифон) и δ_{Tref} – референтни губитак на спољашње површине обртног кола (диск обртног кола) када је Рејнолдсов број модела Re_M једнак референтном Рејнолдсовом броју $Re_{ref} = 7 \cdot 10^6$, $\kappa_{U(k)}$ – стандардизован брзински фактор за k -ти део струјног простора турбине, $\kappa_{d(k)}$ – стандардизован димензиони фактор за k -ти део струјног простора турбине, κ_T – димензиони фактор који се односи на губитке о спољашње површине кола, $Ra_{(k)M}$ и $Ra_{(k)P}$, – апсолутна хрпаваост оквашених зидова k -тог дела струјног простора модела и прототипа турбине, Ra_{TM} и Ra_{TP} , – апсолутна хрпаваост дискова обртног кола модела и прототипа, K_M и K_P репрезентативни коефицијенти волуметријских губитака кроз заоре модела и прототипа.

Претходно наведене формуле, које су стандардом предвиђене, представљају покушаје да се нова сазнања из области струјања у хидрауличним турбинама примене за једноставније добијање енергетских карактеристика прототипова уграђеним на великим ХЕ. Сви основни параметри главних извођења хидрауличних турбина се добијају прерачунавањем резултата са моделских испитивања уз неопходно поуздано одређивање стварне вредности хидрауличног степена корисности прототипа η_{iP} . Прерачунавањима се избегавају комплексна и скупа прототипска испитивања. Значај приказаних формула се огледа и у томе да се на савремен и релативно лакши начин могу накнадно кориговати карактеристике хидрауличне турбине која је у дугогодишњој експлоатацији, односно да се након ревитализације постојеће турбине утврде њене стварне експлоатационе карактеристике услед утицаја задржаних, модификованих и замењених појединих компонената струјног простора, а који се нису могли сагледати при моделским испитивањима.

Теренска или прототипска испитивања турбина које су уграђене у велике хидроелектране су дефинисана стандардом ИЕС 60041:1991 [10], док се пријемна испитивања малих хидроелектрана обављају у складу са стандардом ИЕС 62006:2010-10 [11]. Оба стандарда су првенствено намењена испитивањима у циљу провере гарантованих уговорених параметара или подешавања радних параметара (нпр. отвора обртног кола и отвора спроводног апарата код турбина двојне регулације) у циљу оптимизације рада целокупне хидроелектране.

Примена наведених стандарда за добијање детаљних експлоатационих карактеристика турбине у широком дијапазону рада није инжењерски рационална нити економски оправдана. Најмање што је потребно реализовати при испитивању једне ХЕ је извршити мерења за пун опсег протока при три нето пада (максимални, средњи и минимални). Међутим, остваривање потребних протока и падова у великим ХЕ зависи од реалних теренских хидролошких услова у периоду испитивања, као и потребне расположивости агрегата у складу са захтеваним потребама конзума.



Слика С.3.3 Пропелерне и комбинаторске карактеристике Каплан турбине на ХЕ Зворник за средњи референтни пад пре ревитализације[12]

Стандард ИЕС 60041:1991 прописује методологију испитивања, прикупљање и начин обраде мерених и рачунаних величина и мерне несигурности. Комплексност мерења и одређивања протока на ХЕ највише утиче на мерну несигурност степена корисности. Стандард предвиђа неколико метода за одређивање протока. Апсолутним методама се мери брзинско поље у струјном простору турбине (хидрометријска крилца, ултразвучно доплер и transite-time, акустично и електромагнетно) које се затим интегрално у проток, док се релативним методама (нпр. Winter-Kennedy метода или локално мерење брзине на једном месту у струјном простору) могу добити само релативне вредности протока.

