

Kauno HE tvenkinio hidrodinaminio modelio kalibravimas remiantis neapibrėžtumo analize

Brunonas Gailiūsis¹,

Jūratė Kriauciūnienė¹,

Eugenijus Ušpuras²,

Algirdas Kaliačka²,

Virginijus Vileiniškis²

¹ Lietuvos energetikos institutas,
Hidrologijos laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas,
el. paštas: hydro@mail.lei.lt

² Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių saugos laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas

Lietuvos energetikos institute neapibrėžtumų analizė taikoma jau keletą metų. Iki šiol tokia analizė buvo atliekama tik sudėtingoms techninėms sistemoms, įvertinant termohidraulinių skaičiavimo rezultatų neapibrėžtumus. Tačiau neapibrėžtumų ir jautrumo analizės metodologija gali būti taikoma analizuojant ir kitus fizikinius procesus aprašančius modelius, pvz., hidrologinius. Sudarant gamtinio objekto Kauno HE tvenkinio hidrodinaminį modelį bei modeliuojant šio tvenkinio hidrologinius procesus, plačiai naudojami tiesioginiai matavimai, skirti modelio kalibravimui. Šių matavimų duomenų paklaida gali būti iki $\pm 15\%$ ir jie yra vieni didžiausių neapibrėžtumų šaltinių. Tokie matavimo rezultatai yra išsidėstę apie vidutines reikšmes pagal tikimybinis skirstinius, dažniausiai normalųjį. Atliekama modeliavimo rezultatų neapibrėžtumo ir jautrumo analizė leidžia įvertinti visą Kauno HE hidrodinaminio modelio parametrų kitimo diapazoną, o ne atskiras šių parametrų diskrečias reikšmes.

Raktažodžiai: neapibrėžtumų analizė, hidrodinaminis modelis, modelio kalibravimas, Kauno HE tvenkinys

1. ĮVADAS

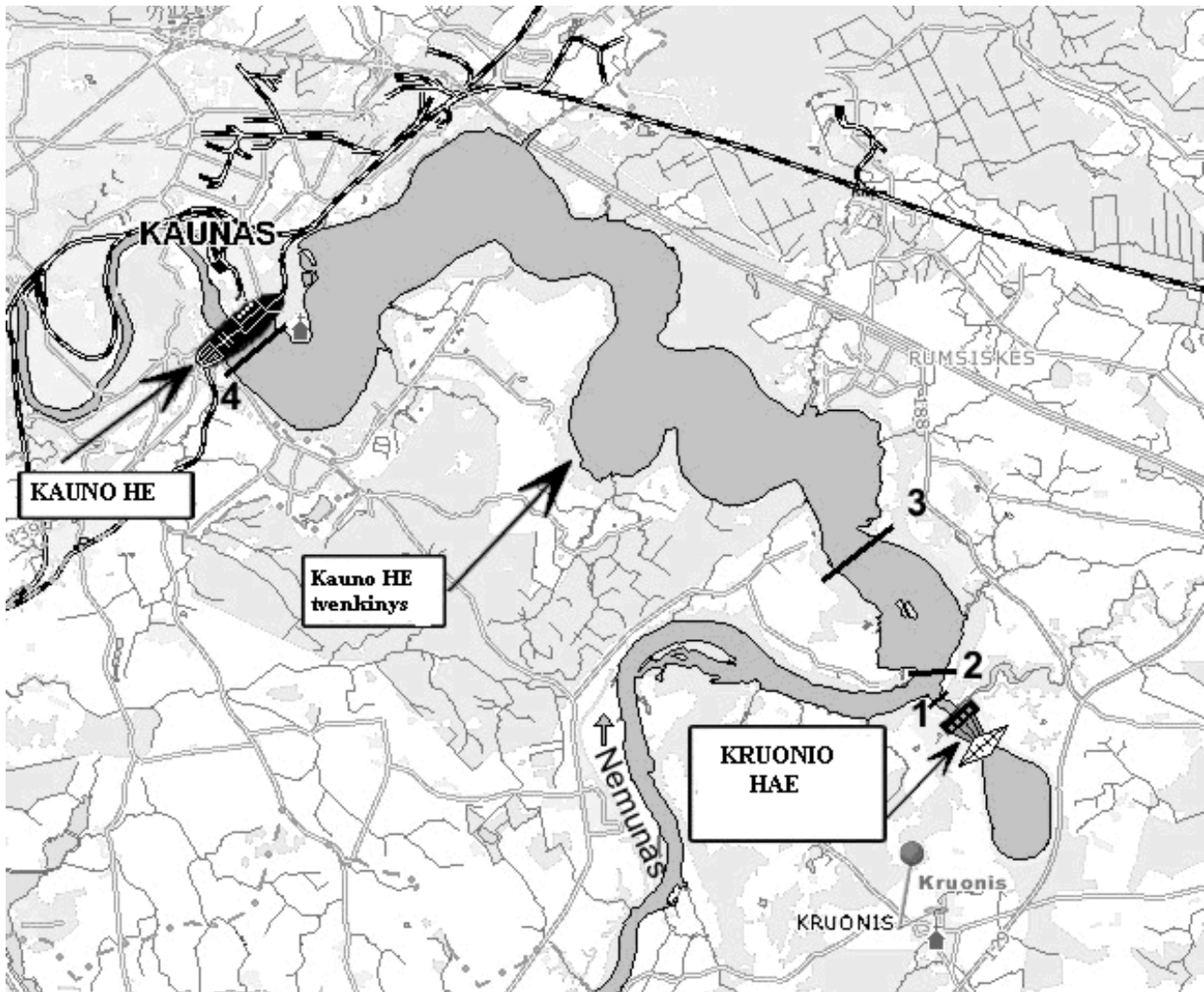
Modeliuojant gamtinius procesus svarbu parodyti, kad gauti modeliavimo rezultatai yra patikimi ir kokios galimos neapibrėžtumų ribos. Į šį klausimą galima atsakyti taikant neapibrėžtumo analizės principus. Tai duomenų neapibrėžtumų analizė, modelių neapibrėžtumų analizė ir rezultatų neapibrėžtumų analizė. Taikant įprastą hidrodinaminio modelio kalibravimo procedūrą įvertinama tik skaitmeninės programos MIKE 21 HD matematinių lygčių parametrų (šiurkštumo ir turbulentiškumo) įtaka modeliavimo rezultatams, tačiau neįvertinamas pradinių duomenų (modelio parametrų verčių) neapibrėžtumas. Modeliuojant hidrologinius ir hidrodinامينius procesus jau yra sukurtos metodikos, kaip taikyti neapibrėžtumo bei jautrumo analizę įvertinant modelio patikimumą. Tokių metodų pavyzdžiai – Danijos hidraulikos institute sukurta programinė įranga AUTOCAL [1] ir Latin Hypercube imties generavimu pagrįstas statistinis metodas, taikomas programinėje įrangoje MIKE SHE [2]. Šie neapibrėžtumo analizės metodai taikomi modeliuojant hidrologinius procesus specializuotomis programomis. Tačiau tie metodai nėra universalūs ir naudojami tik su konkrečia programine įranga.

