

3D МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛИХ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

А.В. Мороз, канд. техн. наук

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна.

Енергетичне обладнання малих гідроелектростанцій, а саме гідротурбіни, повинно надійно працювати в умовах тривалої експлуатації, мати високий ККД та мати змогу упродовж більшого періоду життєвого циклу підтримувати високу сталу потужність. В результаті тривалого вдосконалення конструкцій створено ряд типів гідротурбін, які найкращим чином відповідають зазначеним вимогам. Проте залишаються недостатньо дослідженими робочі процеси гідротурбін з урахуванням можливих природних та технічних впливів. Також достатньо складно врахувати раптову зміну швидкості річкового потоку, наявність вихорів на виході з турбіни та ін.

У цій роботі досліджено можливості застосування сучасного програмного забезпечення для моделювання робочих режимів і енергетичних характеристик малих гідроелектростанцій з використанням експериментальних і довідникових даних.

Існують різні види характеристик гідромашин, які отримані при проведенні досліджень у лабораторних умовах та відображають у графічному вигляді залежність одних робочих параметрів від інших. Найбільше розповсюдження у гідроенергетиці отримали приведені універсальні характеристики, які будуються для одиничних значень визначених величин: $D=1\text{ м}$ та $H=1\text{ м}$. Моделювання нестационарних електромеханічних процесів гідроенергетичного агрегату ґрунтується на рішенні диференційного рівняння руху складових частин з використанням механічних характеристик турбіни, генератора і електричного навантаження. Використання сукупності нелінійних характеристик у процесі вирішення диференційного рівняння руху вимагає їх уявлення безпервною поверхнею, яка може бути ефективно реалізовано за допомогою тривимірних 3D графіків та апроксимуючих сплайн-функцій що входять до пакету прикладних програм для числового аналізу Matlab.

У статті наведено приклад коду та опис головних команд, які дають змогу будувати та аналізувати різні гідромеханічні та енергетичні характеристики агрегатів для проведення досліджень робочих режимів малих гідроелектростанцій. Знаходження кількісних значень кривих, які утворюються на перетині двох поверхонь, дає змогу дослідити та обґрунтувати закони управління гідроенергетичними турбінами з урахуванням природних особливостей річкового потоку, що було неможливо здійснити досі. Бібл. 14, рис. 9.

Ключові слова: гідроенергетика, турбіна, програмування, потужність, момент, кут обертання.

3D SIMULATION OF HYDROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF SMALL HYDROPOWER PLANTS

A. Moroz, candidate of technical science

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.

The power equipment of small hydropower plants, namely hydro turbines, must operate reliably in continuous operation, have a high efficiency and be able to maintain high steady power over a longer life cycle. As a result of continuous improvement of structures, a number of types of hydroturbines have been created the best in these requirements. However, the workflows of hydroturbines remain under-researched, taking into account the possible natural and technical impacts. It is also quite difficult to take into account the sudden change in river flow velocity, the presence of vortices at the outlet of the turbine, etc.

In this work are explored the possibilities of using modern software for simulation of operating modes and energy characteristics of small hydroelectric power plants using experimental and reference data.

There are different types of characteristics of hydromachines, which are obtained during laboratory tests and graphically depict the dependence of some operating parameters on others. The most widespread in the hydropower industry are the given universal characteristics, which are built for single values of certain values: $D = 1\text{ m}$ and $H = 1\text{ m}$. Modeling of non-stationary electromechanical processes of a hydropower unit is based on the solution of the differential equation of motion of components using the mechanical characteristics of a turbine, generator and electrical load. The use of a set of nonlinear characteristics in the process of solving the differential equation of motion requires their representation by a continuous surface, which can be effectively implemented with the help of three-dimensional 3D graphs and approximate spline functions included in the Matlab software package.

In this article are provides an example code and a description of the main commands that enable the construction and analysis of various hydromechanical and power characteristics of units for conducting studies of the operating modes of small hydroelectric power plants. Finding the quantitative values of the curves formed at the intersection of two surfaces makes it possible to study and substantiate the laws of control of hydropower turbines, taking into account the natural features of the river flow, which could not be done so far. Ref. 14, fig. 9.

Keywords: angle of rotation, hydropower, moment, power, programming, turbine.



A. V. Moroz
A. Moroz

Відомості про автора: кандидат технічних наук за спеціальністю «Перетворення відновлюваних видів енергії», старший науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики Національної академії наук України.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Спеціальність «Нетрадиційні джерела енергії».

Наукова сфера: альтернативна енергетика, енергозбереження, перетворення поновлюваних видів енергії, мала гідроенергетика.

Публікації: 24.

ORCID : 0000-0002-9284-3624

Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

Author information: Candidate of Technical Sciences in the field of «Renewable Energy Transformation», Senior Researcher in the Institute for Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Specialty «Non-traditional sources of energy».

Research area: alternative energy, energy saving, renewable energy transformation, small hydropower.

Publications: 24.

ORCID : 0000-0002-9284-3624

Contacts: tel./fax: +38-044-206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

Перелік використаних позначень та скорочень:

ГЕС – гідроелектростанція;

ГАЕС – гідроакumuлююча електростанція;

η – ККД, коефіцієнт корисної дії;

M – крутний момент;

H – напір;

D – діаметр;

n, W – частота обертання;

F – кут повертання лопатей гідротурбіни;

P – потужність;

max – максимум;

min – мінімум;

const – константна величина;

m – метр.

Вступ. Мала гідроенергетика належить до перевіреної часом надійної технології виробництва електроенергії в усьому світі. Вона характеризується досить гарантованим відновлюваним енергоресурсом, може відповідати комплексу екологічних вимог зі збереження біологічних, геоморфологічних та гідрохімічних процесів у руслі і долині річки. Крім того, мала гідроенергетика сприяє та надає можливості вирішення інших важливих господарських задач, таких як водопостачання, ведення рибного господарства, керованого захисту прилеглих територій від повеней, переводу цих земель з категорії негарантованого землеробства в гарантоване, зокрема завдяки зрошенню [1,2].

