

# Hidroenergetikos darnios plėtros galimybės

## Povilas Balčiūnas

*Kauno technologijos universitetas,  
Atsinaujinančių energijos šaltinių centras,  
Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas*

## Narimantas Ždankus

*Kauno technologijos universitetas,  
Geoinžinerijos katedra,  
Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas*

Išnagrinėtas hidroelektrinės poveikis upei ir jos aplinkai. Pripažinta, kad hidroelektrinės turbinų dažnas įjungimas ir išjungimas yra žalingas aplinkai, nes skatina upės vagos plovimą, kenkia upės augmenijai ir gyvūnijai. Teigiama, kad žalą galima sumažinti nekeičiant upės nuotėkio – pro hidroelektrinės turbinas praleidžiant jį visą ir nekaupiant vandens tvenkinyje. Parodyta, kad tradicinėmis priemonėmis to padaryti negalima, nes Lietuvos upių nuotėkis kinta kur kas labiau, negu tas, kurį gali praleisti viena arba kelios vienodos turbinos.

Išnagrinėjus kelių tipų turbinų charakteristikas nustatyta, kad skersasrautės turbinos aplinkosauginiu požiūriu yra tinkamiausios, nes jų pralaidumas kinta itin plačiose ribose. Išnagrinėta galimybė išplėsti bet kurio tipo turbinų pralaidumo ribas eksploatuojant jas kintamų sukimosi dažnių režimu, kuris dėl fiksuoto kintamos srovės dažnio neįmanomas paprastuose hidroagregatuose.

Pateiktos hidroelektrinės valdymo mechatroninių sistemų, reikalingų turbinoms dirbti kintamų sukimosi dažnių režimu, schemas, matematinis ir imitacinis modeliai. Juos ištyrus autonominio ir sisteminio režimo atvejais nustatyta pakankamai gera elektros energijos kokybė.

**Raktažodžiai:** upė, nuotėkis, turbina, pralaidumas, veiksmingumas, mechatroninė sistema

## 1. ĮVADAS

Griežtėjant reikalavimams mažinti energijos gamybos poveikį aplinkai vis daugiau dėmesio skiriama atsinaujinantiems energijos šaltiniams, iš kurių patraukliausia yra upių tėkmės energija. Per tūkstantmečius sukaupta didelė jos naudojimo patirtis. Šią energiją lengva sutelkti statant užtvankas, tačiau apsemiami dideli žemės plotai, pakeičiamas kraštovaizdis, pertveriami žuvų migracijos keliai, pakeičiamas upės nuotėkio pasiskirstymas laike. Tvenkinys dažnai pagerina kraštovaizdį, rekreacijos sąlygas, mikroklimatą aplinkui tvenkinį, tačiau kitos tvenkinio poveikio aplinkai formos dažniausiai būna žalingos. Norint žalą sumažinti, būtina slopinti hidroelektrinės (HE) poveikį aplinkai, pirmiausia upės nuotėkio pasiskirstymui laike.

Pastačius užtvanką ant upės jos tėkmės parametrai ir nuotėkio kaitos laike pobūdis labai ryškiai pasikeičia ilgame jos ruože. Tėkmės gylis tvenkinyje padidėja, o greitis sumažėja. Dėl to čia pasikeičia flora ir fauna [1, 2], gruntinio vandens režimas, augmenija ir mikroklimatas aplinkui tvenkinį [3]. Žemutiniame bjefe upės debitas tampa priklausomas nuo hidroelektrinės darbo režimo. Kiekvieną dieną paleidžiant turbinas upės tėkmės debitas, greitis ir gylis staiga padidėja, o išjungus – sumažėja. Dėl to upės vaga HE žemutiniame bjefe yra intensyviai plaunama, jos dugnas praranda pastovumą

[4]. Tokios sąlygos yra nepakenčiamos žuvisms. Ilgame upės ruože jų smarkiai sumažėja arba jos išnyksta [5].

Hidroelektrinės poveikio upei HE žemutiniame bjefe įvertinimas ir priemonių šio poveikio žalai sumažinti paruošimas yra mūsų tyrimų tikslas.

## 2. LIETUVOS UPIŲ REŽIMO YPATUMAI

Upės režimu čia vadinama upių nuotėkio charakteristikų (tėkmės debito, greičio ir skerspjūvio matmenų) visuma, jų kaitos laike ypatumai. Pagal išvardytų parametrų tipą nagrinėjamus upių režimus mes linę vadinti hidrologiniais-hidrauliniais. Hidroelektrinės poveikį upei ir jos aplinkai bandome vertinti pagal upės režimo pokyčius, kuriems nustatyti pirmiausia nagrinėjame režimą natūraliose upėse arba jų ruožuose, kur nėra tvenkinių ir hidroelektrinių poveikio.

Lietuvos upių nuotėkis plačiai kinta laike. Žinoma, kad vasaros sausros arba žiemos išalo metu debitas upėse būna mažiausias, o pavasario potvynių ar vasaros liūčių metu – didžiausias (1 pav.). Debitas šiose ribose kinta įvairia sparta, nuo kurios priklauso upės dugno plovimo ir vagos persitvarkymo reiškiniai. Ilgalais mažo intensyvumo lietus sukelia sklandų ir lėtą vandens lygio kilimą upėje bei lėtą žemėjimą lietuvi užsibaigus. Dėl trumpalaikės intensyvios liūtės lygis pakinta daug staigiau.