Straipsnio tikslas – universalaus programinio paketo SUSA (System of Uncertainty and Sensitivity Analysis) taikymas gamtinių sistemų modeliavimo rezultatų neapibrėžtumo ir jautrumo analizei. Tyrimo objektas – Kauno HE tvenkinio hidrodinaminis modelis, sudarytas panaudojant programinę įrangą MIKE 21.

2. KAUNO HE TVENKINIO HIDRODINAMINIS MODELIS

1959 m. Nemuno vagoje pastacius Kauno HE susiformavo Kauno marios (Kauno HE tvenkinys). Užtvankos vieta – 223,4 km nuo Nemuno žiočių. Kauno HE tvenkinio tūris – 462 mln. m³, tvenkinio ilgis – 80 km, vidutinis gylis – 7,3 m. Vidutinis daugiametis vandens debitas Nemunu ties Kaunu yra 284 m³/s, sausų metų debitas – 213 m³/s, o vandeningų metų debitas – 348 m³/s [3, 4]. Pavasario potvynio maksimalus vidutinis daugiametis vandens debitas ties Kauno HE lygus 1045 m³/s.

Kauno HE tvenkinys yra labai svarbus šalies energetinės sistemos požiūriu. Ant šio tvenkinio pastatytos dvi didelės elektrinės: Kauno hidroelektrinė (Kauno HE) ir Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė (Kruonio HAE) (1 pav.).



1 pav. Kauno HE tvenkinys, Kauno HE ir Kruonio HAE

Kauno HE, veikianti nuo 1959 m., gamina elektros energiją ir dirba pusiau pikiniu režimu, tvenkinyje reguliuodama Nemuno paros nuotėkį. Kai į HE tvenkinį įteka mažas Nemuno vandens debitas, Kauno HE didesnę paros dalį (15–20 val.) dirba minimalia vienos turbinos galia. Likusį paros laiką, priklausomai nuo tvenkinio vandens lygio, jungiamos 2, 3 arba 4 turbinos. Visa galia Kauno HE dirba tik potvynių metu [5].

1992 m. pradėjo veikti Kruonio HAE. Šiuo metu įrengti 4 hidroagregatai (50% projektinės galios). Kruonio HAE žemutinis bježas yra Kauno HE tvenkinys, o aukštutinis baseinas suformuotas 90–100 m aukštyje tvenkinio krante. Kruonio HAE, tenkindama Lietuvos energetikos sistemos poreikius, reguliuoja apkrovą. Naktį HAE naudoja perteklinę elektros energiją, o dieną generatoriai gamina energiją. Kai Ignalinos AE pilnai apkrauta, apkrovos lyginimui dirba 1–3 agregatai, o pikinę energiją tiekia 2–4 agregatai [6, 7].

Kauno HE ir Kruonio HAE darbas turi įtakos hidrodinaminiam ir nešmenų procesams Kauno HE tvenkinyje, taip pat pakeičia Nemuno upės ruožo žemiau užtvankos hidrodinaminį režimą bei upės baseino vandens balansą. Norint geriau išsiaiškinti vykstančius procesus

Kauno HE tvenkinyje, sukurtas Kauno HE tvenkinio hidrodinaminis modelis, naudojant dviejų dimensijų skaitmeninio modeliavimo programą MIKE 21 HD [8]. Tai dvimatis netolygiai kintančios tėkmės modulis, kuriuo apskaičiuojami vandens lygio kaita, vandens srauto pokyčiai ir tėkmės greičių pasiskirstymas. Vandens lygiai, jų pokyčiai ir tėkmės greičiai apskaičiuojami kiekvienam tinklelio elementui.

Hidrodinaminio modelio pagrindas – netiesinių lygčių sistemos sprendimas. Suintegruotos pagal vertikalę masės vientisumo ir momento konservatyvumo lygtys aprašo tėkmės ir vandens lygio kitimą x ir y kryptimis. Pagrindinės duomenų grupės, reikalingos modeliujant MIKE 21 HD programa, yra:

1. Modelio parametrai: laiko žingsnis ir modeliavimo trukmė, pradinių parametų apibrėžimas (vandens lygiai, vandens debitai ar tėkmės greičiai bet kurioje tinklelio celėje, pjūvyje arba vandens telkinio atkarpoje), vandens telkinio orientacija ir geografinė platumas.
2. Vandens telkinio batimetrija.
3. Pradinės modeliavimo sąlygos – vandens paviršiaus nuolydis arba vienetinis vandens debitas x ir y kryptimis.

4. Kraštinės sąlygos – vandens lygis arba debitas.

5. Kitos veikiančios jėgos – vėjo greitis ir kryptis; papildomi nuotėkio įtekėjimo arba ištekėjimo šaltiniai, jų debitai bei tekėjimo greičiai.

Kuriant hidrodinaminį Kauno HE tvenkinio modelį pasirinkta visa tvenkinio akvatorija. Tvenkinio batimetrija sudaryta pagal 1:10000 mastelio planą. Modeliuojamo tinklelio kvadratinės celės dydis pasirinktas 50×50 m.