Енергетичне обладнання малих гідроелектростанцій, а саме гідротурбіни, повинно надійно працювати в умовах тривалої експлуатації, мати високий ККД та мати змогу упродовж більшого періоду життєвого циклу підтримувати високу сталу потужність. В результаті тривалого вдосконалення конструкцій створено ряд типів гідротурбін, які найкращим чином відповідають зазначеним вимогам. Серед реактивних гідротурбін найбільше поширення для напорів до 100 м включно знайшли поворотно-лопатеві турбіни; для напорів від 50 до 600 м – радіально-осьові турбіни. Для напорів від 300 до 1700 м і вище застосовується активний тип турбін, а саме, ковшові турбіни. Кожна з цих систем відрізняється характерними елементами конструкції і профілем

проточної частини, які й визначають область її застосування.

Проте залишаються недостатньо дослідженими робочі процеси гідротурбін з урахуванням можливих природних та технічних впливів [3-7]. Також достатньо складно врахувати раптову зміну швидкості річкового потоку, наявність вихорів на виході з турбіни та ін. Використання 3D моделювання гідромеханічних та енергетичних характеристик різних типів гідротурбін надає можливості отримати інформацію щодо реальних режимів роботи гідроелектростанції під час експлуатації.

Постановка завдання. В даній роботі розглянуто можливість 3D моделювання дослідних енергетичних характеристик гідротурбін за допомогою сучасного пакету прикладних програм для вирішення технічних задач.

Визначення дослідних характеристик. Для проведення досліджень у лабораторних умовах використовується турбінний енергетичний стенд, на якому гідротурбіна запускається у заздалегідь визначених режимах та вимірюються енергетичні показники, такі як робочий напір води, витрата води, корисна потужність, обертовий момент, кут повороту лопатей та швидкість обертання.

Результати досліджень можуть бути порівняні у цифрових значеннях, але найбільш доцільніше зобразити ці значення на графіках. Зміна значень енергетичних показників гідротурбін від режиму до режиму має гладкий характер, що до-

зволяє отримати безперервні криві. Різка відхилення одного з отриманих параметрів свідчить про некоректне зняття характеристики та необхідності повторення експерименту.

Графіки, які зображують залежність одних робочих параметрів турбіни від інших називаються характеристиками гідротурбін. Існують різні способи представлення повних характеристик гідротурбін. Для виявлення загальних властивостей турбін та можливих режимів їх роботи використовують кругову характеристику М.М. Щапова [8], яка призначена для зображення характеристик турбін з незмінним положенням лопатей робочого колеса та лопаток направляючого апарату (відкриття). Така характеристика для радіально-осьової гідротурбіни зображена на рис. 1. Характеристика визначає зміну трьох параметрів, а саме ККД (η), напір (H) та момент (M), що розвивається робочим колесом. Потужність на валу гідротурбіни споживається при $M < 0$ (насосний

режим) та виробляється при $M > 0$ (турбінний режим). Весь діапазон режимів гідротурбін ГЕС з врахуванням перехідних процесів обмежується областю першого квадранту. Робочі режими ГАЕС з оборотними насос-турбінами розташовані в першому і третьому квадрантах, а перехідні процеси враховують режими в трьох квадрантах.

Основним недоліком кругових характеристик є обмеженість використання поля, тому що один режим займає цілий промінь. Більші можливості дає форма характеристики, де поле координат режиму відображається тільки однією крапкою. У цьому випадку характеристика будується за умови двох константних величин, наприклад діаметру $D = const$ та частоти обертання $n = const$ або $D = const$ та $H = const$. Такі характеристики отримали назву універсальні характеристики та широко використовуються у гідроенергетиці. Головна універсальна характеристика радіально-осьової гідротурбіни зображено на рис. 2.