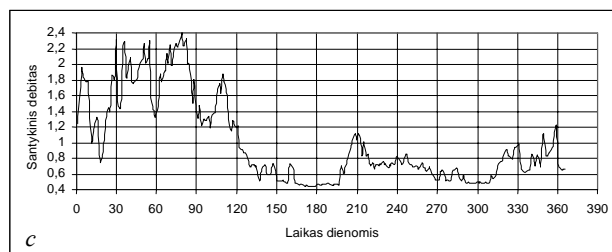
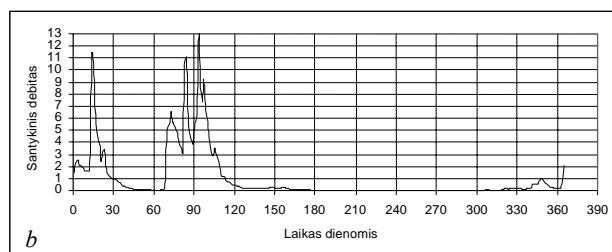
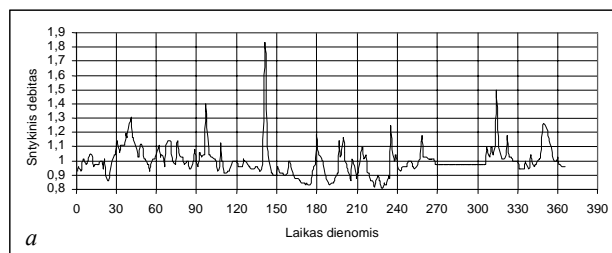
Upės vandens lygis nuolatos kinta. Ilgesnį laiką lygis kinta taip lėtai ir sklandžiai, kad jį sunku pastebėti. Ryškių lygio kitimo bangų upės metinėje hidrogramoje susidaro nuo 10 iki 20 (1 ir 2 pav.). Ištyrę Smalininkų posto prie Nemuno vandens lygio stebėjimo birželį–spalį duomenis [6], nustatėme šitokius didžiausius lygio kitimo greičius: kilimo – 151 cm/parą (1925 08 5–6), kritimo – 49 cm/parą (1881 07 29–30). Smulkesnių lygio kitimo bangų kiekvienais metais susidaro gana daug. Upės faunos ir floros bioritmas yra prisiderinęs prie tokios vandens lygių kaitos, jis upei ir jos aplinkai ne tik nepalmingas, bet ir naudingas.

Ledo reiškiniai taip pat keičia vandens lygį upėje. Ledo dangos formavimosi ir irimo metu vandens lygis paprastai kinta 15–30 cm/parą greičiu. Štai 1849 12 23–24 susiformavus ledo dangai lygis pakito 97 cm/parą. Dėl ledo sangrūdų vandens lygis kinta dar staigiau. Štai 1827 m. kovo 12–13 d. ledonešio metu vandens lygis Nemune ties Smalininkais pakilo 252 cm, o kitą parą, kovo 13–14 d., krito 272 cm [6].

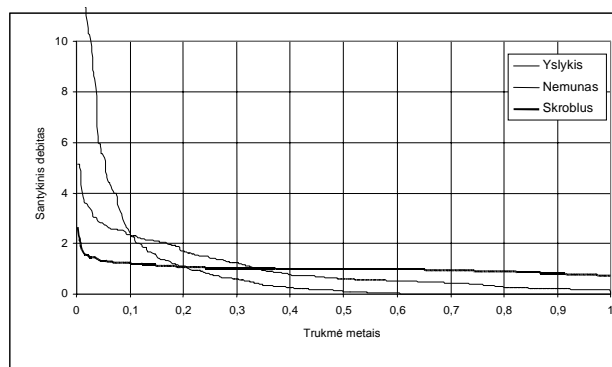
Susiformavus ledų sangrūdai prieš ją vandens lygis greitai kyla, o už jos – krinta. Sangrūdai suirus prieš ją vandens lygis smunka, o už jos kyla. Susikaupęs ir prasiveržęs vanduo teka kur kas didesniu debitu ir greičiu, nei hidrologinio potvynio metu.

Ledo reiškiniai, ypač ledo sangrūdų susidarymas ir suirimas, vyksta gana sparčiai. Hidrometeorologijos tarnybos duomenų bazėje vyrauja atliktų paros, dažniausiai 6 valandų intervalu, matavimų rezultatai. Pagal tokių matavimų rezultatus galima apskaičiuoti tik paros vandens lygio kitimą. Didžiausiu greičiu vandens lygis upėje kinta tik susiformavus ledo sangrūdai ir tik jai suirus. Ledo sangrūdai yrant per kelias minutes vykstantys reiškiniai upės dugno pastovumui yra pavojingiausi, nes pro sangrūdą prasiveržęs vanduo teka gerokai didesniu debitu ir greičiu, nei didžiausio hidrologinio potvynio metu. Suirus sangrūdai suardomas ir upės dugną nuo išplovimo saugantis savigrindos sluoksnis, dėl kurio prasideda ilgalaikis upės dugno plovimas. Mat naujas iš stambių žvyro dalelių susidedantis apsauginis sluoksnis [1] susiformuoja tik per keletą metų.

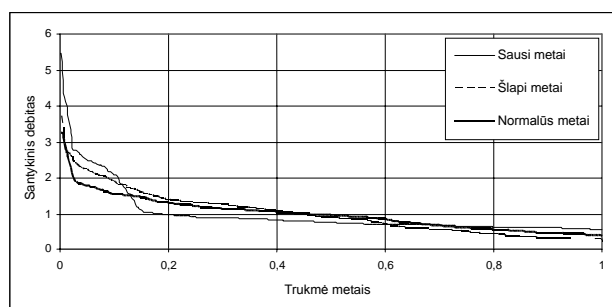
Lėti vandens lygio ir upės debito pokyčiai laike geriausiai matyti hidrogramoje (1 pav.). Vagos plovimą skatinantys staigūs lygio pokyčiai natūralioje upėje susidaro retai – kartą kas 5–10 metų. Šie gana reti tėkmės plaunančio pajėgumo padidėjimo impulsai upės dugno pastovumui daro mažesnę poveikį negu gerokai dažnesni žmogaus veiklos sukelti impulsai, kurie aptarti kituose mūsų darbuose [7]. Čia daugiausia dėmesio skiriame upės debito kitimui ryšium su racionalių ir darnių tėkmės hidroenergetinių išteklių panaudojimu. Racionalus panaudojimas – kai pasitelkus upės tėkmės energiją praleidžiama kuo daugiau nuotėkio pro hidroelektrinės turbinas, esant didžiausiai patvankai, darnus panaudojimas – mažiausiai keičiant upės nuotėkį, nekaupiant jo tvenkinyje. Taigi upės nuotėkio pasiskirstymas laike čia laikomas svarbiu ne tik vagos procesams, bet ir upės tėkmės energetiniams ištekliams.



