

## РЕФЕРАТ

### «СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕКОНОМІЧНИХ ГІДРОАГРЕГАТИВ ДЛЯ ГЕС УКРАЇНИ»

1. **ОСАДЧИЙ Сергій Дмитрович** – голова правління ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ».
2. **РАССОВСЬКИЙ Вадим Леонідович** – головний інженер ПрАТ «Укргідроенерго».
3. **БУРАКОВ Олександр Сергійович** – заступник генерального конструктора АТ «Турбоатом».
4. **ЄФИМЕНКО Віктор Миколайович** – перший заступник головного конструктора гідротурбін АТ «Турбоатом».
5. **КОРШУНОВ Олексій Олегович** – заступник генерального директора АТ «Турбоатом».
6. **КОБЗАР Ігор Володимирович** – завідувач науково-дослідного і проектно конструкторського відділення турбо- і гідрогенераторів ДП «Завод «Електроважмаш».
7. **КОВАЛЬОВ Юрій Миколайович** – голова правління ТОВ «Дніпро-Спецгідроенергомонтаж».
8. **ХОРЕВ Олег Миколайович** – к.т.н., старший науковий співробітник ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ ім. А.М. ПІДГОРНОГО НАН України.

**Метою представленої роботи** є збільшення потенціалу ГЕС України за рахунок реабілітації існуючого гідро- та електроустаткування з встановленням нових високоекономічних гідроагрегатів.

**Об'єктом дослідження** є реконструкція гідроелектростанцій Дніпровського каскаду, які входять до другої черги реконструкції ГЕС Укргідроенерго.

**Предмет дослідження** – методи та засоби створення високоекономічних гідроагрегатів ГЕС Дніпровського каскаду для підвищення ефективності Об'єднаної енергетичної системи України (ОЕСУ), які мають техніко-економічні показники на рівні кращих вітчизняних і світових зразків.

**Методи дослідження.** Застосовано метод просторового профілювання лопатей робочих коліс осьових гідротурбін, заснований на застосуванні осьових, окружних і комбінованих навалів, який дозволив поліпшити енергетичні характеристики проточної частини осьової гідротурбіни. Вперше на основі математичного моделювання нестисливої в'язкої течії встановлено закономірності впливу окружних і осьових навалів лопатей робочих коліс осьової гідротурбіни на структуру потоку та енергетичні показники. Ці закономірності використовуються при проектуванні нових та модернізації існуючих проточних частин гідротурбін, зокрема Кременчуцької ГЕС. Достовірність теоретичних положень підтверджена лабораторними і натурними експериментальними дослідженнями, а також результатами експлуатації.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному.

1. На основі подальшого розвитку математичних моделей, алгоритмів і чисельних методів моделювання просторової в'язкої нестисливої течії рідини удосконалено програмний комплекс *IPMFlow* (розробка ІПМаш), що вперше в Україні дозволило достовірно моделювати робочий процес в проточних частинах гідромашин різного типу.

2. Вперше запропоновано і реалізовано підхід до просторового профілювання лопатей робочих коліс осьових гідротурбін, заснований на застосуванні складних навалів в осьовому й окружному напрямках, який дозволяє покращити енергетичні характеристики проточної частини осьових поворотно-лопатевого гідротурбін.

3. Вперше встановлено закономірності впливу окружних і осьових навалів лопатей робочих коліс осьової гідротурбіни на структуру потоку та інтегральні енергетичні показники, що використовуватимуться при проектуванні та модернізації проточних частин.

***Практичне значення*** одержаних результатів:

Під час роботи реконструйованих ГЕС в енергосистемі складається оптимальна структура потужності та забезпечуються раціональні режими роботи АЕС і ТЕС, регулюються та підтримуються на належному рівні частота та напруга в ОЕС України, а також з'являється швидкодіючий аварійний резерв потужності.

Введення в експлуатацію модернізованих високоекономічних гідроагрегатів дозволить зробити суттєвий внесок в поліпшення існуючої в ОЕС України ситуації, коли багато електростанцій застаріли та створюють проблеми під час експлуатації, мають низьку надійність та здатність виконувати функції маневрування. Враховуючи перспективи розвитку ОЕС України передбачається, що гідроагрегати ГЕС будуть виконувати такі функції в енергосистемі:

- покривати пікову частину графіку навантажень;
- регулювати потужність, навантаження та міжсистемні перетоки;
- виробляти та споживати реактивну потужність, регулювати напругу в мережі.

В обсязі другої черги реконструкції ГЕС Дніпровського каскаду за період від 2008 по 2020 рр. виконано модернізацію 45 гідроагрегатів з підвищенням їх сумарної потужності на 214,8 МВт.

Наукові результати роботи відображено в 1 монографії, понад 71 статті (з них 5 в англомовних журналах). Індекс їх цитування з 2008 року – 65, h-індекс – 5. Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 5 авторськими свідоцтвами та 11 патентами. За даною тематикою захищено 3 кандидатських дисертації.