3. KAUNO HE TVENKINIO HIDRODINAMINIO MODELIO KALIBRAVIMAS

Sudarytas Kauno HE tvenkinio hidrodinaminis modelis panaudotas sprendžiant svarbius uždavinius:

1. Kruonio HAE plėtros iki 8 turbinų galimybių įvertinimas [9].

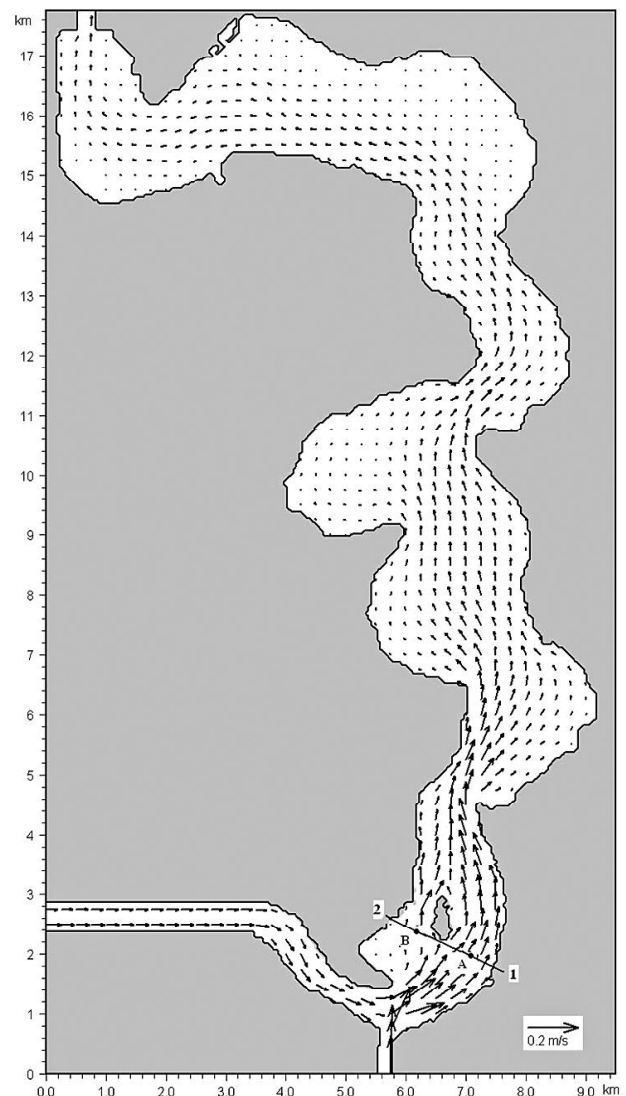
2. Optimalių Kruonio HAE ir Kauno HE darbo režimų, dėl kurių būtų mažiausiai veikiamas natūralus nusistovėjęs Kauno marių hidrologinis režimas, nustatymas [3].

3. Rizikos analizės uždaviniai, kuriuos sprendžiant galima įvertinti Kauno marių hidrodinaminio režimo pokyčius ekstremaliomis sąlygomis (ypač retos tikimybės Nemuno potvyniai, Kauno HE arba Kruonio HAE elektrinės griūtės atvejai). Šie tyrimai aprašyti [7, 10].

Norint gauti patikimus sprendžiamų uždavinių rezultatus, Kauno HE tvenkinio hidrodinaminis modelis turi būti gerai sukalibruotas. Kalibravimo procedūra yra reikalinga empirinių modelio parametrų bei koeficientų nustatymui bei patikrinimui, ar kraštinės ir pradinės sąlygos atitinka modelyje naudojamas sąlygas. Tuo tikslu naudojami stebėjimų duomenys. Kalibravimas buvo atliktas lyginant išmatuotas Kauno HE tvenkinio tėkmų reikšmes su sumodeliuota tvenkinio tėkmų struktūra esant konkrečioms sąlygoms. MIKE 21 HD programinės įrangos kalibravimui naudojami vandens telkinio dugno šiurkštumo ir turbulentiškumo koeficientai. Įprasta hidrodinaminio modelio kalibravimo procedūra yra tokia: modeliuojant hidrodinaminio modeliu yra įvedamos realios vėjo greičio reikšmės bei matavimo dienos debitas atitinkantys lygio nuostoliai. Šiurkštumo bei turbulentiškumo koeficientai yra keičiami taip, kad geriausiai atitiktų vidutinius išmatuotus tėkmės greičius vertikalėse. Tokiu būdu nustatomi geriausiai modelį aprašantys šiurkštumo ir turbulentiškumo koeficientai.

Kauno HE tvenkinio hidrodinaminio modelio kalibravimas atliktas pagal LEI hidrologijos darbuotojų išmatuotus tėkmės greičius Kauno HE tvenkinyje 1993 m. liepos 15 d. Tėkmų matavimai atlikti veikiant dviem HAE hidroagregatams (iš HAE viršutinio baseino į tvenkinį tekėjo $400 \text{ m}^3/\text{s}$ debitas). Nemunu tekėjo $242 \text{ m}^3/\text{s}$ debitas, o per Kauno HE užtvankos pralaidas – $247 \text{ m}^3/\text{s}$ debitas. Kauno HE tvenkinio pjūvio vertikalėse A ir B (2 pav.) buvo išmatuoti tėkmės greičiai. Vidutinis tėkmės greitis vertikalėje A yra $0,08 \text{ m/s}$, o vertikalėje B – $0,05 \text{ m/s}$. Literatūros šaltiniuose [11, 12] pateiktos galimos Maningo koeficiento reikšmės įvairiomis sąlygomis, kai vanduo teka skirtingo grunto dugnu, per žo-

lę, pro krūmus, pastatus ir kitokias dangas. Šio koeficiento reikšmės gali kisti nuo $0,025$ iki $0,20$. Šiurkštumo koeficientas (išreikštas Chezy skaičiumi) priklauso nuo Maningo koeficiento ir vandens telkinio gylio ($C = M \cdot h^{1/6}$). Geriausia koreliacija tarp išmatuotų ir apskaičiuotų tėkmės greičių reikšmių Kauno HE tvenkinio vertikalėse A ir B nustatyta tada, kai šiurkštumo koeficientas $C = 32 \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$, o turbulentiškumo koeficientas $E = 2,00 \text{ m}^2/\text{s}$. Kauno HE tvenkinio tėkmės struktūra modelio kalibravimo metu pavaizduota 2 paveiksle. Išmatuotų ir sumodeliuotų tėkmės greičių reikšmės sutampa: tvenkinio vertikalėje A vidutinis išmatuotas ir apskaičiuotas tėkmės greitis yra $0,08 \text{ m/s}$, o vertikalėje B – $0,05 \text{ m/s}$.