1 pav. Skroblaus (a), Yslykio (b) ir Nemuno (c) 2000 m. hidrogramos



2 pav. Yslykio, Nemuno (Smalininkai) ir Skroblaus 2000 m. statistinės hidrogramos



3 pav. Nemuno (Smalininkai) sausų (1812), šlapių (1928) ir normalių (1885) metų statistinės hidrogramos

Upės debitas per metus kinta apibrėžtose ribose, kurias patogiu apibūdinti tam tikros tikimybės didžiausio ir mažiausio debitų santykiu. Jį lengva nustatyti naudojant įprastines hidrogramas (1 pav.). Debito kitimo ribas apskaičiuoti, taip pat nuotėkio pasiskirstymui per metus apibūdinti tinka santykinio debito  $Q/Q_0$  trukmės  $t$  priklausomybė (2 pav.), kurioje vidutinių metų debitų  $Q$  ir vidutinio metų debito  $Q_0$  santykių  $Q/Q_0$  eilė rikiuojama mažėjimo tvarka, o laikas  $t$ , kai debitas  $Q$  yra didesnis už nagrinėjamą jo dydį, išreikštas metais. Šios priklausomybės grafiką mes pavadiname statistine hidrograma.

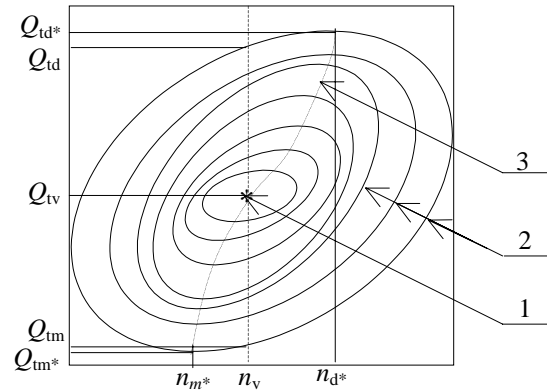
Lyginami skirtingų upių tų pačių metų statistines hidrogramas pastebėjome didelį skirtumą (2 pav.), o tos pačios upės (Nemuno) skirtingų metų – aiškų panašumą (3 pav.), nepaisant to, kad sąmoningai buvo parinkti skirtingo vandeniningumo metai. Taigi statistinė hidrograma yra upės, o ne metų vandeniningumo rodiklis, stabili bei mažai nuo kritulių kiekio ir pasiskirstymo per metus priklausanti charakteristika, kurioje ypač gerai matyti upės debito kitimo ribos.

Pagal statistinėje hidrogramoje atskaitytus didžiausią ir mažiausią santykinį debitą  $(Q/Q_0)_{\max}$  ir  $(Q/Q_0)_{\min}$  galima apskaičiuoti upės didžiausio ir mažiausio debitų santykį  $(Q/Q_0)_{\max} / (Q/Q_0)_{\min} = Q_{\max}/Q_{\min}$ , mūsų žymimą  $k_u$  ir vadinamą upės nuotėkio tolygumo koeficientu. Dar tiksliau didžiausius ir mažiausius upės debitus galima apskaičiuoti pagal santykinų debitų statistinę eilę. Skroblaus upės 2000 m. santykinų debitų statistinės eilės pirmasis ir paskutinis nariai yra 2,683 ir 0,708. Jų santykis atitinka debito tolygumo koeficientą  $k_u = 3,79$ . Yslykio upė 2000 m. 100 dienų buvo išdžiūvusi, todėl šiai upei  $k_u = \infty$ . Nemuno debito tolygumo koeficientas, Nemajūnų posto 2000 m. duomenimis,  $k_u = 32,12$ . Nemuno debito tolygumo koeficientai, apskaičiuoti pagal Smalininkų posto 1812 m., 1885 m. ir 1928 m. duomenis, yra 9,54; 8,09 ir 17,53.

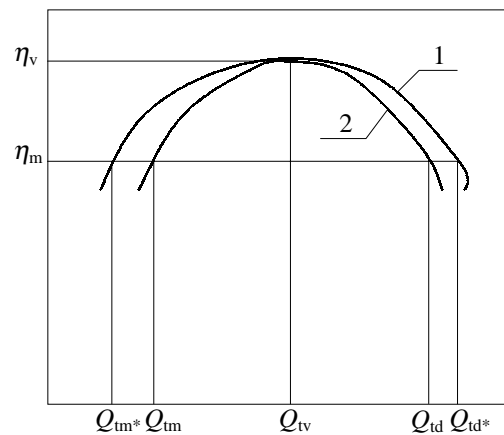
### 3. VANDENS TURBINŲ YPATUMAI

Hidroelektrinės turbinos parenkamos pagal vidutinį daugiametį upės debitą, atsižvelgiant į debito kitimo ribas. Paprastai parenkama keletas vienodos galios turbinų. Tada pro jas neįmanoma praleisti mažiausio, dažniausiai ir didžiausio debitų. Vandenį tenka kaupti tvenkinyje, dažnai manevruoti turbinomis, didžiausius debitus leisti pro pralaidas.