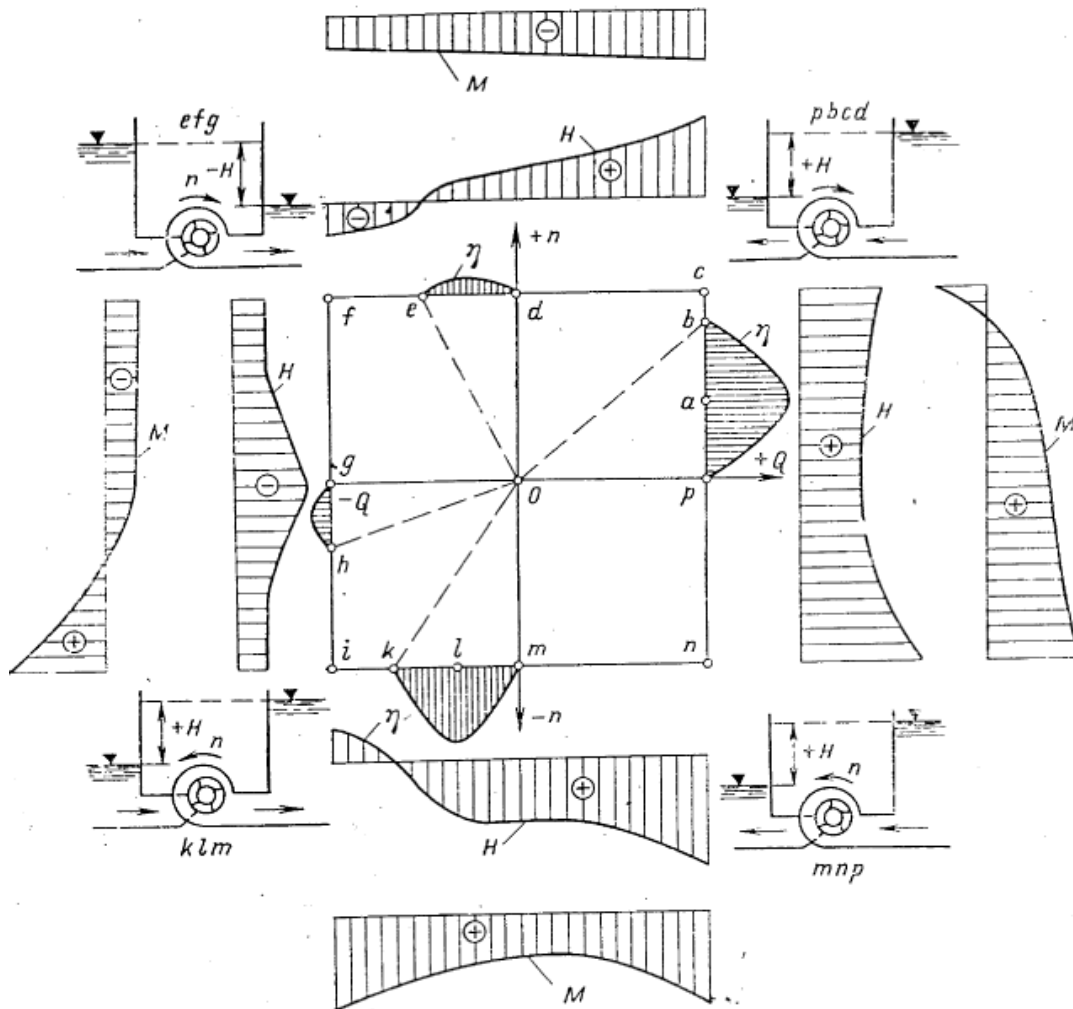


Рис. 1. Кругова характеристика реактивної гідромашини [8].

Fig. 1. Circular characteristic of jet propelled hydraulic unit [8].

Існують різні види універсальних характеристик гідромашин. Найбільше розповсюдження отримали приведені універсальні характеристики, які будуються для одиничних значень визначених величин: $D=1m$ та $H=1m$. Була відмічена ідентичність приведених характеристик для одного класу турбін, які розроблені для різних значень напорів, що дозволяє уніфікувати режими та закони регулювання частоти обертання за значними змінами напорів та витрат води [8].

При дослідженнях пускових та розгінних режимів турбін для малих гідроелектростанцій або режимів насос-турбіни для акумулювальних

гідроелектростанцій необхідно використовувати механічні характеристики, які охоплюють весь можливий діапазон змін по величині та напрямку обертання. Приклад такої характеристики приведено на рис. 3 для фіксованих значень координат положення регулюючого пристрою. Моделювання нестационарних електромеханічних процесів гідроенергетичного апарату ґрунтується на рішенні диференційного рівняння руху складових агрегату з використанням механічних характеристик турбіни, генератора і електричного навантаження [9].

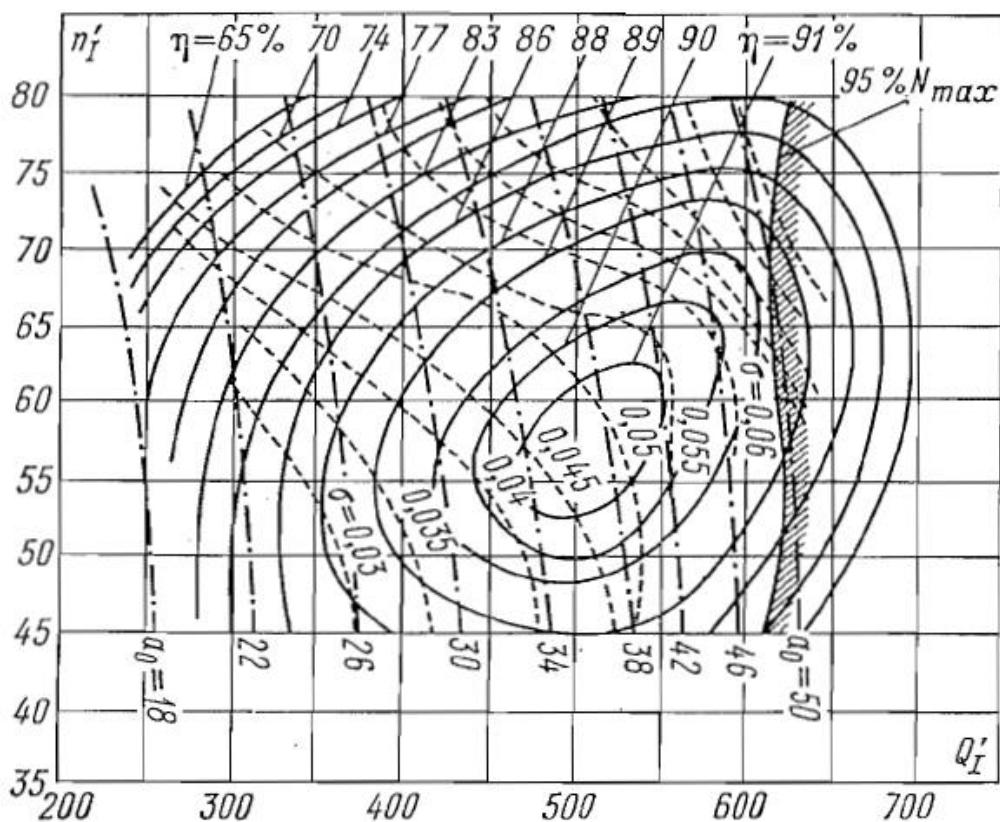


Рис. 2. Головна універсальна характеристика радіально-осьової гідротурбіни ($D=const, H=const$) [10].

Fig. 2. Main universal characteristic of radial-axial hydraulic turbine ($D=const, H=const$) [10].