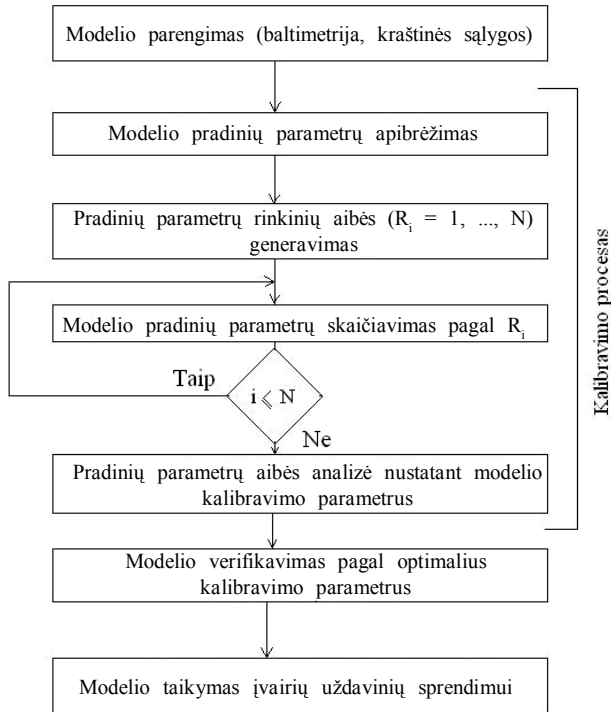


2 pav. Kauno HE tvenkinio tėkmų struktūra kalibravimo sąlygomis

4. KAUNO HE TVENKINIO HIDRODINAMINIO MODELIO KALIBRAVIMAS REMIANTIS NEAPIBRĖŽTUMO ANALIZE

Taikant įprastą hidrodinaminio modelio kalibravimo procedūrą įvertinama tik skaitmeninės programos MIKE 21

HD matematinių lygčių parametru (šiurkštumo ir turbulentiškumo) įtaka modeliavimo rezultatams, tačiau neįvertinamas pradinių duomenų (modelio parametru vertių) neapibrėžtumas. Norint įvertinti tiek modelio lygčių, tiek pradinių duomenų neapibrėžtumus, naudojame programinį paketą SUSA. Kauno HE tvenkinio hidrodinaminio modelio kalibravimui taikoma tokia tyrimų seka (3 pav.):



3 pav. Kauno HE hidrodinaminio modelio kalibravimas remiantis neapibrėžtumo analize

1. Modelio įvardinių parametru apibrėžimas, jų kitimo ribų bei skirstinio dėsnio nustatymas.
2. Įvardinių parametru rinkinių (statistinių imčių) generavimas.
3. Kauno HE tvenkinio hidrodinaminis skaičiavimas pagal sugeneruotus įvardinių duomenų rinkinius.
4. Modeliavimo rezultatų analizė nustatant modelio kalibravimo parametrus, turinčius didžiausią įtaką modelio kalibravimo rezultatui.

1 lentelė. Svarbiausių modelio įvardinių parametru skirstiniai

| Eil. Nr. | Įvardinis parametras | Įvardinio parametro ribos | | Bazinė reikšmė (m) | Standartinis nuokrypis (s) | Įvardinio parametro skirstinio dėsnis |
|----------|---------------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| | | Min. reikšmė (i) | Max. reikšmė (a) | | | |
| 1 | Vandens debitas Nemune | 206 m ³ /s | 278 m ³ /s | 242 m ³ /s | 18 [15%] | Normalusis |
| 2 | Kruonio HAE turbinų vandens debitas | 380 m ³ /s | 420 m ³ /s | 400 m ³ /s | 10 [5%] | Normalusis |
| 3 | Vandens debitas per Kauno HE turbinas | 235 m ³ /s | 259 m ³ /s | 247 m ³ /s | 6 [5%] | Normalusis |
| 4 | Šiurkštumo koeficientas | 20 m ^{1/2} /s | 40 m ^{1/2} /s | 32 m ^{1/2} /s | - | Trikampis |
| 5 | Turbulentiškumo koeficientas | 0,5 m ² /s | 3,5 m ² /s | 2 m ² /s | - | {0,5;1;1,5;2;2,5;3;3,5} |
| 6 | Vėjo greitis | 2 m/s | 5 m/s | - | - | Tolygusis |

Kauno HE tvenkinio modelio kalibravimo procesui turi įtakos dviejų tipų įvardiniai parametrai:

modelio kraštinės sąlygos ir MIKE 21 HD programų paketo matematinių lygčių parametrai, skirti modelio kalibravimui.

Kauno HE tvenkinio modelio kraštinių sąlygų duomenys buvo išmatuoti Kauno HE tvenkinyje 1993 m. liepos 15 d. Tai kraštinės modelio sąlygos (tvenkinio prietakos debitas; vandens debitas per Kruonio HAE turbinas, tekantis į reversinį kanalą; debitas, ištekantis per Kauno HE turbinas) bei vėjo greitis.

Pagal GRS metodologiją [13], naudojant statistinę neapibrėžtumo ir jautrumo analizę reikia atlikti daugelį skaičiavimų su skirtingomis galutiniais skaičiavimo rezultatais sąlygojančių įvardinių parametru vertėmis. Pasielkus programų paketą SUSA [14] sudaromi rinkiniai (imtys), įvertinant įvardinių parametru galimas kitimo ribas ir jų tikimybinio skirstinio dėsnį.

Kalibravimo metu Kauno HE tvenkinio įvardiniai parametrai yra šie: Nemuno prietakos debitas, Kruonio HAE turbinų debitas, Kauno HE turbinų debitas, šiurkštumo koeficientas, turbulentiškumo koeficientas ir vėjo greitis. Nagrinėjamų įvardinių parametru kitimo ribos (maksimali ir minimali reikšmės), bazinės reikšmės ir standartinis nuokrypis pateikti 1 lentelėje. Kai žinoma bazinė įvardinio parametro reikšmė (m) ir standartinis nuokrypis (s), tai minimali parametro reikšmė $i = m - 2s$, o maksimali parametro reikšmė $a = m + 2s$.

Bazinė reikšmė – tai reikšmė, kuriai esant atlikti baziniai skaičiavimai. Baziniai skaičiavimai – tokie, kurie duoda tikėtiniausius rezultatus. Dažniausiai tie rezultatai gaunami esant vidutinėms įvardinių parametru turinčių įtakos modeliavimo rezultatams, reikšmėms (m). Bazinė reikšmė, pagal statistikos duomenis, yra aritmetinis vidurkis arba mediana.