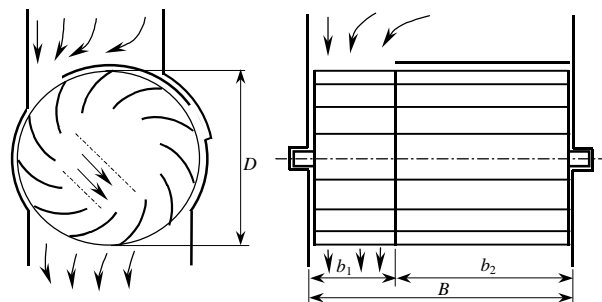
Turbinų pralaidumas kinta kur kas mažiau negu upių nuotėkis. Jį riboja naudingumo koeficientas, kuriam neleidžiama sumažėti žemiau tam tikros ribos. Hidraulinėms mašinoms ši riba dažnai apibrėžiama mažiausiu leistinu veiksmingumo koeficientu  $\eta_m = k_r \eta_v$ ; čia  $k_r$  – reþimo koeficientas ir  $\eta_v$  – vardinis veiksmingumo koeficientas, sutampantis su didþiausiu maðinos naudingumo koeficientu  $\eta_r$ . Reþimo koeficientas, apibûdinantis leistiną nukrypimą nuo vardinio reþimo, siurbliams ir tûriniams hidrauliniams motorams prilyginamas 0,85 [8], o tai atitinka 15% nukrypimą (5 pav.).



4 pav. Turbinos universaliosios charakteristikos pavyzdys: 1 – vardinio reþimo taðkas; 2 – naudingumo izolinijos; 3 – naudingiausio reþimo linija



5 pav.  $\eta - Q$  priklausomybės kreivės esant  $n = n_v = \text{const}$  (1) ir  $n = n_o = \text{var}$  (2)



6 pav. Skersasrautės turbinos schema, matmenys ir vandens srauto judėjimo kryptys

Reþimo koeficientas turbinoms kinta nuo 0,85 iki 0,95 [9] ir priklauso nuo turbinos galios ir tipo. Maþos galios Kaplano ir skersasraučių (seniau vadintų Banki-Mičeli) turbinų  $k_r$  gali būti prilygintas 0,85 [10]. Išnagrinėję vienuoliką PL tipo (OSt 108.023.15–82) vidutinės ir maþos galios Kaplano turbinų universaliojų charakteristikų (4 pav.) nustatėme, kad jos sudarytos darbo zonoms, atitinkančioms  $k_r \geq 0,94$ . Nepaisant gana maþo (6%) leistino nukrypimo nuo vardinio reþimo, didþiausio ir mažiausio debitų  $Q_{td}$  ir  $Q_{tm}$  santykis, pavadintas mūsų turbinos debito tolygumo koeficientu,  $k_t = Q_{td}/Q_{tm}$ ,

kito gana plačiai (2,67–4,25), o tai rodo aukštą turbinų kokybę ir tinkamumą mūsų nagrinėjamam upių energijos panaudojimui tausojančiu režimu.

Iš pateiktos informacijos matyti, kad turbinos pralaidumas kinta kur kas mažiau negu upės debitas. Net plačiausių debito ribų turbinos tolygumo koeficientas retai būna didesnis kaip 4,0 ir retai apima net ir tolygaus nuotėkio upės debitus, t. y.  $k_t < k_u$ . Tik keletu per ežerus tekančių Vakarų ir Pietryčių Lietuvos upių nuotėkį galima praleisti visą, be nuostolių, per vieną gerai parinktą turbiną. Dažniausiai, jeigu hidroelektrinėje yra tik viena turbiną, nuotėkio ir energijos nuostolių išvengti nepavyksta, turbiną tenka dažnai junginėti, o vandenį kaupti tvenkinyje. Kartu keičiamas upės hidrologinis ir hidraulinis režimas, o tai, mūsų pripažinta, aplinkai žalinga.

**4. GALIMYBĖS IŠPLĖSTI TURBINŲ PRALAUDUMĄ**

Dviejų turbinų galimybės praleisti plačiai kintantį upės debitą yra gerokai didesnės negu vienos. Vieną iš jų pritaikius prie mažiausio upės debito ( $Q_{um} = Q_{nm}$ ), o kitą prie didžiausio pirmosios turbinos debito ( $Q_{nd} = Q_{zm}$ ) dažniausiai galėsime padengti visą upės debitų kintimo diapazoną  $Q_{um} - Q_{ud}$ . Čia  $Q_{um}$ ,  $Q_{ud}$  – upės mažiausias ir didžiausias debitai,  $Q_{nm}$ ,  $Q_{nd}$ ,  $Q_{zm}$  ir  $Q_{zd}$  – pirmosios ir antrosios turbinų mažiausi ir didžiausi debitai. Jeigu abiejų turbinų tolygumo koeficientai yra vienodi, t. y.  $k_n = k_z = k_p$ , tai abiejų didžiausias pralaidumas viršys mažiausią upės debitą ( $k_m + k_m^2$ ) kartų. Jeigu šis skaičius didesnis už upės debito tolygumo koeficientą  $k_u$ , t. y.  $(k_t + k_t^2) \geq k_u$ , tai bet kurį upės debitą bus galima praleisti pro vieną, kitą ar abi turbinas nekeičiant upės nuotėkio. Nesunku įsitikinti, kad net esant vidutiniams turbinų tolygumo koeficientui, pavyzdžiui,  $k_t = 3,5$ , dviejų turbinų didžiausio ir mažiausio debitų santykis prilygtų 15,8, o trijų – net  $(k_t + k_t^2 + k_t^3) = 46,4$  karto, o tai viršija daugumos Lietuvos upių didžiausio ir mažiausio debitų santykį. Akivaizdu, kad dviem tinkamai parinktomis skirtingos galios turbinomis galima išnaudoti daugelio upių galią su nedideliais energijos nuostoliais, o trimis turbinomis – daugumos Lietuvos upių visą energiją nekauptiant vandens tvenkinyje ir išlaikant rezervą turbinų profilaktiniam aptarnavimui bei remontui jų gedimo atveju.

Dvi turbinas gali atstoti viena skersasrautė turbiną [10] su darbo ratu, padalytu į dvi skirtingo pločio dalis (6 pav.). Mažiausias debitas leidžiamas pro siauresnę ( $b_1$  pločio) darbo rato dalį. Upės debitui padidėjus iki didžiausio šios darbo rato dalies pralaidumo vandens srautas nukreipiamas į platesnę ( $b_2$  pločio) dalį ir leidžiamas pro ją, kol pasiekama šios dalies pralaidumo riba. Dar didesnis upės debitas leidžiamas pro visą ( $B$  pločio) darbo ratą.