### **Основний зміст роботи**

Найбільша частина гідроенергетики України представлена каскадом ГЕС на р. Дніпро, котрий включає в себе шість ГЕС і одну ГАЕС. У той же час слід зазначити, що гідроенергетичний потенціал Дніпра переважно вичерпаний. Окрім того, інтенсивна експлуатація Дніпровських ГЕС протягом десятків років має свої наслідки. Фізично та морально застаріле обладнання має низький (у порівнянні із сучасним) коефіцієнт корисної дії (ККД), не забезпечує підтримку необхідних параметрів регулювання, здійснює значний вплив на довкілля. Відтак збільшення потенціалу Дніпровського каскаду ГЕС можливе і необхідне за рахунок переважно реабілітації існуючого гідро- та електроустаткування з встановленням нових високоекономічних гідроагрегатів.

Всього на ГЕС Дніпровського каскаду встановлено та експлуатується 93 агрегати з яких 90 гідротурбін виробництва АТ «Турбоатом»: 15 - турбін з робочими колесами типу Френсіс, вісім турбін з пропелерними робочими колесами, а решта 70 - з маслonaповненими під тиском 2,5...4,0 МПа робочими колесами типу Каплан великих габаритів (діаметр робочих коліс 6,0...9,3 м). Середній вік енергетичної інфраструктури в даний момент перевищує 50 років. Другою чергою реконструкції ГЕС Укргідроенерго передбачалась реконструкція 67 агрегатів Дніпровського каскаду. В таблиці 1 представлені енергетичні показники каскаду ГЕС після другої черги реконструкції по проекту, та виконані на кінець 2020 р. - період часу, коли при реконструкції гідроагрегатів приймалися рішення, наданні в цій роботі, які забезпечили створення високоефективних гідроагрегатів.

Таблиця 1 – енергетичні показники ГЕС Дніпровського каскаду.

ГЕС і ГАЕС	Кількість гідроагрегатів, шт.				Встановлена потужність ГЕС і ГАЕС, МВт			
	Всього на ГЕС і ГАЕС	Реконструйованих по проекту I черги та в перехідний період	Підлягають реконструкції по проекту II черги	Реконструйованих по проекту II черги на кінець 2020 р.	До II черги реконструкції	Після завершення II черги реконструкції	Збільшення по проекту II черги	Збільшення по проекту II черги на кінець 2020 р.
Київська ГЕС	20	12	8	8	412	440	28	28
Канівська ГЕС	24	1	23	15	447,5	528	80,5	52,5
Кременчуцька ГЕС	12	-	12	5	625	682,8	57,8	24,1
Середньодніпровська ГЕС	8	2	6	4	364	400	36	24
Дніпровська ГЕС-1	9	6	3	-	627	648	21	-
Дніпровська ГЕС-2	8	-	8	6	876,6	960	83,4	52,4
Каховська ГЕС	6	2	4	4	311,6	334,8	23,2	23,2
Київська ГАЕС	6*	-	3	3	235,5	251,4	15,9	10,6
Всього	93	23	67	45	3899,2	4245	345,8	214,8

\*три оборотних агрегати Київської ГАЕС не підлягають реконструкції.

Для вирішення завдань проектування нових та модернізованих гідротурбін в рамках національної енергетичної програми АТ «Турбоатом» виконує дослідні роботи з Інститутом проблем машинобудування ім. А.Н. Підгорного НАН України.

На основі розвитку математичних моделей просторової в'язкої нестисливої течії рідини, алгоритмів і чисельних методів удосконалено комплекс програм *IPMFlow*, що **вперше** в Україні дозволяє з високою кількісною і якісною достовірністю проводити дослідження робочого процесу в проточних частинах гідравлічних машин різного типу.

Проведено дослідження робочого процесу в проточній частині вертикальної поворотно-лопатевої осьової гідротурбіни ПЛ20/3271 Кременчуцької ГЕС. Отримано детальну інформацію щодо структури потоку у всіх елементах проточної частини в широкому діапазоні режимів роботи: поля швидкості і тиску, епюри розподілу швидкості і тиску на лопатках напрямного апарату і лопатях робочого колеса, розподіл компонент швидкості в характерних перетинах проточної частини, значення гідравлічних втрат та ін.

Запропоновано **новий** підхід до просторового профілювання лопатей робочих коліс осьових гідротурбін, заснований на застосуванні складних навалів в осьовому й окружному напрямках, який дозволяє підвищити



ефективність проточної частини. На основі цього розроблено нове робоче колесо високоефективної низьконапірної осьової гідротурбіни ПЛ20/3271М з покращеними енергетичними показниками для модернізації Кременчуцької та інших ГЕС.