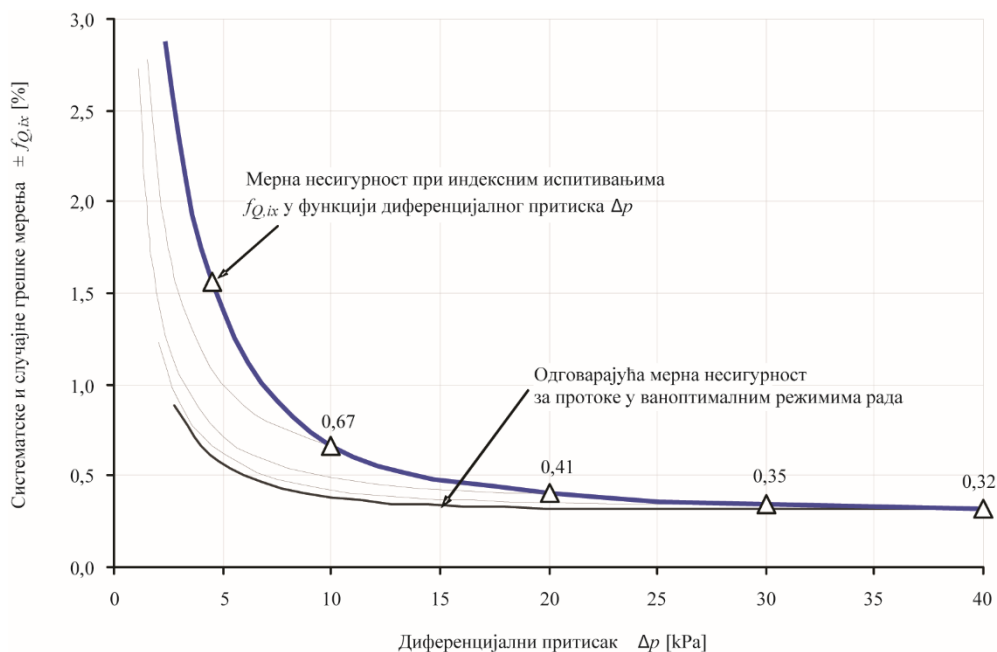
Уколико се релативна метода упореди са неком од апсолутних метода могуће је добити и стварну вредност измереног протока.

На одлуку која ће од метода бити примењена утичу ограничења која се односе на конструкцију постројења, цене мерне опреме и инсталације, као и специфичне опреме, али и ограничења везана за услове експлоатације. Када су у питању гаранцијска испитивања стандардом је предвиђена апсолутна метода мерења. У зависности од примењене методе мерења очекује се, при одређивању степена корисности, минимална укупна релативна грешка од око $\pm 1,2\%$ за области око оптималног режима рада турбине и то када се примењује апсолутна метода. Са удаљавањем од оптималног режима и применом релативне методе мерна несигурност расте. Пример одређивања пропелерних и комбинаторских карактеристика за један нето пад на великој ХЕ Зворник пре ревитализације је приказан на слици С.3.3 [12].

Стандард ИЕС 62006:2010-10 дефинише услове испитивања, мерне методе и уговорене гаранције за теренска испитивања хидроагрегата у малим ХЕ и односи се на акцијске и реакцијске хидрауличне турбине чији су референтни пречници мањи од 3 m и који остварују максималне снаге до 15 MW. Стандард предвиђа три класе испитивања: класа А, класа В и класа С.

Класом А предвиђено је одређивање максималне излазне снаге на хидрогенератору и/или на трансформатору у функцији од нето пада, као и провера зависности протока од отвора регулишућих органа (спроводног апарата или/и обртног кола) за унапред дефинисане теоријске вредности протока. При мерењима се најчешће користи већ уграђена мерна опрема за мониторинг и управљање радом мале ХЕ.

Класа В подразумева проверу линијских карактеристика турбине/агрегата за новоуграђену или ревитализовану МХЕ помоћу тзв. индексних испитивања. Ова класа се препоручује, јер се обављају испитивања повећаног обима у циљу одређивања енергетских карактеристика и проток се одређује релативним методама. За проверу зависности релативног степена корисности хидроагрегата у функцији од излазне снаге неопходно је пре испитивања поседовати очекиване линијске карактеристике које се проверавају, као и експлоатациони дијаграм ако се опсег радних падова мења више од 3%. Примена индексних испитивања подразумева поред обавезног поседовања експлоатационих карактеристика турбине за шири опсег падова и протока и познавање губитака у генератору. Овом класом испитивања могуће је оптимизовати комбинаторске зависности код турбина двојне регулације.