Dalis upės tėkmės energijos hidroelektrinėse prarandama dėl neišvengiamos upės debito kaitos ir nukrypimo nuo turbinos optimalaus (vardinio) režimo taško ( $Q_n, \eta$ ). Iš 5 pav. parodyto turbinos  $\eta - Q$  priklausomybės grafiko matyti, kad tolstant nuo šio taško turbinos veiksmingumas gana sparčiai mažėja. Turbinos

veiksmingumo mažėjimą galima slopinti eksploatuojant turbiną kintamo sukimosi dažnio režimu [11, 12].

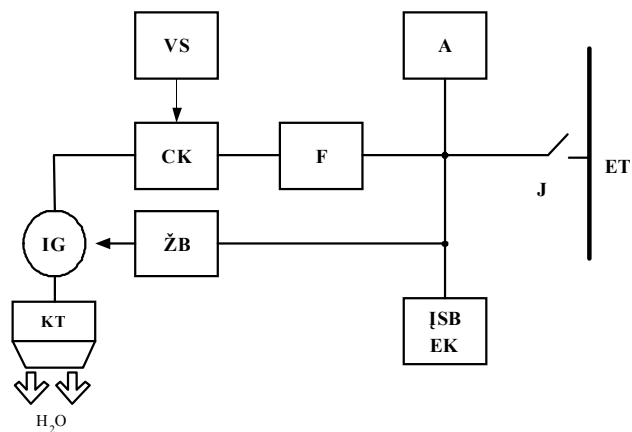
Turbinos universaliojoje charakteristikoje (4 pav.) bet kurį debitą  $Q$  atitinka vienas didžiausio veiksmingumo  $\eta$  taškas. Pagal jį atskaitytas turbinos sukimosi dažnis  $n \neq n_v$ , tik vardinio režimo taške, per kurį praeina ši linija  $n = n_v$ . Didžiausio veiksmingumo taškus jungianti linija, mūsų pavadinta naudingiausio režimo linija, apima tam tikrus sukimosi dažnių ir debitų diapazonus  $n_{m^*} - n_{d^*}$  ir  $Q_{um^*} - Q_{ud^*}$ . Pastarasis yra platesnis už ( $Q_{um} - Q_{ud}$ ), o turbinos veiksmingumo koeficientai visame debitų diapazone yra didesni, negu turbinai dirbant pastovaus sukimosi dažnio režimu (5 pav.).

Kintančių sukimosi dažnių režimas reikalauja papildomų priemonių generuojamai elektros energijai pakeisti ir kondicionuoti. Jos nuodugniai aprašytos ankstesniame P. Balčiūno darbe [12], o šiame straipsnyje pateikiamos tik principinės schemos ir trumpi komentarai.

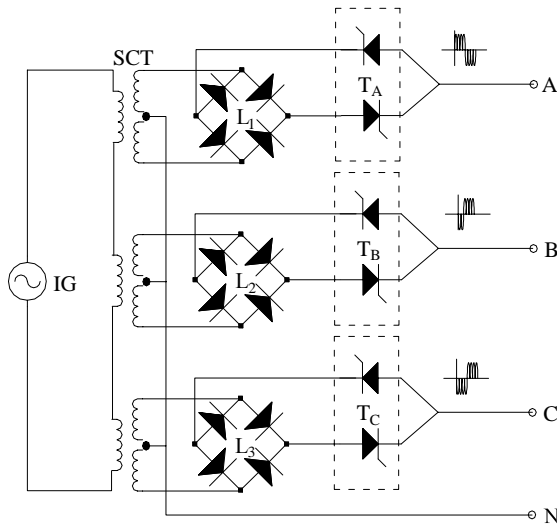
**5. HIDROELEKTRINĖS MECHATRONINĖS SISTEMOS, JŲ STRUKTŪRA IR SAVYBĖS**

Klasikinės, tradicinės hidroelektrinės turbinos sukimosi dažnis yra pastovus ( $\approx 50$  Hz), nes jis susietas su generuojamos kintamosios elektros srovės dažniu. Kintamo turbinos sukimosi dažnio režimą galima realizuoti tik mechatroninėmis hidroelektrinės mechaninės ir elektrinės įrangos valdymo sistemomis, konvertuojančiomis laisvų parametų kintamąją srovę į standartinių parametų srovę.

Principinėje hidroelektrinės mechatroninėje sistemoje (7 pav.) turbiną veikia kintamų debito  $Q = var$  ir sukimosi dažnio  $n = var$  režimu. Induktorinį generatorių (IG) suka turbiną be tarpinio reduktoriaus. Kintant turbinos sukimosi dažniui atitinkamai kinta ir kintamosios srovės dažnis. Ciklokonverteris (CK) kintamojo dažnio elektros energiją paverčia stabilaus dažnio (50 Hz) trifazę elektros energiją. Fiksuotą ir stabilų CK kintamosios srovės dažnį ir tam tikrų fazių skirtumo kampus formuoja valdymo sistema (VS). CK suformuota trifazė įtampa nėra sinusinė, todėl jos harmoninei sandarai suformuoti naudojama elektrinių filtrų sistema. Gauta standartinių parametų energija gali būti tiekiamą vartoto-



7 pav. Elektromechatroninės mikrohidroenergijos struktūrinė schema



8 pav. Induktorinio generatoriaus – ciklokonverterio principinė schema

jui, kuris čia įvardytas kaip autonominė apkrova A. Be to, elektros energija tiekama IG žadinimo blokui (ŽB) ir energijos kaupikliui – įtampos stabilizavimo blokui (ISB) su elektros kaupikliu (EK). Jo funkcijas, jei elektrinės galia maža, gali atlikti akumuliatorių baterija, jei didesnė – regeneracinis elektrocheminis generatorius, arba elektrolizės principu veikiantis vandenilio generatorius. Jeigu hidroelektrinės kaimynystėje yra energetinės sistemos elektros tinklas (ET), tai jis gali atlikti įtampos stabilizavimo ir rezervo funkcijas. Be to, pastaruoju atveju yra galimybė realizuoti pagamintą energiją ir, esant būtinybei, pasinaudoti rezervine energija iš ET. Tokia hidroelektrinė galėtų veikti tiek automatinio, tiek sisteminiu darbo režimu, ženkliai geriau panaudodama upės hidroenergijos išteklius.