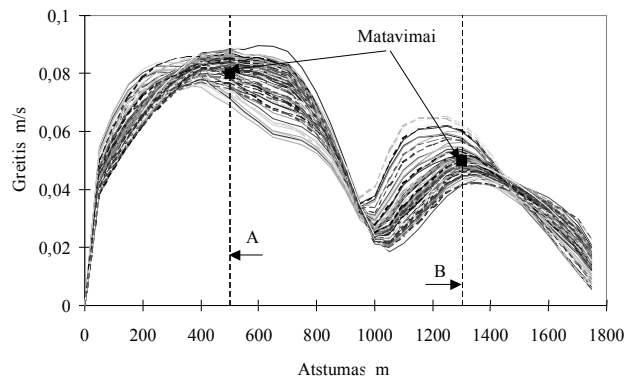
Pasirinktas įvardinio parametro tikimybinio skirstinio dėsnis turi įtakos galutiniams modeliavimo rezultatams. Todėl skirstinio dėsnis pasirenkamas įvertinant anksčiau sukauptą patirtį. Kaip matyti 1 lentelėje, priimta, kad tokių įvardinių parametru, kaip vandens debitai Nemune, per Kruonio HAE ir Kauno HE turbinas, skirstinio dėsniai yra normalieji. Normaliojo skirstinio atveju dviejų standartinių nuokrypių dydžio intervalas tarp minimalios ir maksimalios reikšmės apima 95% visų galimų para-

metro reikšmių. Bendruoju atveju (t. y. visų kitų skirstinių atveju) dviejų standartinių nuokrypių dydžio intervalas apima 75% visų galimų parametro reikšmių. Maksimalias ir minimalias parametro vertes būtina nustatyti, nes matematiškai tiksliai taikant šiuos skirstinius, parametrai gali įgyti ir neribotai dideles arba mažas vertes, o tuomet jos neturėtų fizikinės prasmės.

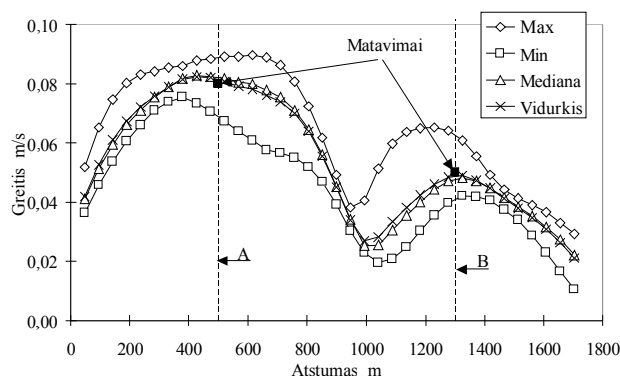
Atliekant neapibrėžtumų ir jautrumo analizę pagal pasirinktą metodologiją, atliekamų skaičiavimų skaičius nepriklauso nuo skaičiavimo rezultatus veikiančių parametru skaičiaus, tačiau priklauso nuo norimų pasiekti skaičiavimo rezultatų statistinio patikimumo ribų. Minimalus skaičiavimų (modeliavimų) skaičius, reikalingas norint nustatyti tikslumu apskaičiuoti rezultatų minimalias ir maksimalias vertes, nustatomas pagal Vilksio formulę [14] ir pirmą kartą buvo pritaikytas sprendžiant optimalios kokybės kontrolės statistinius uždavinius. Šiame darbe norime patikrinti modelio kalibravimo rezultatus, kai svarbios tiek minimalios, tiek maksimalios skaičiavimo reikšmės, todėl nustatant modeliavimų skaičių buvo naudojamas dvipusis Vilksio kriterijus. Pagal šį kriterijų reikia atlikti 93 skaičiavimus. Tuomet Vilksio teorija teigia, kad su tikimybe 0,95 (pasikliautinas lygmuo), 95% atvejų (patikimumo lygmuo) maksimali bei minimali reikšmės bus viduje kreivių pluošto, kuris gaunamas atlikus 93 skaičiavimus. Vilksio formulė leidžia nustatyti reikalingą skaičiavimų kiekį ir esant kitokiems pasikliautinam lygmeniui ir patikimumui. Pavyzdžiui, naudojantis vienpusiu Vilksio kriterijumi, su tikimybe 0,95 (pasikliautinas lygmuo), 95% atvejų (patikimumo lygmuo) gautų rezultatų maksimali vertė neviršys tos maksimalios reikšmės, kuri gauta atlikus 59 skaičiavimus.

Naudojant SUSA programinę įrangą buvo sudaryti 93 skirtingi modelio įvadiniių parametru, turinčių įtakos modeliavimo rezultatams, rinkiniai. Šie rinkiniai gauti atsitiktinai parenkant kiekvieną parametru pagal jo skirstinio dėsnį ir maksimaliųjų–minimaliųjų reikšmių intervalą. Pagal šiuos parametru rinkinius sumodeliuotas Kauno HE tvenkinio hidrodinaminis režimas. Tėkmės greičiai apskaičiuoti 1–2 pjūvyje (2 pav.), kurio pradžia yra nuo dešinio kranto. Šio pjūvio tėkmės greičių struktūros pagal 93 sugeneruotus įvadiniių parametru rinkinius pavaizduotos 4 paveiksle.

Atlikta pjūvio 1–2 tėkmės greičių statistinė analizė (5 pav.). Lyginami išmatuoti tėkmės greičiai vertikalėse A ir B su suskaičiuotomis tėkmės reikšmėmis šiose vertikalėse. Tėkmės matavimo vertikalė A Kauno HE tvenkinyje yra nutolusi 500 m atstumu nuo pjūvio pradžios (dešiniojo tvenkinio kranto), o vertikalė B – 1300 m. Skaičiavimų rezultatai (5 pav.) rodo, kad aritmetinis vidurkis ir mediana beveik sutampa. Tai praktiškai reiškia, kad skirstinys yra simetriškas vidurkio atžvilgiu, t. y. konkreti skaičiavimo reikšmė su panašia tikimybe gali būti tiek didesnė, tiek mažesnė už vidurkį. Šiuo atveju tiek mediana, tiek aritmetinis vidurkis vienodai gerai nusako skirstinio centrą. Išmatuoti tėkmės greičiai vertikalėse A ir B (atitinkamai 0,08 ir 0,05 m/s) atitinka sumodeliuotų tėkmės greičių pagal 93 rinkinius vidurkius (4



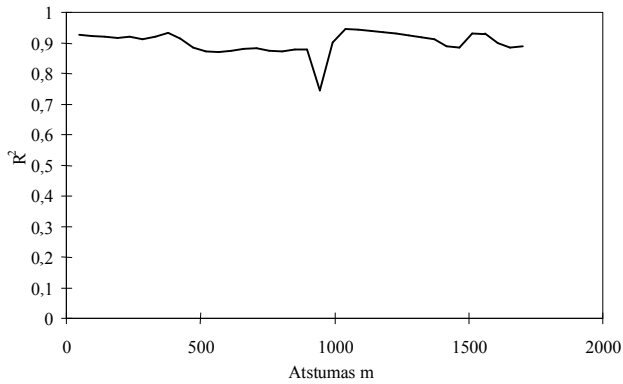
4 pav. Kauno HE tvenkinio tėkmės greičiai pjūvyje 1–2 pagal 93 įvadiniių parametru rinkinius