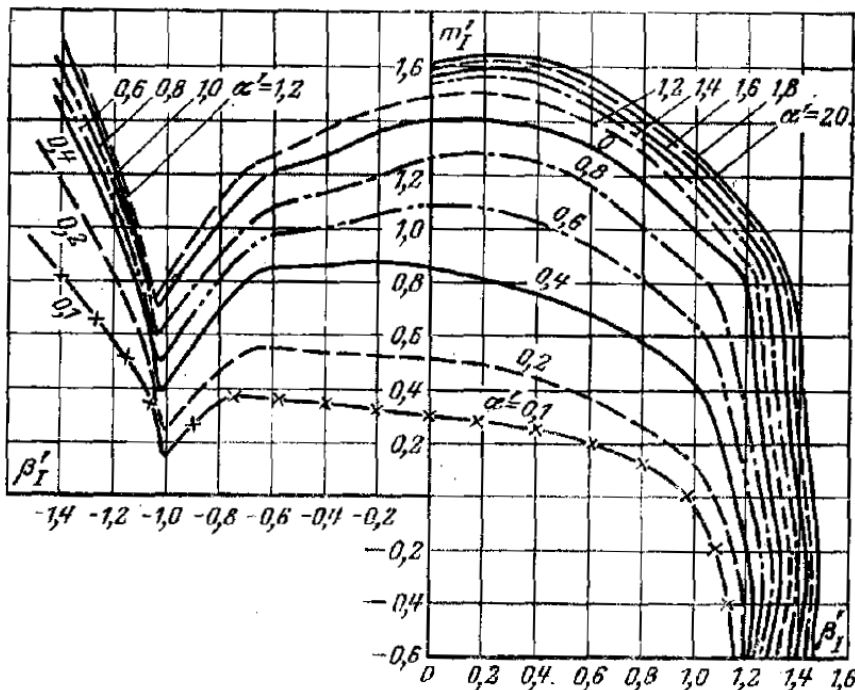


Рис. 3. Гідромеханічна характеристика турбіни у повному діапазоні змін частоти обертання.

Fig. 3. Hydromechanical characteristic of the turbine in the full range of rotational speed changes.

Використання сукупності нелінійних характеристик у процесі вирішення диференційного рівняння руху вимагає їх уявлення безперервною поверхнею, яка може бути ефективно реалізовано за допомогою тривимірних 3D графіків та апроксимуючих сплайн-функцій. Для цього може бути використано пакет прикладних програм для чис-

лового аналізу Matlab розробника MathWorks. Ця система використовує мову програмування для роботи з математичними матрицями, малювання функцій та роботи з алгоритмами [11]. Для подальших досліджень було використано Версію Matlab 7.5.0.342 (R2007b) (рис. 4).

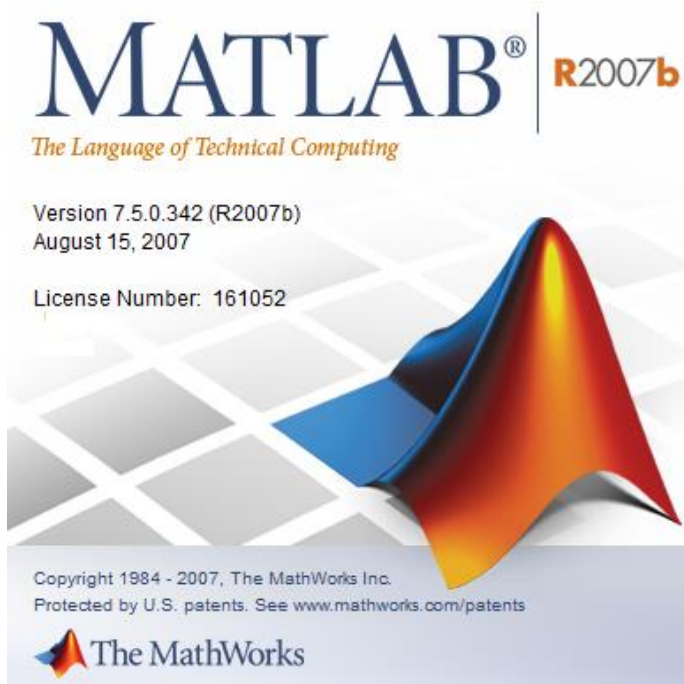


Рис. 4. Скрінсейвер Matlab R2007b.

Fig. 4. Screensaver Matlab R2007b.

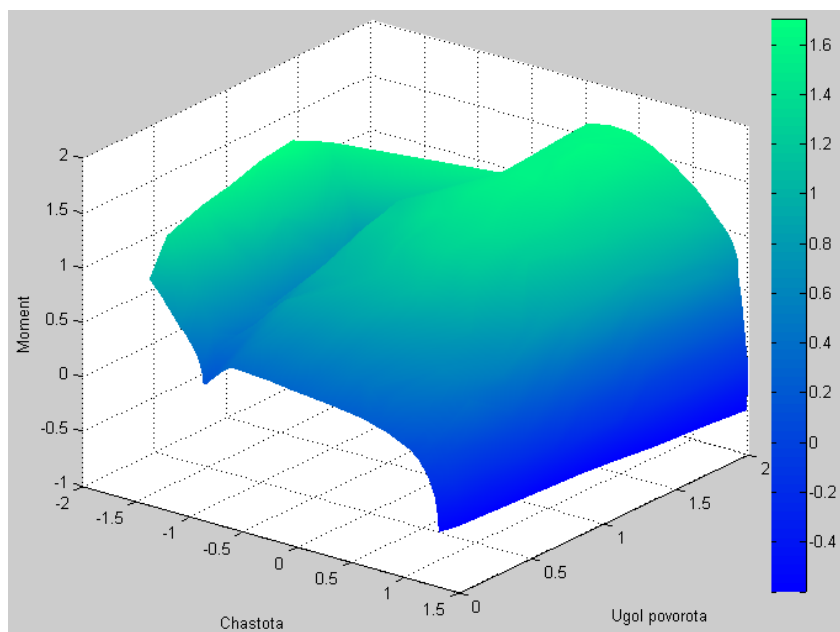
Першочергово необхідно сформувати код для визначення значень енергетичних змінних (рис. 5), які характеризують роботу гідротурбіни. Змінні характеристики можуть бути задані як функції з невідомими, у векторному або матричному вигляді. Необхідно звернути увагу, що всі вектори та матриці в програмі повинні мати одну розмірність.