Induktorinio generatoriaus – ciklokonverterio sistemos principinė schema pateikta 8 pav. Čia vienfazis IG, SCT – suderinantieji, ciklus formuojantys transformatoriai. Ciklolygintuvų  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  ir ciklotiristorių  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  moduliai iš padidėjusio dažnio vienfazės kintamosios srovės pusperiodžių formuoja fiksuoto pramoninio dažnio trifazės sistemos srovės.

Jų kitimo dėsnis paprasčiausiu atveju artimas stačiakampei laiko funkcijai, tačiau, panaudojus žinomus [13] valdymo impulsų sekos formavimo principus, yra sudaryta modifikuotos sinuso dėsnio įtampos ir srovės formos ciklokonverterio schema. Ją naudojant ženkliai supaprastėja srovės formos korekcijos filtrų schema bei pagerėja techniniai ir ekonominiai sistemos struktūros realizavimo rodikliai.

## 6. PROCESŲ MATEMATINIAI IMITACINIAI MODELIAI

Mažosios HE mechanotrinės struktūros elementams modeliuoti būtina turėti turbinos vardinį sukimosi dažnį  $n_v$ , debitą  $Q_v$ , slėgio aukštį  $H_v$ , veiksmingumą  $\eta_v$ , galią  $P_v$  bei galimus didžiausius ir mažiausius sukimosi dažnius  $n$ . Moduluojant turi būti nustatytos  $n = f(Q)$ ,

$\eta_i = f(Q)$  ir  $P_i = f(Q)$  priklausomybės. Kaip pavyzdys priimta Kaplano propelerinė hidroturbina, kurios  $n_v = 750$  aps./min,  $Q_v = 2,3$  m<sup>3</sup>/s,  $H = 5,50$  m,  $P_v = 110$  kW,  $n_d/n_v = 1,8$ . Modeliui sudaryti panaudoti išsamūs turbinos eksperimentinio tyrimo duomenys [10], atitinkantys debito kitimą  $Q = (1,63-3)$  m<sup>3</sup>/s.

Būtinis šių duomenų ribinės vertės pateiktos 1 lentelėje.

Pagal turimus eksperimentinius duomenis sudarytos būdingų parametų koreliacinės ir aproksimuojančios priklausomybės:

1 lentelė. Pagrindinės turbinos charakteristikos

Eil. Nr.	Debitas (m <sup>3</sup> /s)	Sukimosi dažnis $n$ (aps./min)	Veiksmingumo koeficientas ( $\eta_i$ )	Galia $P$ (kW)	Pastabos
1	1,63	517	0,77	67,7	Mažiausias debitas
2	2,3	729	0,87	108,0	Vardinis režimas
3	3,0	967	0,77	124,7	Didžiausias debitas

$n - Q$  koreliacinė priklausomybė

$$n = 319,9Q + 0,414, \quad (1)$$

kurios regresijos koeficientas  $r = 0,99$ ;

$\eta - n$  aproksimacijos lygtis

$$\eta_i = 0,86 \sin \left[ (1,978n + 86,1) 10^{-3} \right] \Big|_{n=500}^{n=1000}. \quad (2)$$

Naudodami kompiuterinę MULTISIM-2001 [10] programą funkciją  $\sin (1,978n + 86,1) 10^{-3}$  išskleidėme Makloreno eilute, atmesdami ketvirtą bei kitus tolimesnius narius ir, palikę tik pirmuosius tris narius, gavome tokią išraišką matematiniam modeliui sudaryti:

$$\eta_i = \left\{ (1,7n + 74,1) 10^{-3} \left[ \frac{1}{1!} \frac{1,978n + 86,1}{3!} + \frac{(1,978n + 86,1)^2}{5!} \right] \right\} \Big|_{n=500}^{n=1000}. \quad (3)$$

Įvertinę sudarytas  $n$ ,  $\eta_i$  parametų (1), (3) išraiškas ir priėmę  $H = 5,5$  m = const gauname turbinos galios  $P_i$  priklausomybės nuo debito  $Q$  ir veiksmingumo  $\eta_i$  lygtį

$$P_i = 9,81HQ\eta_i = 53,96Q\eta_i; \quad (4)$$

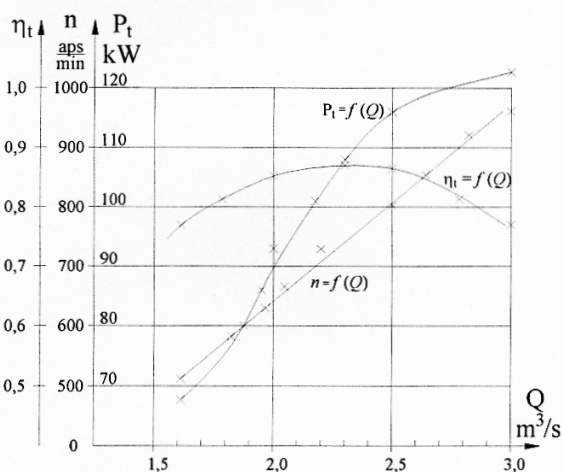
čia  $H$  išreikštas m,  $Q$  – m<sup>3</sup>/s ir  $P_i$  – kW.

Pavartojus kai kuriuos supaprastinimus pagal šias lygtis sudarytas turbinos stacionariųjų procesų struktūrinis matematinis modelis. Jame dimensiniai ir nedimensiniai dydžiai išreikšti vieningu analoginiu elektriniu dydžiu – atitinkama nuolatinės srovės įtampa. Matematinėms ope-

racijoms atlikti panaudojome minėtąją MULTISIM-2001 kompiuterinę programą.