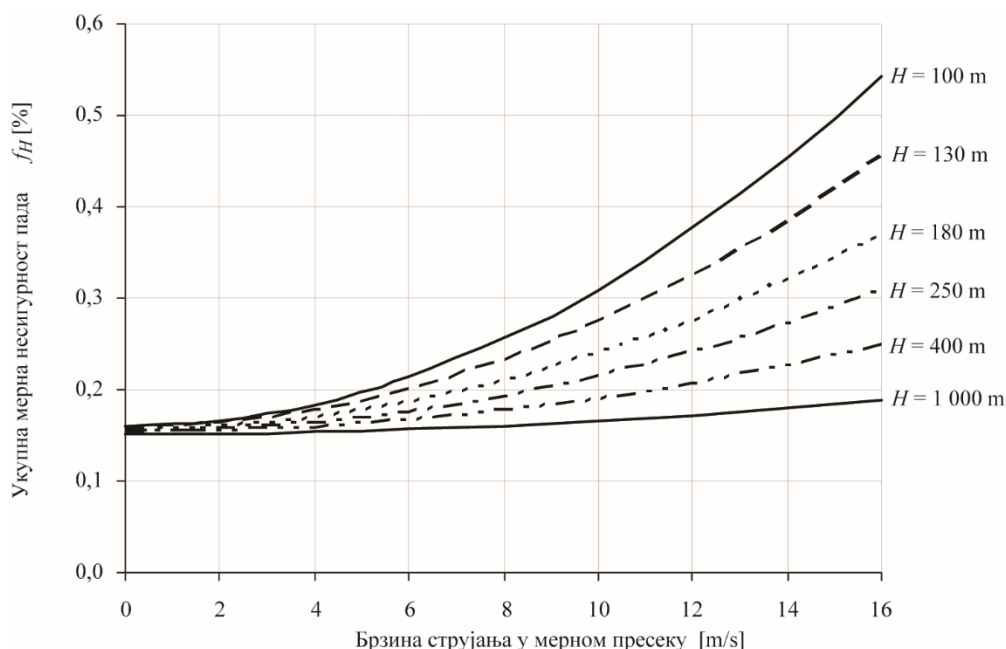
Слика С.3.4 Мерна несигурност оптималних и ваноптималних протока у функцији диференцијалног притиска при индексним испитивањима [11]

Свеобухватнија, сложенија и захтевнија мерења хидроагрегата у малим ХЕ предвиђена су испитивањима класе С, којим се одређују стварни (апсолутни) степени корисности турбина применом једне од апсолутних метода за мерење протока или термодинамичке методе уз претходно познавање експлоатационих карактеристика турбина и непосредно мерење губитака у генераторима.

Како би се утврдила поуздана карактеристика турбине за цео опсег експлоатационих услова потребно је извршити испитивања у довољном броју тачака. Број радних режима у којим ће се врши-

ти испитивања у циљу одређивања линијских карактеристика зависи од примењене методе мерења. Стандардом је предвиђено минимум шест (препоручено је осам или десет мерних тачака) које се затим интерполирају (фитују) и на тај начин добијају потребне карактеристике. Такође, тада је неопходно утврдити мерне несигурности кључних мерних величина.

На сликама С.3.4 и С.3.5 које су преузете из стандарда [11] су, редом, приказане зависност мерне несигурности одређивања протока од мереног диференцијалног притиска при индексним испитивањима, односно зависности мерне несигурности при одређивању пада од брзине струјања у референтном мерном пресеку на деривационим постројењима.,



Слика С.3.5 Мерна несигурност пада у функцији брзине струјања у референтном мерном пресеку за деривационе хидроелектране које раде при различитим падовима [11]