За допомогою команди *surf()* отримуємо тривимірний графік, подібний до графіку на рис. 3, залежності крутних моментів M від частоти обертання W та кутів повертання лопатей гідротурбіни F (рис. 6). Система Matlab дає змогу обертати, змінювати розмір та колір графіку.

```
w1=[1.17E+00 1.15E+00 1.13E+00 1.10E+00 1.06E+00 1.00E+00 9.91E-01
8.97E-01 8.00E-01 7.02E-01 6.00E-01 4.90E-01 4.00E-01 2.00E-01 0.00E+00 -
2.00E-01 -4.00E-01 -6.00E-01 -7.29E-01 -7.69E-01 -8.00E-01 -8.34E-01 -9.47E-
01 -1.00E+00 -1.02E+00 -1.02E+00 -1.05E+00 -1.08E+00 -1.20E+00 -1.23E+00
-1.38E+00 -1.40E+00 -1.52E+00 -1.52E+00 -1.52E+00 -1.52E+00 -1.52E+00 -
1.52E+00 -1.52E+00 -1.52E+00];
m1=[-6.00E-01 -4.00E-01 -2.91E-01 -2.00E-01 -1.08E-01 -2.06E-02 0.00E+00
8.22E-02 1.25E-01 1.72E-01 2.00E-01 2.35E-01 2.50E-01 2.77E-01 2.99E-01
3.18E-01 3.45E-01 3.59E-01 3.67E-01 3.62E-01 3.42E-01 3.14E-01 2.00E-01
1.42E-01 1.58E-01 2.00E-01 3.13E-01 4.00E-01 5.79E-01 6.00E-01 8.00E-01
8.32E-01 9.67E-01 9.67E-01 9.67E-01 9.67E-01 9.67E-01 9.67E-01 9.67E-01
9.67E-01];
f1(1, 1:40)=0.1;
p1=m1.*w1;
....
w11=[1.48E+00 1.48E+00 1.49E+00 1.49E+00 1.48E+00 1.47E+00 1.45E+00
1.44E+00 1.43E+00 1.40E+00 1.40E+00 1.38E+00 1.34E+00 1.28E+00
1.20E+00 1.10E+00 1.01E+00 8.66E-01 8.00E-01 6.00E-01 5.08E-01 4.00E-01
2.76E-01 2.00E-01 1.01E-01 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00];
```

Рис. 5. Код з програми Matlab.

Fig. 5. Matlab code.

Рис. 6. Зображення залежності $M(W, F)$, яке отримано за допомогою команди *surf*.Fig. 6. Image of the dependence $M(W, F)$ which is obtained by using the *surf* command.

Важливо для проведення досліджень гідротурбіни є знаходження максимальних (*max*) та мінімальних (*min*) значень однієї характеристики та відповідних значень інших пов'язаних з нею характеристик. За допомогою коду програми,

знайдено та зображено на рис. 6 максимальні значення потужності гідротурбіни P для кожного кута обертання F та відповідні W , де для зображення 3-вимірному графіку використовується команда *surf*, а для виводу кривої максимальних значень використовується команда *plot3*.