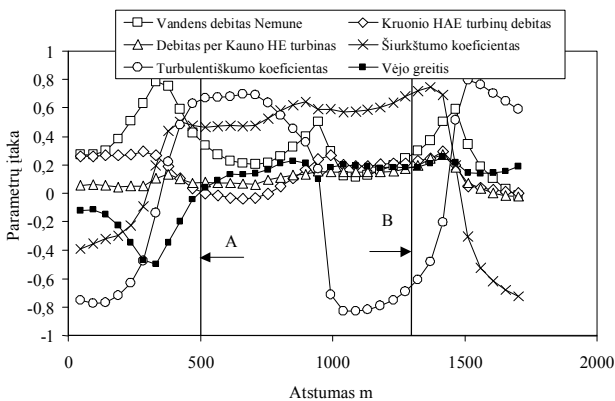
5 pav. Kauno HE tvenkinio tėkmės greičių pjūvyje 1–2 statistinė analizė

ir 5 pav.). Vadinasi, įvadiniių parametru rinkinių sugeneruotos reikšmės gerai atitinka pasirinktus skirstinio dėsnius. Maksimali apskaičiuota tėkmės greičių reikšmė vertikalėje A pagal 93 rinkinius skiriasi 11% nuo išmatuoto greičio reikšmės, o vertikalėje B – 25%. Minimali apskaičiuota tėkmės greičio reikšmė skiriasi 14% nuo išmatuotos greičio reikšmės vertikalėje A ir 18% vertikalėje B.

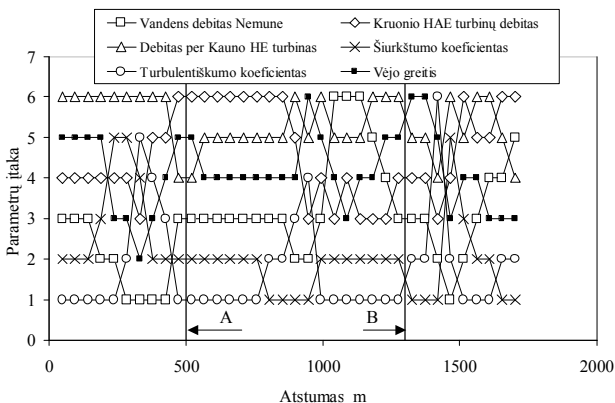
Pasitelkus SUSA programų paketą atlikta tam tikrų įvadiniių parametru įtakos galutiniam rezultatui (tėkmės greičiui) jautrumo analizė (6–8 pav.). Hidrodinaminio modelio kalibravimo parametru jautrumo analizė atlikta taikant Spirmeno ranginę koreliaciją. Programų paketo SUSA pagalba kiekvienam parametru apskaičiuotas Spirmeno koreliacijos koeficientas. Taip pat nustatytas determinacijos koeficientas R^2 (6 pav.). Kadangi R^2 yra arti vieneto, tai reiškia, kad tiesinės regresijos modelis yra gerai suderintas su duomenimis ir įvesties parametru neapibrėžtumas paaiškina didesnę dalį nagrinėjamo rezultato neapibrėžtumo. Esant tokiai situacijai, galima apskaičiuoti kelis parametru jautrumo koeficientus. Vienas iš jų yra Spirmeno ranginis koreliacijos koeficientas, kuris parodo, kokią dalį nagrinėjamo rezultato neapibrėžtumo paaiškina kiekvienas iš įvesties parametru. Čia reikėtų įvertinti, kad Spirmeno ranginis koreliacijos koeficientas iš tikrųjų parodo bendrą suminę konkretaus parametro ir jo sąveikos su kitais parametrais įtaką nagrinėjamam rezultatui. Spirmeno ranginio koreliacijos koeficiento interpretacija darosi komplikuoja, kai parametru



6 pav. Determinacijos koeficiento R^2 reikšmė Kauno HE tvenkinio pjūvyje 1–2



7 pav. Šešių įvadininių parametru įtaka modeliavimo rezultatui – vandens tėkmės greičiui Kauno HE tvenkinio pjūvyje 1–2 (Spirmeno ranginis koreliacijos koeficientas)



8 pav. Šešių įvadininių parametru įtakos modeliavimo rezultatų rangui Kauno HE tvenkinio pjūvyje 1–2

tarpusavio koreliacija yra didelė. Tuomet vertėtų šį koeficientą lyginti su standartizuotu regresijos koeficientu.

Atskirų įvadininių parametru įtakos galutiniam rezultatui (Kauno HE tvenkinio tėkmės greičiui) jautrumo analizė pateikta 7 ir 8 paveiksluose. 7 paveiksle pavaizduota 6 įvadininių parametru įtaka sumodeliuotam MIKE 21 HD programų paketo pagalba vandens greičiui. Kuo didesnė absoliutiniu dydžiu parametru jautrumo koeficiento reikšmė, tuo tas parametras yra svarbesnis ir turi didesnę įtaką modelio rezultatui. Kaip matyti 7 paveiks-

le, priklausomai nuo atstumo pjūvyje 1–2 parametru įtaka vandens greičiui kinta. Kartais parametru įtaka yra neigiama, tai reiškia, kad didėjant šiam parametru vandens greitis bus mažesnis. Šiuo atveju svarbi parametru įtaka tose vertikalėse (A ir B), kuriose atliekami matavimai. Įvadininių parametru įtaka modeliavimo rezultatams vertikalėse A ir B pateikta 2 lentelėje.