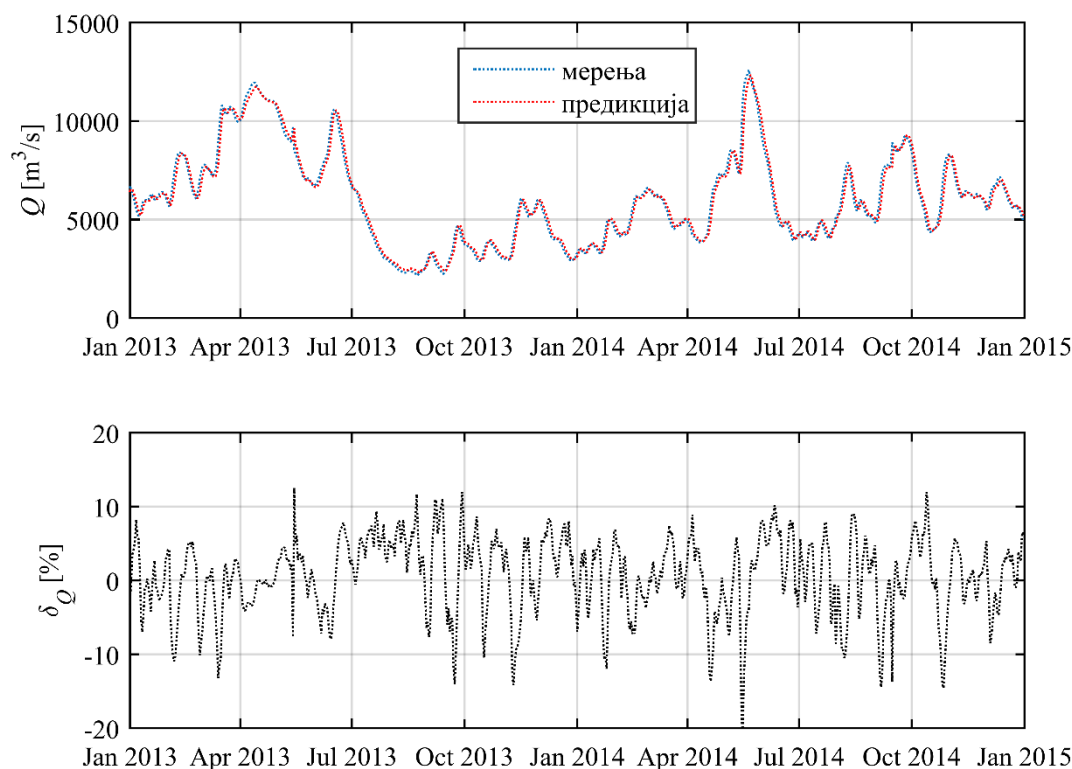
Поред протока и пада при одређивању степена корисности анализирају се и остале мерне несигурности битних мерних величина попут снаге и брзине обртања. Очекивана укупна релативна грешка степена корисности је у опсегу од $\pm 0,5\%$ до $\pm 0,7\%$ за области око оптималног режима рада турбине, док је за мерне режиме на мањим протоцима та грешка значајније већа и креће се у границама од $\pm 2\%$ до $\pm 3,5\%$.

4. Савремени приступи у одређивању енергетских карактеристика хидроелектрана

4.1. Примена вештачких неуронских мрежа у предикцији протока

У циљу решавања инжењерских проблема у предикцији протока, савремена хидрологија у последњих неколико деценија примењује следеће концепте, приступе и методологије [3]: метода оперативног истраживања (линеарног и динамичког програмирања), фази метода, метода неуронских мрежа, планирање експеримента, Walvet анализе, концепт детерминистичког хаоса, везе са еколошким процесима, статистичке, геостатистичке и нумеричке методологије, GIS технологије, теорије система, теорије ризика итд. У том смислу, као што је претходно наведено, истраживачки тимови широм света развијају моћне софтверске алате не само за прогнозу протока већ и за интегрално управљање водопривредним системима. Међу бројним симулационим моделима, програмским кодовима и софтверским пакетима могуће је издвојити најчешће примењиване: FEQ (Full EQuations) [13], RIBASIM (River Basin Si-mulation Model) [14], AQUATOOL [15], MIKE HYDRO Basin [16], WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) [17], WEAP (Water Planning and Evaluation System) [18] и други.

Последњих година методе вештачких неуронских мрежа су доживеле експанзију и пронашле своју практичну примену у многим инжењерским областима. Користе се као поуздана алтернатива класичним математичким моделима у решавању комплексних проблема, а главне предности су им способност самоучења и могућност да апроксимирају нелинеарну зависност између улазних и излазних величина сложених система.