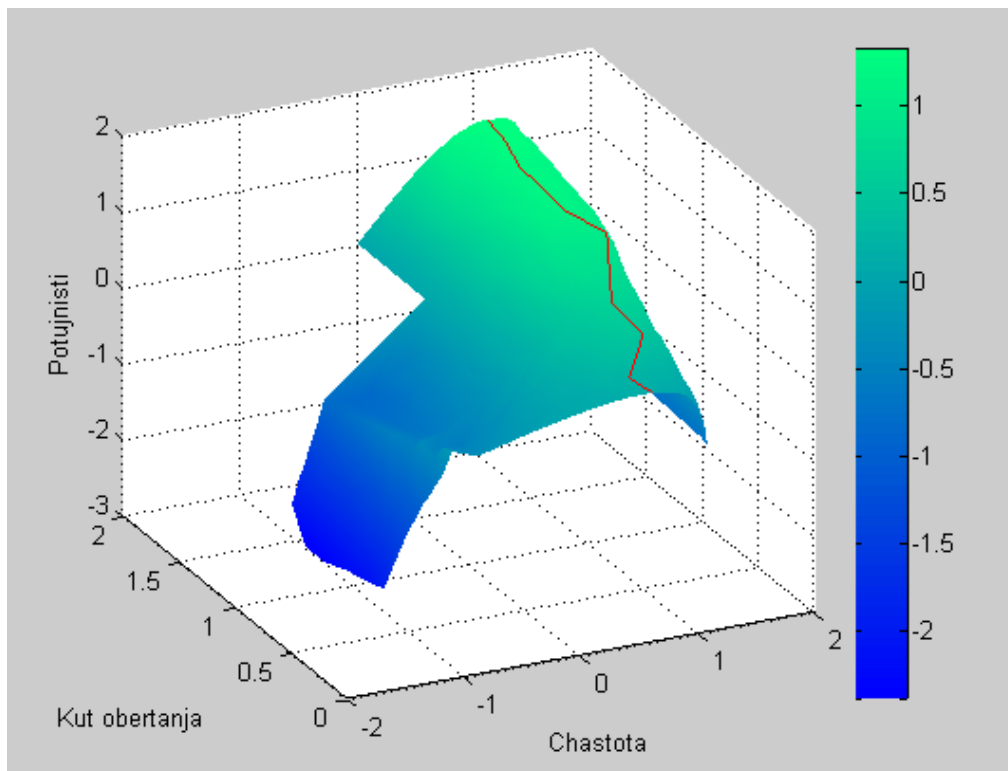


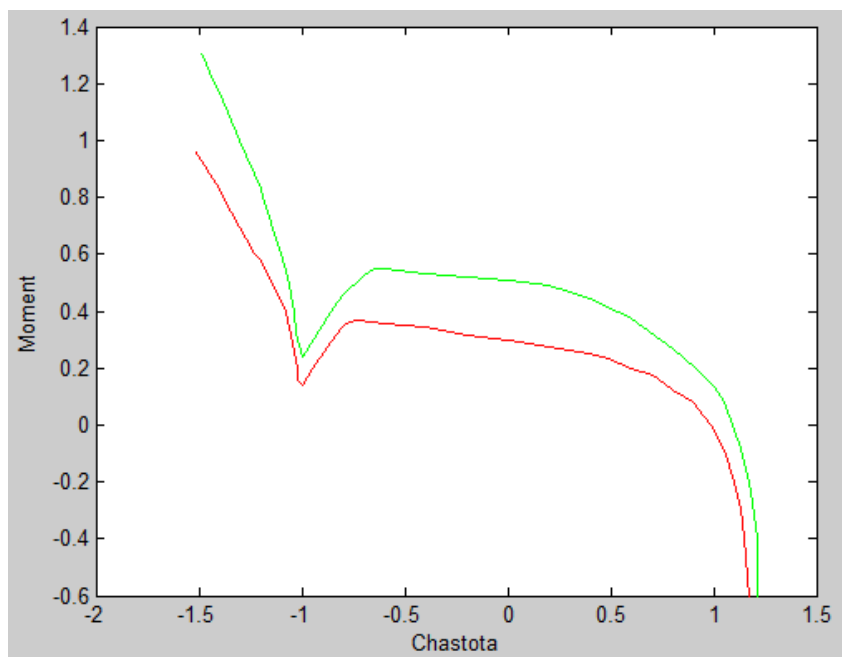
Рис. 7. Зображення залежності $P(W, F)$ та максимуму за значеннями P .

Fig. 7. Image of the dependence $P(W, F)$ and the maximum by P values.

Це дає змогу дослідити режими роботи та отримати максимальні, мінімальні і проміжні енергетичні характеристики, які відповідають вибраному режиму, гідроелектростанцій та турбін для врахування природних особливостей річного потоку води. Також можливо зробити проєкцію на будь яку вісь (рис. 7).

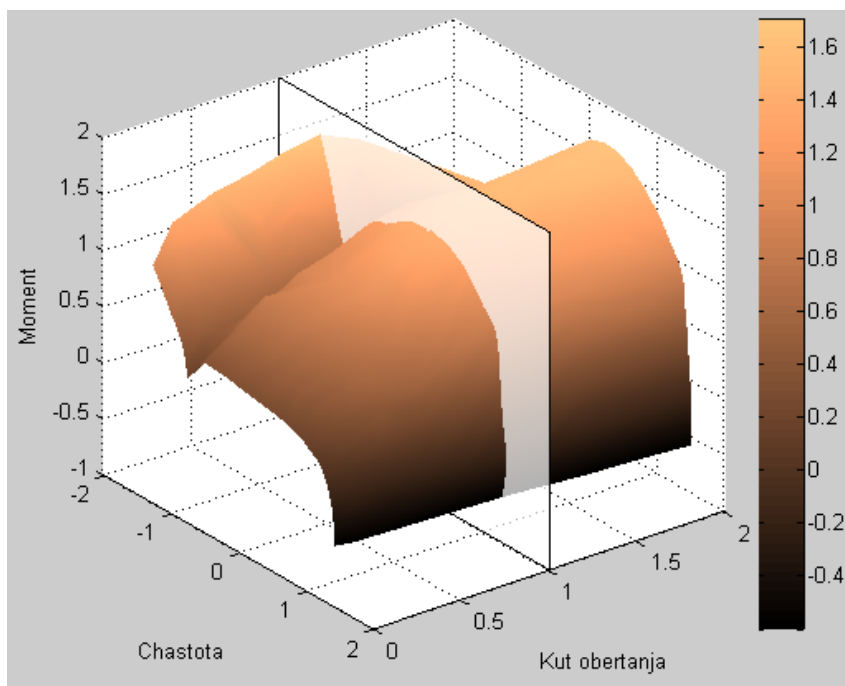
Як було зазначено вище, для дослідження роботи гідротурбін не завжди можливо використовувати експериментальний стенд та автоматично фіксувати енергетичні показники. Інформація щодо цифрових показників відсутня у спеціалізованих довідниках. При знятті значень енергетичних показників з графічних зображень універ-

сальних характеристик накопичуються механічні, розрахункові та типографічні похибки, що зміщують координати з режимної кривої. В даному випадку можуть бути застосовані згладжувальні сплайн-функції, які дозволяють конструювати та оптимізувати складні поверхні зі збереженням геометричних властивостей. Визначення, особливості використання та методи сплайн-функцій докладно наведено у [12,13,14]. У Matlab за зображення кубічної сплайн-функцій відповідає команда *spline*. Більше можливостей для використання сплайн-функцій надає використання спеціалізованого пакету *Spline Toolbox*.

Рис. 8. Зображення залежності $M(W)$.Fig. 8. Image of the dependence $M(W)$.

На основі знайдених енергетичних характеристик для досліджуваного режиму роботи гідроенергетичного апарату, можемо побудувати поверхню, яка перетинає об'ємний графік (рис. 8).

За допомогою апроксимації отримуємо значення, які знаходяться на перетині цих поверхонь і зображуємо графік-проекцію на окремому моніторі (рис. 9).