2 lentelė. Įvadininių parametru įtaka modeliavimo rezultatams vertikalėse A ir B, kuriose atliekami matavimai (Spirmeno ranginis koreliacijos koeficientas)

| Eil. Nr. | Įvadininis parametras | Parametru įtaka modeliavimo rezultatams | |
|----------|-------------------------------|---|-------------|
| | | A vertikalė | B vertikalė |
| 1 | Vandens debitas Nemune | 0,380 | 0,273 |
| 2 | Kruonio HAE turbinų debitas | 0,003 | 0,219 |
| 3 | Debitas per Kauno HE turbinas | 0,053 | 0,182 |
| 4 | Šiurkštumo koeficientas | 0,472 | 0,699 |
| 5 | Turbulentiškumo koeficientas | 0,648 | -0,649 |
| 6 | Vėjo greitis | -0,005 | 0,182 |

Kaip matyti 2 lentelėje ir 8 paveiksle, svarbiausi parametrai, lemiantys modelio kalibravimo procesą, yra dugno šiurkštumas ir turbulentiškumo koeficientas. Šių parametru įtaka modeliavimo rezultatams (tėkmės greičiui) yra didžiausia visame tvenkinio pjūvyje 1–2 (matavimo vertikalėje A dugno šiurkštumo įtaka lygi 0,472, o turbulentiškumo koeficiento 0,648 ir matavimo vertikalėje B ši įtaka yra atitinkamai 0,699 ir -0,649). Turbulentiškumo koeficiento reikšmė labai priklauso nuo tvenkinio gylio. Tvenkinio pjūvio 1–2 pradžioje gylis greitai didėja iki 14 m, todėl šiam įvadiniam parametru (turbulentiškumo koeficientui) Spirmeno ranginis koreliacijos koeficientas (įvadinio parametru įtaka modeliavimo rezultatui) yra apytiksliai -0,8. Artėjant prie salos tvenkinys seklėja iki 3 m, ten apskaičiuotas didelis teigiamas koreliacijos koeficientas (iki 0,65). Už salos tvenkinys pagilėja iki 7 m, čia vėl nustatytas neigiamas koreliacijos koeficientas. Likus 250 m iki pjūvio pabaigos tvenkinys seklėja iki 5 m. Čia apskaičiuotas teigiamas koreliacijos koeficientas (iki 0,8). Darome išvadą, kad kalibravimo metu parenkant turbulentiškumo koeficiento reikšmes bei jų pasiskirstymo dėsnį yra svarbu įvertinti, kokiam tvenkinio gylyje atlikti tėkmės greičių matavimai.

Kiti įvadininiai parametrai yra mažiau svarbūs. Iš parametru, apibrėžiančių kraštines sąlygas, reikšmingiausias yra Nemuno prietakos debitas. Didžiausias tėkmės vienetinis debitas ($m^3/s/m$) stebimas giliausioje tvenkinio pjūvio vietoje, t. y. pjūvio pradžioje. Todėl šio parametru koreliacijos koeficientas yra teigiamas (0,787). Svarbu kuo tiksliau apskaičiuoti Nemuno prietakos debito tėkmės greičių matavimų metu. Šiame tyrime apibrėžėme, kad Nemuno prietakos debito paklaida yra $\pm 15\%$. Iš tikrųjų debito matavimo paklaida priklauso nuo tekančio vandens srauto dydžio. Tiksliausiai apskaičiuojami vidutinės tikimybės de-

bitai. Esant mažiems debitams bei didelių potvynių debitams, jų apskaičiavimo paklaida yra didesnė. Kiti modelio kraštinių sąlygų įvadiniai parametrai (Kruonio HE turbinų debitas bei Kauno HE turbinų debitas) didelės įtakos kalibravimo procesui neturi, nes šių parametru matavimo paklaida nėra didelė.

Įvadinio parametro vėjo greičio įtaka modeliavimo rezultatams nėra didelė, nes modelio kalibravimo metu pūtė silpnas vėjas. Vandens telkinio hidrodinaminiam režimui didelę įtaką turi stiprūs vėjai, kurių greitis ≥ 15 m/s. Tada modelio kalibravimui yra svarbus išmatuoto vėjo greičio tikslumas.

Atliktą įvadinių parametru įtakos modeliavimo rezultatams analizę patvirtina sudaryti šešių įvadinių parametru Spirmeno koreliacijos koeficientų rangai (8 pav.), nusakantys įvadinių parametru įtakos laipsnį (rangą) modeliavimo rezultatams. Parametro įtakos rangas tuo aukštesnis, kuo rango skaičius žemesnis. Įvadinių parametru įtakos rangai modeliavimo rezultatams tose vertikalėse, kuriose atliekami matavimai, pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Įvadinių parametru įtakos rangas modeliavimo rezultatams A ir B vertikalėse, kuriose atliekami matavimai

| Eil. Nr. | Įvadinis parametras | Parametro įtakos rangai modeliavimo rezultatams | |
|----------|-------------------------------------|---|-------------|
| | | A vertikalė | B vertikalė |
| 1 | Vandens debitas Nemune | 3 | 3 |
| 2 | Kruonio HAE turbinų vandens debitas | 6 | 4 |
| 3 | Debitas per Kauno HE turbinas | 4 | 6 |
| 4 | Šiurkštumo koeficientas | 2 | 2 |
| 5 | Turbulentiškumo koeficientas | 1 | 1 |
| 6 | Vėjo greitis | 5 | 5 |

Kaip matyti 3 lentelėje ir 8 paveiksle, Kauno HE tvenkinio hidrodinaminio modelio kalibravimo procese yra svarbiausi turbulentiškumo koeficiento bei tvenkinio dugno šiurkštumo, taip pat Nemuno prietakos debito apskaičiavimo tikslumai.

SUSA programinis paketas padėjo išsiaiškinti svarbiausius Kauno HE tvenkinio hidrodinaminio modelio kalibravimo aspektus.

5. IŠVADOS

Neapibrėžtumų analizės metodologija, anksčiau naudota tik sudėtingoms techninėms sistemoms, pritaikyta hidrologijoje. Šiame straipsnyje jautrumo ir neapibrėžtumo analizė, naudojantis GRS kompanijos sukurtu programų paketu SUSA, pritaikyta kalibruojant hidrodinaminį modelį.

Atlikta Kauno HE tvenkinio hidrodinaminio modelio įvadinių parametru analizė naudojant SUSA programinį paketą parodė, kad svarbiausi įvadiniai parametrai kalibruojant modelį yra dugno šiurkštumo ir turbulentiškumo koeficientai. Keičiant šiuos parametrus modelio kalibravimo procesas atliekamas greičiausiai ir tiksliausiai.

Įvadinių parametru įtakos galutiniam rezultatui (vandens tėkmės greičiams Kauno HE tvenkinio matavimo vietose) analizė parodė, jog didžiausią įtaką šiems rezultatams turi matematinio modelio parametrai (turbulentiškumo ir dugno šiurkštumo koeficientas) ir vandens debitas Nemune. Kitų įvadinių parametru (Kruonio HAE turbinų debito, HE turbinų debito, vėjo greičio) įtaka yra mažesnė. Siekiant patikimai suderinti modelį, reikėtų atkreipti ypatingą dėmesį į tuos parametrus, kurių įtaka yra didžiausia.