Слика С.4.1 Упоредан приказ предвиђених и измерених протока на реци Дунаву

На примеру измерених хидролошких услова реке Дунава (слика С.3.1) примењена је једна од метода неуронских мрежа [19]. Методом је извршена предикција протока за две године за које су, у тренутку обучавања мреже, мерени подаци били „непознати“ (нису узети у разматрање иако постоје). Прогнозиране вредности протока су затим упоређене са стварно измереним чиме је показана поузданост примењене методе. У условима природних и делимично регулисаних (постојање проточних хидроелектрана ХЕ Ђердап 1 и СНЕ Portile de Fier 1) протока реке Дунава, резултати приказани на слици С.4.1 показују да се релативно одступање δ_Q предвиђених у односу на измерене протоке налази у опсегу $\pm 20\%$.

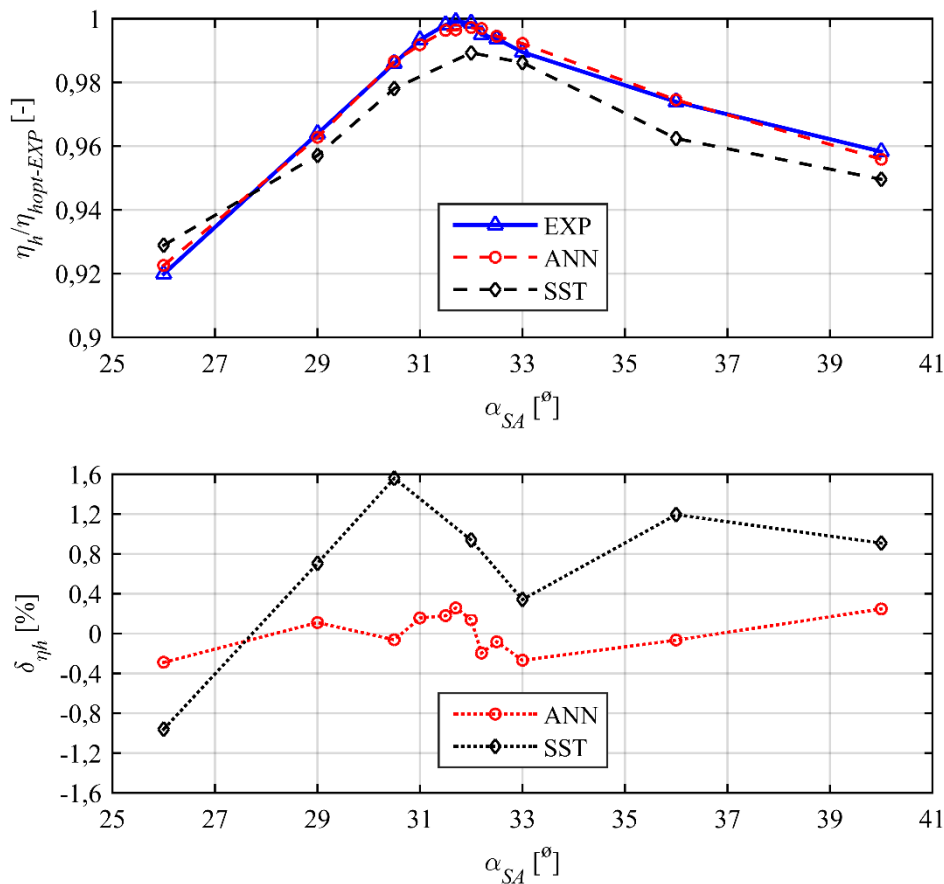
Стална унапређивања модела за предикцију протока теже свеобухватнијем приступу како када је у питању бројност улазних утицајних фактора и тако и када је у питању када географски посматрана површина водослива. Тако су у раду [20] примењени бројни мултирегресиони модели у циљу предвиђања дотока и одређивања криве трајања протока у целокупном дунавском региону.