Skaičiavimuose dalyvaujantys skaitiniai kintamieji ir pastoviųjų dydžių imitavimo operatoriai išreikšti atitinkamomis įtampomis, o parametrų indikatoriai – voltmetrais [13]. Modeliavimas atliekamas įtraukiant į matematinio modelio struktūrą nepriklausomąjį kintamąjį parametą – debitą  $Q$ . Gautus modeliavimo rezultatus – priklausomuosius kintamuosius  $n$ ,  $\eta_t$  ir  $P_t$  dydžius parodo atitinkami indikatoriai. Modeliavimo rezultatus galima panaudoti ir agregato (turbinos – generatoriaus) matematiniam modelyje. Pagal modeliavimo rezultatus sudarytų (1), (3) ir (4) priklausomybių grafikai pateikti 9 pav.

Palyginus turbinos parametrų matematinio ir eksperimentinio modeliavimo rezultatus didžiausios tapatumo santykinės paklaidos sudaro atitinkamai  $\delta = \pm 3,8\%$ ,



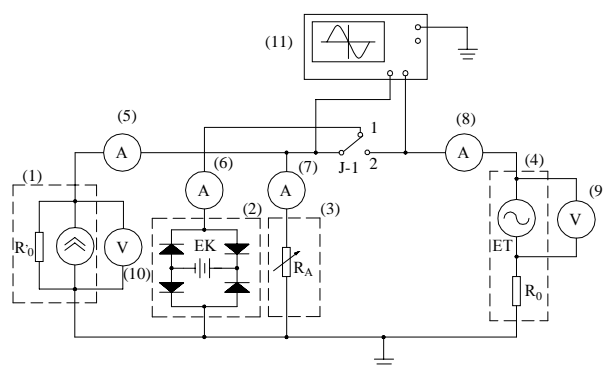
9 pav. Turbinos matematinio modeliavimo rezultatų grafines priklausomybės

$\delta_{\eta_t} = \pm 3,13\%$ ,  $\delta_{P_t} = \pm 4,0\%$ . Tai praktiniu požiūriu visiškai priimtina tapatumo kokybė.

Analogiškai, kaip turbinai, buvo sudaryti 100 kW galios, IG imitacinis ir matematinis modeliai, pateiktos rekomendacijos apie jų panaudojimo galimybes priklausomai nuo IG darbo zonos pobūdžio [12]. Paruoštas taip pat galimų CK modifikacijų imitacinis modelis [12]. Naudojant Furje analizės MULTISIM-2001 programą atlikti CK suformuotų pramoninio dažnio srovių sandaros harmoniškumo tyrimai. CK ir jo funkcinių apkrovų imitacinio modelio tyrimai įgalino nustatyti visų pagrindi-

nių darbo režimų įtaką gaminamos elektros energijos kokybę nusakantiems parametrams (įtampai ir dažniui).

CK ir jo funkcinių apkrovų idealizuotame imitaciniame modelyje (10 pav.) realusis CK pakeistas idealios sinuso formos kvazistabiliosios srovės šaltiniu. Apibendrintas energijos kaupiklis 2 modeliuojamas lygintuvu su akumuliatoriumi, autonominė apkrova 3 – rezistoriumi  $R_a$ , o energetinės sistemos elektros tinklas ET – kintamosios srovės pramoninio dažnio (50 Hz) šaltiniu. Indikatoriai 5, 6, 7, 8, 9 ir 10 skirti darbo režimų srovėms ir įtampoms matuoti, osciloskopas 11 – įtampų kitimo dėsnių lauko funkcijoms tirti. Autonominis režimas su veikiančiu energijos kaupikliu EK arba sisteminis darbo režimas be energijos kaupiklio įjungiamas jungikliu J-1.



10 pav. Ciklokonverterio ir jo funkcinių apkrovų idealizuotas modelis

Panaudojus šį imitacinį modelį atlikti būdingų darbo režimų tyrimai. Pažymėtina, kad toks svarbus elektrinės parametras, kaip dažnis, visiškai nepriklauso nei nuo turbinos sukimosi dažnio, nei nuo elektrinės apkrovos. Naudojant šį imitacinį modelį buvo ištirti autonominio ir sisteminio darbo režimai debito ir turbinos sukimosi dažnio ribose  $Q = (1,63-3,00) \text{ m}^3/\text{s}$  ir  $n = (511-967) \text{ aps./min}$ .

Tyrimų rezultatai pateikti 2 lentelėje. Jie rodo, kad elektrinei dirbant autonominiu režimu generatoriaus įtampa  $U$  kinta (218–222) V, apkrovos srovė  $I_2$  (21,8–22,2) A ir energijos kaupiklio srovė  $I_1$  (71,2–161) A. Elektrinei dirbant sisteminiu režimu generatoriaus įtampa  $U$  kinta (224–228) V, apkrovos srovė  $I_2$  (22,4–22,8) A ir energijos kaupiklio srovė  $I_1$  (68,4–158) A.

2 lentelė. Turbinos–generatoriaus–ciklokonvertoriaus charakteristikos

Debitas $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Sukimosi dažnis $n$ (aps./min)	Darbas autonominiu režimu			Darbas sisteminiu režimu		
		įtampa $U$ (V)	srovė $I_1$ (A)	srovė $I_2$ (A)	įtampa $U$ (V)	srovė $I_1$ (A)	srovė $I_2$ (A)
1,63	511	218	71,2	21,8	224	22,4	68,4
2,30	729	221	116,0	22,1	226	22,6	113,0
3,00	967	222	161,0	22,2	228	22,8	158,0

## 7. IŠVADOS

1. Vietoje vienos ar kelių vienodos galios turbinų naudojant keletą skirtingos galios tinkamai parinktų turbinų gali sumažėti hidroelektrinės neigiamas poveikis aplinkai.

2. Dėl plataus pralaidumo skersasrautės turbino yra tinkamiausias darniai mažųjų upių tėkmės energijos konversijai hidroelektrinėse.