Рис. 9. Зображення залежності $M(W, F)$ та поверхні, яка визначається $F=1$ за всіма значеннями M .Fig. 9. Image of the dependence $M(W, F)$ and the surface defined by $F=1$ for all values of M .

Перетин двох поверхонь, наприклад зображення турбінного та насосного режимів, дає змогу дослідити різні закони управління енергетич-

них апаратів, отримати граничні режими роботи, що досі було важко виконувати.

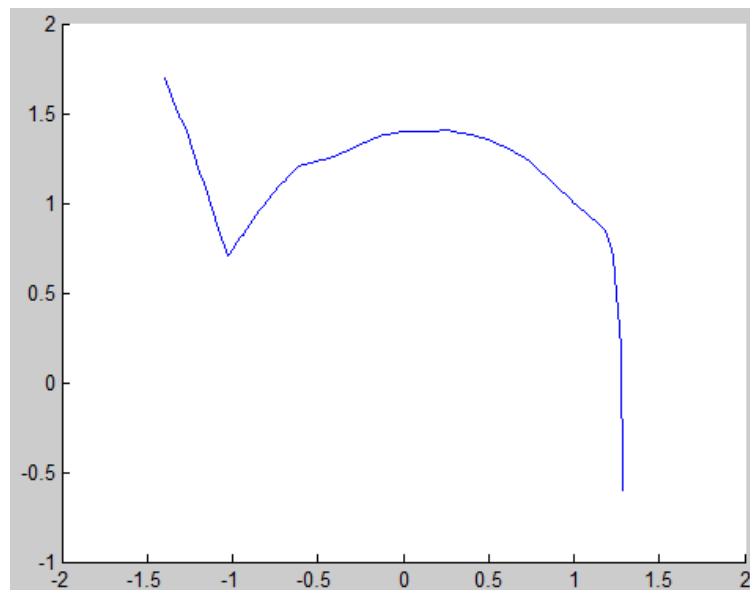


Рис. 10. Зображення графіку $M(W)$, якій отримано за допомогою математичної апроксимації.

Fig. 10. Image of the graph $M(W)$ which is obtained by mathematical approximation.

Висновок. Пакет прикладних програм для числового аналізу Matlab дає змогу будувати та аналізувати різні гідромеханічні та енергетичні характеристики апаратів для проведення досліджень робочих режимів малих гідроелектростанцій. Знаходження кількісних значень кривих, які утворюються на перетині двох поверхонь, дає змогу дослідити та обґрунтувати закони управління гідроенергетичними турбінами з урахуванням природних особливостей річкового потоку, що було неможливо здійснити досі.

1. Васько П.Ф. Сучасний стан, потенційні можливості та передумови подальшого розвитку малої гідроенергетики в Україні. Відновлювана енергетика. 2006. № 1. С. 60-65.
2. Васько П.Ф., Мороз А.В., Бриль А.О., Ібрагімова М.Р. Екологічні аспекти розвитку гідроенергетики в Україні. Відновлювана енергетика. 2018. № 2. С. 57-69.
3. Васько П.Ф., Мороз А.В. Законодательные стимулы и природоохранные ограничения использования гидроэнергетических ресурсов малых рек Украины. Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 15. С. 82-92.
4. Васько П.Ф., Ибрагимова М.Р. Энергетическая эффективность малой гидроэлектростанции при экологических ограничениях на использование стока воды реки для производства электроэнергии. Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 04-06(216-218). С. 103-115. ISSN 1608-8298.
5. Васько П.Ф., Мороз А.В. Потенціал використання гідроенергетичних ресурсів основних малих річок України. Відновлювана енергетика. 2016. № 3. С. 50-56.
6. Васько П.Ф., Васько В.П., Ібрагімова М.Р. Мала гідроенергетика в структурі електроенергетичної галузі України. Відновлювана енергетика. 2015. № 3. С. 53-61.
7. Бриль А.О., Васько П.Ф., Мороз А.В. Экспресс оценка гидроэнергетического потенциала малых рек Украи-

ны с учётом природоохранных ограничений. Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 25-27(273-275). С. 86-95.

8. Кривченко Г.И., Аршеневський Н.Н., Квятковская Е.В., Клабуков В.М. Гидромеханические переходные процессы в гидроэнергетических установках. М. Изд. Энергия. 1975. 367 с.
9. Брыль А.О., Васько В.П., Васько П.Ф., Соловійов П.Б. Математическое моделирование нестационарных электромеханических процессов гидроэлектрических агрегатов малых ГЭС с различными типами генераторов при параллельном работе с электросистемой. Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 3. С. 143-150.
10. Щавелева Д.С. Гидроэнергетические установки. Л. Изд. Энергоиздат. 1981. 520 с.
11. Інформація щодо MATLAB. 2018. [Електронний ресурс]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (дата звернення: 10.10.2019).
12. Квасов Б.И. Методы изогометрической аппроксимации сплайнами. М. Изд. Физматлит. 2006. 360 с.
13. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. М. Изд. Наука. 1980. 352 с.
14. Квасов Б.И. Численные методы анализа и линейной алгебры. Новосибирск. 2012. 262 с.

REFERENCES

1. Vasko, P.F. Suchasnyi stan, potentsiini mozhlyvosti ta peredumovy podalshoho rozvytku maloї hidroenerhetyky v Ukraini. [Current state, potential opportunities and prerequisites for the further development of small hydropower in Ukraine]. Vidnovlyvana energetika. 2006. No. 1. Pp. 60-65. [in Ukrainian].
2. Bryl A.A., Vasko P.F., Moroz A.V., Ibragimova M.R. Ekolohichni aspekty rozvytku hidroenerhetyky v Ukrayini. [Ekolohichni aspekty rozvytku hidroenerhetyky v Ukrayini]. Vidnovlyvana energetika. 2018. No. 2. Pp. 57-69. [in Ukrainian].
3. Vasko P.F., Moroz A.V. Zakonodatelnye stimuly i prirodookhrannyye ogranicheniya ispolzovaniya gidroenergeticheskikh resursov malykh rek Ukrainy. [Legislative Incentives and Environmental Restrictions on the Use of

Hydropower Resources of Small Rivers of Ukraine]. Alternative energy and ecology. 2014. No. 15. Pp. 82-92. [in Russian].