Tėkmės greičius, reikalingus modelio kalibravimui, reikėtų matuoti giliausiose tvenkinio skerspjūvio vietose. Tai patvirtina tas analizės rezultatas, jog dugno šiurkštumo ir Nemuno prietakos debitas turi mažesnę įtaką skaičiuojamajam tėkmės greičiui seklesnėse skerspjūvio vietose.

Sutrumpinimai

AE – atominė elektrinė

GRS – Vokietijos kompanijos pavadinimas (Gesellschaft fuer Anlagen und Reaktorsicherheit)

HAE – hidroakumuliacinė elektrinė

HE – hidroelektrinė

LEI – Lietuvos energetikos institutas

Žymėjimai

a – maksimali parametro reikšmė

C – šiurkštumo koeficientas

E – turbulentiškumo koeficientas

h – vandens telkinio gylis

m – bazinė parametro reikšmė

M – Maningo koeficientas

s – standartinis nuokrypis

Gauta 2006 06 06

Parengta 2006 11 05

Literatūra

1. AUTOCAL. Generic Tool for Automatic Calibration, Sensitivity Analysis and Scenario Management. http://www.dhi-software.com/Generic_tools.
2. Christiaens K., Feyen J. Sensitivity and uncertainty analysis of complex distributed hydrological models using Latin Hypercube // 3rd DHI Software Conference 7–9 June 1999. <http://www.dhi.dk/softcon/papers>.
3. Kauno hidroelektrinės tvenkinio naudojimo ir priežiūros taisyklės / Mokslinio tiriamojo darbo ataskaita. LEI, 2003.
4. Gailiūšis B., Jablonskis J., Kovalenkoviėnė M. Lietuvos upės. Kaunas: LEI, 2002. 792 p.
5. Gailiūšis B., Kriaučiūnienė J., Kriaučiūnas R. Effect of Kaishyador hydroelectric pumped storage power plant on hydrophysical regime of the Kaunas reservoir // Water Resources. 1997. Vol. 24. No. 4. P. 399–403.
6. Kauno HE pavojaus ir rizikos analizė / Mokslinio tiriamojo darbo ataskaita. LEI, 2003. 95 p.

7. Kruonio HAE pavojaus ir rizikos analizė / Mokslinio tiriamojimo darbo ataskaita. LEI, 2003. 61 p.
8. MIKE 21 Hydrodynamic Module. User Guide and Reference Manual. Danish Hydraulic Institute, 2002.
9. Gailiusis B., Kriauciūnienė J., Rimavičiūtė E. Modelling the effect of the hydroelectric pumped storage plant on hydrodynamic regime of the Kaunas Reservoir in Lithuania // *Nordic Hydrology*. 2003. Vol. 34. Iss. 5. P. 507–518.
10. Kriauciūnienė J., Gailiusis B., Šarauskienė D. Exploitation of water resources of the Kaunas Reservoir in case of dam break // *XXIII Nordic Hydrological Conference*. Tallinn, Estonia, 8–12 August 2004. P. 450–458.
11. Bornschein A. Propagation of Dam Break Waves // *1st Central European DHI Software Conference*. Prague, 2003.
12. Petr J. The melcany dam—design and evaluation of variants, based on rainfall—runoff and Flood Model of Dedina River // *1st Central European DHI Software Conference*. Prague, 2003.
13. Glaeser H. G., Uncertainty evaluation of thermal-hydraulic code results // *Int. Meeting on “Best-Estimate” Methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000)*. Washington DC, USA, 2000.
14. Kloos M., Hofer E. SUSA Version 3.2. User’s Guide and Tutorial. GRS, Garching, 1999.

**Brunonas Gailiusis, Jūratė Kriauciūnienė,
Eugenijus Ušpuras, Algirdas Kaliatka,
Virginijus Vileiškis**

CALIBRATION OF THE HYDRODYNAMIC MODEL OF THE KAUNAS RESERVOIR IN ACCORDANCE WITH ANALYSIS OF UNCERTAINTY

S u m m a r y

Uncertainty analysis has been applied for some years at the Lithuanian Energy Institute, this far only to complex technical systems when estimating the uncertainty of thermal hydraulic calculation result. However, calculations of uncertainties could be applied also to natural systems. Modelling of hydrological and hydrodynamic processes usually faces the problem of not precisely known parameters and physical phenomena. Quantitative uncertainty analysis might be used to quantify the underlying uncertainties that might arise due to initial data, mathematical model or solution methods. The ordinary calibration procedure of the MIKE 21 HD computer code evaluates only the influence of mathematical equations’ parameters (coefficients of bed re-

sistance and turbulence) on modelling results, but uncertainty due to initial data is not taken into account. This paper presents uncertainty and sensitivity analysis in the calibration process of hydrodynamic modelling of the Kaunas Reservoir using the SUSA computer code. The calibration of the model was done in the following order: estimation of initial data and the MIKE 21 HD code parameters that have an impact on calculation results: generation of input data sets and hydrodynamic calculation of the Kaunas Reservoir using the generated sets; sensitivity analysis of modelling results to determine most significant calibration parameters. It has been determined that the basic input parameters in the calibration process are the coefficients of bed resistance and turbulence and the water discharge of the Nemunas river as a boundary condition of the model. The influence of the other input parameters is less significant.

Key words: analysis of sensitivity and uncertainty, SUSA, Kaunas reservoir, hydrodynamic modelling, MIKE 21

**Брунонас Гайлюшис, Юрате Кряучюнене,
Еугениус Ушпурас, Альгирдас Калятка,
Виргиниус Вилейнишкис**

КАЛИБРАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОДОХРАНИЛИЩА КАУНАССКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Резюме

В Литовском энергетическом институте анализ неопределенностей применяется уже несколько лет. До сих пор такой анализ проводился только для сложных технических систем: оценивались неопределенности результатов термогидравлических расчетов. Однако методология анализа неопределенности и чувствительности может применяться и при анализе моделей любых физических процессов, например, гидрологических. При создании гидродинамической модели природного объекта – водохранилища Каунасской ГЭС широко использовались измерения, осуществляемые в природной среде. Погрешности этих измерений составляют до $\pm 15\%$, что является важным источником неопределенностей результатов. Результаты таких измерений расположены по нормальному распределению. Анализ неопределенности и чувствительности результатов моделирования позволяет оценить весь диапазон возможных изменений параметров гидродинамической модели Каунасской ГЭС.

Ключевые слова: методология анализа неопределенностей, SUSA, гидродинамическая модель, MIKE 21, калибровка модели, водохранилище Каунасской ГЭС