4.2. Енергетске карактеристике хидрауличних турбина

Стандардима су предвиђена лабораторијска испитивања на моделу и теренска испитивања на прототипу за одређивање и проверу енергетских карактеристика хидрауличних турбина. Резултати испитивања су драгоцени, али су сама испитивања захтевна, изузетно скупа и у појединим случајевима врло компликована. Вишедеценијски развој нумеричких прорачуна турбулентних струјања у хидрауличним турбинама уз унапређење рачунарских капацитета је довео до нумеричких експеримената којима се омогућује већи број радних режима који се могу истраживати него што би их било могуће мерити у теренским условима испитивања. Управо савремена нумеричка механика флуида (CFD-Computational Fluid Dynamic) покушава да рационализује приступ за одређивање карактеристика турбина. Након моделирања струјног простора у неком од CAD софтверских пакета врши се дискретизација, подела струјног простора на коначан број контролних запремина. Затим се дефинишу границе флуидног домена које представљају места контакта флуида са непокретним и покретним површима у струјном простору, као и улазни и излазни гранични услови који одговарају истраживаним експлоатационим режимима. Прорачун турбулентних струјања у турбинама се заснива на решавању система дискретизованих диференцијалних једначина одржања у претходно дискретизованом струјном простору.

Све већа доступност наменских моћних софтверских алата потврђује општи тренд спровођења нумеричких експеримената у одређивању карактеристика модела и прототипова турбина које се уграђују у велике ХЕ. Посебно је уочљив овакав тренд у одређивању карактеристика малих ХЕ. Неопходно је истаћи да се савремени нумерички експерименти заснивају на несавршеним нумеричким

симулацијама струјања, па су присутна значајна одступања при међусобном упоређивању нумеричких и експерименталних резултата поготово у ваноптималним областима рада турбина [21,22]. Управо је, на основу претходно наведеног, сврсиходност и поузданост добијених нумеричких резултата значајна само ако су резултати верификовани стандардним испитивањима.



Слика 4.2 Упоредни приказ резултата добијених мерењима, предикцијом помоћу вештачке неуронске мреже и CFD анализа и релативна одступања

Иако примена неуронских мрежа у хидрологији, где су величине са изразито стохастичким карактером, није допринела квалитетнијој предикцији протока, њихова примена се у последњим годинама показала као сврсиходна у одређивању енергетских карактеристика хидрауличних турбина. Једна од првих примена ових метода за одређивање експлоатационих карактеристика је дата у раду [23], где су комбиноване методе CFD прорачуна и неуронских мрежа. У радовима [24,25,26] су приказане и примењене методе неуронских мрежа и фази метода за предикцију и одређивање пропелерних и комбинаторских карактеристика Каплан турбине у немереним (непознатим) радним режимима, док су упоредним анализама са експерименталним резултатима извршене валидације и верификације примењених метода.

На слици С.4.2 су приказана релативна одступања између прогнозираних (предвиђених), CFD резултата и експерименталних степена корисности за линијску карактеристику пропелерне турбине при $H^*=0,98$ m (са слике С.3.3). Сви степени корисности који су добијени мерењима у високософистицираној лабораторији за моделска испитивања (EXP), предикцијом помоћу вештачке неуронске мреже (ANN – *artificial neural network*) [24] и нумеричким симулацијама (*shear stress turbulent* (SST) двоједначински турбулентни модел) [27] су сведени на максимални степен корисности истраживане турбине који је добијен мерењима. Релативном грешком $\delta_{\eta H}$ су представљена одступања прогнозираних ANN резултата и нумеричких SST резултата од стварно добијених експерименталних вредности.

4.3. Предикција производње у малим и великим хидроелектранама

Менаџменту и власницима великих и малих ХЕ, као и онима који планирају производњу и управљају електроенергетским и водопривредним системима, од великог је значаја постојање могућности предикције производње електричне енергије у њиховим постројењима. У динамички тржишном оријентисаном окружењу уз постојање брзе електричне енергије, предикција производње им је од

приоритетног значаја. Управо савремене методе засноване на вештачким неуронским мрежама нуде могућност квалитетне и поуздане предикције производње уз познавање енергетских карактеристика агрегата, континуално ажурирање података о протоцима и другим битним параметрима ХЕ. У раду [28] приказана је примена ових метода за предикцију производње у једној малој ХЕ у коју је уграђена Каплан турбина. Регресиона анализа уз детаљно моделирање сваке ХЕ је примењена у [29] за много захтевније предвиђање истовремене производње енергије у преко хиљаду малих хидроелектрана које припадају једном региону.