3. Bet kurio tipo turbinų pralaidumą galima išplėsti naudojant specialias mechatronines sistemas turbinoms valdyti ir eksploatuojant jas kintamų sukimosi dažnių režimu.

4. Tinkamai suderinus elektros energijos srautus mechatroninės sistemos grandyse galima gauti kokybišką elektros energiją dirbant turbinai ne tik optimaliu, bet ir ekstensyviu, taip pat intensyviu režimu, esant kintamam sukimosi dažniui.

## PADĖKA

Autoriai dėkoja Valstybiniam mokslo ir studijų fondui už paramą atliekant tyrimus, kurių rezultatais pagrįstos straipsnyje išdėstytos mintys.

Gauta 2005 04 01

## Literatūra

- Lusk S. Influence of valley dams on the chantes in fish communities inhabiting stresams in the Dyje river drainage area // *Folia zoologica*. 1995. Vol. 44(1). P. 45–56.
- Lusk S. The status of chondrostoma nasus in waters of the Czech Republic. 1995. Vol. 44(1). P. 1–8, 45–56.
- Pašvenskas V. Vandens telkinio poveikio mikroklimatui tyrimai Kauno marių pakrantėse // *Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba*. Kaunas: Technologija, 2001. Nr. 4(18). P. 3–10.
- Ždankus N. Influence of Reservoir on River Bed Scour. Scour of Foundations // *Proceedings of International Symposium*. Melbourne, 2000. P. 380–386.
- Baras E., Lambert H., Philippart J.-C. A comprehensive assessment of the failure of Barbus spawning migrations through a fish pass in the canalized River Meuse (Belgium) // *Aquat. Living Resources*. 1994. No. 7. P. 181–189.
- Gailiūsis B. ir kt. Lietuvos upės. Hidrografija ir nuotėkis / B. Gailiūsis, J. Jablonskis, M. Kovalenkoviėnė / Kaunas: LEI, 2001. 792 p.
- Ašinių-plunžerinių hidraulinių motorų pagreintų resursinių bandymų metodikos sukūrimas ir ištyrimas / S. Žiedelis, N. Ždankus, V. Norkus, V. Staponkus / MTD pagal ŪS No P-4804 ataskaitą. Kaunas: KPI, 1988. P. 13.
- Raabe J. Hydro Power. Dusseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1985. 684 p.
- Harvey A. Micro-Hydro Design Manual. A guide to small-scale water power schemes. UK, Intermediate Technology Publications, 1993. P. 156.
- Ždankus N. Small power turbine modification possibilities. *Renewable Energy in Agriculture // Proceedings of the International Conference*. Raudondvaris: LŽŪII, 1999. P. 187–194.
- Balčiūnas P., Adomavičius V. The concept of electric energy conversion in micro-hydro electric power plant // *Mažųjų hidroelektrinių problemos. Tarptautinės mokslinės konferencijos straipsnių rinkinys*. Kaunas: LŽŪU, 2001. P. 2–31.
- Balčiūnas P., Ragaišienė J. Energijos konversijos procesų modeliavimas elektromechatroninėje mikrohidrojėgaineje // *LTMA darbai*. 2004. Nr. 1. P. 60–64
- MULTISIM. Schematic Capture. Simulation an Programmable Logic // *User Guide*. 1999. Chapter 8.7. P. 8.16–8.19.

Povilas Balčiūnas, Narimantas Ždankus

## POSSIBILITIES OF HARMONIZED DEVELOPMENT OF HYDROPOWER

### Summary

The influence of a hydropower plant on the environment is analyzed. The statement is made that a frequent switching on and off the hydropower plant turbines erodes the bottom of the river bed and is harmful for the river flora and fauna, as well as for the environment. The harm may be reduced by passing all runoff of the river through turbines without its change and accumulation in the reservoir. It is impossible to realize the idea by traditional means. The runoff changes of Lithuanian rivers are much broader than the capacity of one or several turbines of the same type.

The characteristics of turbines of some types were analyzed, and the capacity of a cross-flow turbine was recognized as having the broadest limits. Besides, the width of a turbine runner may be limited. Such a turbine is equivalent to three turbines of different capacity and may pass the flow rate of any season.

The possibilities to expand the range of turbine capacity by varying the frequency of rotation were analyzed and a conclusion has been made that it is not possible in a hydropower plant of traditional structure. Special mechatronic systems to control the mechanical and electrical equipment of a hydropower plant working at a variable rotation speed of turbines are presented. Investigations of the mathematical models of the systems in autonomous and systematic regimes show their efficiency and a sufficient quality of electric power.

**Key words:** river runoff, turbine, capacity, efficiency, mechatronic system

Повилас Балчыюнас, Наримантас Жданкус

## ВОЗМОЖНОСТИ ГАРМОНИЗИРОВАННОГО РАЗВИТИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

### Резюме

Анализируется воздействие гидроэлектростанций на окружающую среду. Отмечается, что частые включения

и выключение турбин вызывают размыв русла реки, вредят флоре и фауне реки, а также окружающей среде. Вред может быть уменьшен пропуском транзитного стока реки через турбины без аккумуляирования воды в водохранилище. Традиционными средствами этого сделать невозможно, так как сток рек Литвы колеблется в значительно более широких пределах, нежели пропускная способность одной или нескольких турбин одинаковой мощности.

Характеристики турбин нескольких типов были рассмотрены, и Банки турбина была признана имеющей наиболее широкий диапазон пропускной способности. Она может быть расширена еще больше с применением специального ограничителя рабочего колеса. Одна такая

турбина может служить вместо трех турбин разной мощности и пропускать расход реки любого сезона.

Рассмотрены возможности расширения пропускной способности турбины путем эксплуатации ее в режиме переменной скорости вращения. Представлены и описаны схемы мехатронных систем управления механическим и электрическим оборудованием гидростанции, необходимые для режима работы турбин с переменной скоростью вращения. Исследование математических моделей разработанных систем подтвердили возможности совмещения режимов работы и хорошее качество генерируемой электроэнергии.

**Ключевые слова:** сток реки, турбина, пропускная способность, эффективность, мехатронные системы