4. Vasko P.F., Ibragimova M.R. Energeticheskaya effektivnost maloy gidroelektrostantsii pri ekologicheskikh ogranicheniyakh na ispolzovanie stoka vody reki dlya proizvodstva elektroenergii. [Energy efficiency of small hydropower plant through environmental restrictions on water use for power generation]. Alternative energy and ecology. 2017. No. 04-06(216-218). Pp. 103-115. ISSN 1608-8298. [in Russian].

5. Vasko P.F., Moroz A.V. Potensial vykorystannya hidroenerhetychnykh resursiv osnovnykh malykh richok Ukrainy. [The potential use of hydropower resources of main small rivers Ukraine]. Vidnovluvana energetika. 2016. No. 3. Pp. 50-56. [in Ukrainian].

6. Vasko P.F., Vasko V.P., Ibragimova M.R. Mala hidroenerhetyka v strukturi elektroenerhetychnoy haluzi Ukrainy. [Small hydropower in the structure of the electric power industry of Ukraine]. Vidnovluvana energetika. 2015. No. 3. Pp. 53-61. [in Ukrainian].

7. Bryl A.A., Vasko P.F., Moroz A.V. Ekspres otsenka gidroenergeticheskogo potentsiala malykh rek Ukrainy s uchotom prirodookhrannykh ogranicheniy. [Express assessment of hydropower potential of the small rivers in Ukraine with account of environmental restrictions]. Alternative energy and ecology. 2018. No. 25-27(273-275). Pp. 86-95. [in Russian].

8. Krivchenko G.I., Arshenevsky N.N., Kvyatkovskaya E.V., Klabukov V.M. Gidromekhanicheskiye perekhodnyye protsessy v gidroenergeticheskikh ustanovkakh. [Hydromechanical transients in hydropower plants]. M. Energiya. 1975. 367 p. [in Russian].

9. Bryl A.A., Vasko V.P., Vasko P.F., Soloviev P.B. Matematicheskoye modelirovaniye puskovykh rezhimov sinkhronnykh i asinkhronnykh generatorov malykh GES. [Mathematical modeling of starting modes of synchronous and asynchronous generators of small hydro power plants]. Alternative Energy and Ecology. 2013. № 3. Pp. 143-150. [in Russian].

10. Shchaveleva D.S. Gidroenergeticheskiye ustanovki. [Hydropower installations]. L. Izd. Energoizdat. 1981. 520 p. [in Russian].

11. Informatsiia shchodo MATLAB. [Information about MATLAB]. [Electronic resource]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (Applying date: 10.10.2019). [in Ukrainian].

12. Kvasov B.I. Metody izogeometricheskoy approksimatsii splaynami. [Methods of isometric approximation by splines]. M. Fizmatlit publishing. 2006. 360 p. [in Russian].

13. Zavyalov Y.S., Kvasov B.I., Miroshnicenko V.L. Metody splayn-funktsiy. [Methods of spline functions]. M. Science publishing. 1980. 352 p. [in Russian].

14. Kvasov B.I. Chislennyye metody analiza i lineynoy algebrы. [Numerical methods of analysis and linear algebra]. Novosibirsk. 2012. 262 p. [in Russian].

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛЫХ ГИДРО-ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.В. Мороз, канд. техн. наук

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094, ул. Гната Хоткевича, 20А, г. Киев, Украина.

Энергетическое оборудование малых гидроэлектростанций, а именно гидротурбины, должны надежно работать в условиях длительной эксплуатации, иметь высокий КПД и иметь возможность в течение большего периода жизненного цикла поддерживать высокую постоянную мощность. В результате длительного совершенствования конструкций созданы ряд типов гидротурбин, которые наилучшим образом соответствуют указанным требованиям. Однако остаются недостаточно исследованными рабочие процессы гидротурбин с учетом возможных природных и технических воздействий. Также достаточно сложно учесть внезапное изменение скорости речного потока, наличие выхрей на выходе из турбины и др.

В этой работе исследованы возможности применения современного программного обеспечения для моделирования рабочих режимов и энергетических характеристик малых гидроэлектростанций с использованием экспериментальных и справочных данных.

Существуют различные виды характеристик гидромашин, которые получены при проведении исследований в лабораторных условиях и отражаются в графическом виде зависимость одних рабочих параметров от других. Наибольшее распространение в гидроэнергетике получили приведены универсальные характеристики, которые строятся для единичных значений определенных величин: $D=1\text{ м}$ и $H=1\text{ м}$. Моделирование нестационарных электромеханических процессов гидроэнергетического агрегата основывается на решении дифференциального уравнения движения составных частей с использованием механических характеристик турбины, генератора и электрической нагрузки. Использование совокупности нелинейных характеристик в процессе решения дифференциального уравнения движения требует их представления непрерывной поверхностью, которая может быть эффективно реализована с помощью трехмерных 3D графиков и аппроксимирующих сплайн-функций входящих в пакет прикладных программ для численного анализа Matlab.

В статье приведен пример кода и описание главных команд, которые позволяют строить и анализировать различные гидромеханические и энергетические характеристики агрегатов для проведения исследований рабочих режимов малых гидроэлектростанций. Нахождение количественных значений кривых, образующиеся на пересечении двух поверхностей, позволяет исследовать и обосновать законы управления гидроэнергетическими турбинами с учетом природных особенностей речного потока, что было невозможно осуществить до сих пор. Библ. 14, рис. 9.

Ключові слова: гидроэнергетика, момент, мощность, программирование, турбина, угол вращения.

Стаття надійшла до редакції 11.11.19

Остаточна версія 03.06.20