5. Закључна разматрања

Одређивање поузданих енергетских карактеристика малих и великих хидроелектрана у широкој радној области се заснива на опсежним и детаљним експерименталним лабораторијским испитивањима на моделу и испитивањима на терену. Постојећи стандарди дефинишу услове, процедуре и поступке мерења, мерну опрему, обраду и анализу резултата мерења у зависности од врсте захтеваних испитивања. Комплексност скупих испитивања намеће сталну потребу за рационализацијом услова при којима ће се испитивања обавити, а да се при томе не угрози поузданост добијених карактеристика. С друге стране, у циљу бржих доношења одлука, утврђивања трендова промена појединих параметара и смањивања директних и индиректних трошкова испитивања хидроелектрана све више се примењују савремени нумерички CFD експерименти и методе вештачких неуронских мрежа. Примене постојећих математичких модела и спровођење нумеричких експеримената за одређивање појединих енергетских показатеља показују своје несавршености у добијеним резултатима чија се поузданост мора верификовати експерименталним подацима, али и предности у доношењу квалитативних оцена. Методе вештачке интелигенције имају способност самоучења на основу постојећих експерименталних података између којих не мора да постоји јасна математичка веза, те своју доминантну примену потврђују у предикцијама карактеристика агрегата у немереним радним режимима, као и у предвиђању будућих енергетских догађаја попут производње електричне енергије у ХЕ. Претходно наведено уз досадашња искуства указује да је преимућство у истраживању енергетских карактеристика и даље на страни експерименталних испитивања, али да савремени приступи итекако могу да послуже смањивању обима испитивања. Рационализација има позитивне ефекте на економичност и брзину одређивања енергетских карактеристика, док квалитет, свеобухватност и употребљивост добијених резултата воде ка оптимизацији експлоатације како самог агрегата тако и целог хидропостројења.

6. Захвалност

Аутори се захваљују Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије и Јавном предузећу „Електропривреда Србије“ – огранку „Хидроелектране Ђердап“.

7. Референце

- [1] **Đorđević, B. V.** *Hydroenergetsko korišćenje voda*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija, 2001.
- [2] **Đivac, D., D. Prodanović, N. Milivojević,** *Hidroinformacioni sistemi za upravljanje hidroenergetskim resursima u Srbiji*, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Beograd, Srbija, 2009.
- [3] **Vonacci, O.** Quo vadis hydrologia? – Kuda ideš hidrologijo?, *Vodoprivreda*, 47 (2015), 273-275, pp. 15–28.
- [4] **Božić, I. O.** *Хидрауличне турбине – Практични примери са изводима из теорије*, Универзитете у Београду Машински факултет, Београд, Србија, 2017.
- [5] **Đorđević, B., T. Dašić,** *Одређивање потребних протока низводно од брана и реčnih vodozahvata*, *Vodoprivreda*, 43 (2011), 252-254, pp. 151–164.
- [6] *Хидролошки годишњаци – површинске воде од 2005. до 2014.*, Републички хидрометеоролошки завод Републике Србије, 2005-2014, http://www.hidmet.gov.rs/ciril/hidrologija/povrsinske_godisnjaci.php
- [7] IEC 60193:1999(E), *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests*, International Electrotechnical Commission, 1999
- [8] **Benišek, M., I. Božić,** *Preračunavanje ukupnih bezdimenzijskih energetskih gubitaka modela u cilju dobijanja stepena korisnosti glavnog izvođenja hidraуличnih turbina* *International conference Power Plants 2012*, Society of Thermal Engineers of Serbia, Zlatibor, Serbia, 2012.
- [9] IEC 62097:2009-02, *Hydraulic machines, radial and axial – Performance conversion method from model to prototype*, International Electrotechnical Commission, 2009
- [10] IEC 60041:1991-11, *Field acceptance tests to determine hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*, International Electrotechnical Commission, 1991

- [11] IEC 62006:2010-10, *Hydraulic machines – Acceptance tests of small hydroelectric installations*, International Electrotechnical Commission, 2010
- [12] **Бенишек, М., Д. Петровић, И. Божић, З. Тирић, С. Дамјановић, М. Зељић**, Одређивање пропелерних и комбинаторских карактеристика Капланове турбине агрегата у ХЕ „Зворник“ у циљу повећања његове ефикасности, *Термотехника*, XXXV (2009), 3-4, pp. 193–204.
- [13] **Franz, D.D., C.S. Melching**, Full Equations (FEQ) Model for the Solution of the Full, Dynamic Equations of Motion for One-Dimensional Unsteady Flow in Open Channels and through Control Structures, *Water-Resources Investigations Report 96-4240*, U.S. Geological Survey, 1997.
- [14] RIBASIM (River Basin Simulation Model), Deltares, www.deltares.nl/en/software/ribasim/
- [15] AQUATOOL, Instituto de Ingenieria del Agua y Medio Ambiente, Univerisitat Politecnica de Valencia, http://www.upv.es/aquatool/en/software_en.html
- [16] MIKE HYDRO Basin, Danish Hydraulic Institute (DHI), www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-hydro-basin
- [17] WASP (Water Quality Analysis Simulation Program), United States Environmental Protection Agency, www.epa.gov/exposure-assessment-models/water-quality-analysis-simulation-program-wasp
- [18] WEAP (Water Planning and Evaluation System), Stockholm Environment Institute (SEI), <http://www.weap21.org/>
- [19] **Јовановић, Р., И. Божић**, Примена метода вештачке интелигенције у обновљивим изворима енергије и енергетској ефикасности, *31. Међународни конгрес о процесној индустрији PROCESING '18*, Савез машинских и електротехничких инжењера и техничара Србије (СМЕИТС), Бајина Башта, Србија, 2018
- [20] **Castellarin, A., S. Persiano, A. Pugliese, A. Aloe, J. O. Skøien, A. Pistocchi**, Prediction of streamflow regimes over large geographical areas:interpolated flow–duration curves for the Danube region, *Hydrological Sciences Journal*, (2018), pp. 1–17, <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1445855>
- [21] **Вожић, И., М. Бенишек**, Нумеричка симулација струјања у моделу Каплан турбине, *Vodoprivreda*, 45 (2013), 264–266, str. 173-180
- [22] **Вожић, И., М. Бенишек**, Експериментална и нумеричка анализа карактеристика Капланове турбине, *International conference Power Plants 2014*, Society of Thermal Engineers of Serbia, Zlatibor, Serbia, 2014.
- [23] **Arnone, A., M. Marconcini, F. Rubecchini, A. Schneider, G. Alba**, A Kaplan turbine performance prediction using CFD: an artificial neural network approach, *HYDRO 2009*, Lyon, France, 2009
- [24] **Јовановић, Р., И. Божић**, Примена вештачких неуронских мрежа у одређивању енергетских карактеристика пропелерних хидрауличних турбина, *XXXI Међународно саветовање ЕНЕРГЕТИКА 2015*, Златибор, Србија, 2015
- [25] **Вожић, И., Р. Јовановић**, Prediction of Double-Regulated Hydraulic Turbine On-Cam Energy Characteristics by Artificial Neural Networks Approach, *FME Transactions*, 44 (2016), 2, pp. 125-132
- [26] **Јовановић, Р., И. Вожић**, Feedforward Neural Network and ANFIS Based Approaches to Forecasting the Off-Cam Energy Characteristics of Kaplan Turbine, *Neural Computing and Applications*, (2017), pp. 1-11, <https://doi.org/10.1007/s00521-017-2843-9>
- [27] **Божић, И.**, *Теоријско и експериментално истраживање расподеле губитака енергије у аксијалним хидрауличним турбинама*, докторска дисертација, Универзитет у Београду Машински факултет, Београд, Србија, 2012.
- [28] **Hammid, A.T., M. H. B. Sulaiman, A. N. Abdalla**, Prediction of small hydropower plant power production in Himreen Lake dam (HLD) using artificial neural network, *Alexandria Engineering Journal*, 57 (2018), 1, pp. 211-221
- [29] **Killingtveit, Å.** Regional forecasting of generation from small hydropower plants, *Workshop on Hydro Scheduling in Competitive Electricity Markets*, Trondheim, Norway, 2015