Рисунок 1 – Комп'ютерна модель проточної частини гідротурбіни:  
а) спіральна камера і статор; б) направляючий апарат і робоче колесо; в) відсмоктуюча труба з баком

АТ «Турбоатом» виконало роботи з вдосконалення нормативної бази для оцінки ресурсу кришок гідротурбін, що є одним з її найбільш металомістких вузлів. У зв'язку з цим виконана науково-дослідна робота "Розробка методики і пакета прикладних програм розрахунку напружено-деформованого стану та власних частот і форм коливань кришок гідротурбін", що дозволило провести детальний аналіз при вирішенні питання про обсяг модернізації ряду ГЕС України (Дніпровської, Каховської, Кременчуцької, Середньодніпровської та ін.).



Рисунок 2. Розподіл інтенсивності напружень у кришці турбіни

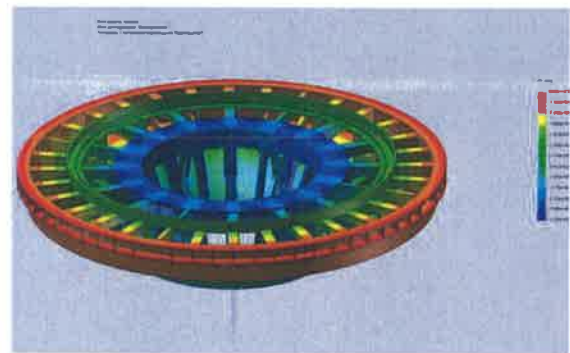


Рисунок 3. Розподіл переміщень кришки турбіни вздовж осі обертання робочого колеса

Для реалізації проектів реконструкції ГЕС в АТ «Турбоатом» були проведені комплексні розрахунково-експериментальні роботи з розробки проточних частин з умовою збереження спіральних камер, статорів і відсмоктувальних труб діючих гідротурбін для всіх ГЕС Каскаду. У цій роботі

на прикладі створення модернізованих гідротурбін Кременчуцької ГЕС розглянуто комплексний підхід до розв'язання задач по удосконаленню і створенню високоефективних поворотно-лопатевих гідротурбін для всього Дніпровського каскаду.

АТ «Турбоатом» підтверджує можливість підключення поставлених гідротурбін до системи автоматичного регулювання частоти та потужності, при цьому рекомендує:

1. Для агрегатів, що вже підключені до системи, забезпечити постійний моніторинг вібраційного і теплового стану агрегатів, перевірку неруйнівними методами контролю лопатей, лопаток, відповідального кріплення, експлуатувати обладнання згідно з виданими підприємством характеристиками.

2. Для агрегатів, що не пройшли реконструкцію, спільно з диспетчерською службою системи визначити реальну кількість перехідних процесів з урахуванням індивідуального стану обладнання кожного агрегату, виконати вібраційні і пульсації випробування та за результатами підготувати Технічні завдання на їх реконструкцію.

3. Для гідротурбін, за якими виконується підготовка Гендерних вимог на модернізацію, встановлювати сумарну кількість перехідних процесів виходячи з реальних потреб енергосистеми та закладати їх в Технічні вимоги.

Ці вимоги будуть враховані та реалізовані АТ «Турбоатом» під час виконання проєкту за рахунок збільшення обсягів реконструкції - обов'язкова заміна камер робочих коліс для ПЛ турбін (або облицювань конусів для РО турбін), робочих коліс, валів турбін, лопаток і кінематики напрямного апарата, верхніх кілець і кришок турбін, маслоприймачів для ПЛ турбін, посилення конструкції нових вузлів, і застосування матеріалів з більш високими механічними властивостями.

Реконструкція ГЕС також передбачає заміну окремих вузлів гідрогенераторів: заміну обмотки статора; перешихтовку сердечника статора; заміну під'ятників; заміну ізоляції котушок полюсів ротора; заміну осердя і

ізоляції полюсів ротора; заміну приладів теплоконтролю; встановлення датчиків часткового розряду в обмотці статора, та інше.

Модернізацією передбачається досягти підвищення потужності гідрогенераторів. На Київській і Канівській ГЕС виконано збільшення генераторної напруги з 3,15 кВ до 6,3 кВ. Реконструкція гідрогенераторів передбачається з заміною систем збудження на нові тиристорні (статичні).

В пропозиції ДП «Завод «Електроважмаш» щодо реконструкції гідрогенератора для Кременчуцької ГЕС був запропонований рівень середньозваженого ККД 97,758 %, після чого цей рівень ККД було підтверджено відповідними розрахунково-пояснювальними записками, підготованими на етапі розробки проектної документації. Підвищення рівня ККД передусім було забезпечене за рахунок наступних заходів:

- зниження втрат на збудження завдяки зменшенню струму збудження, внаслідок зменшення лінійного навантаження гідрогенератора за рахунок суттєвого збільшення кількості пазів статора (з 684 до 792), внаслідок зменшення магнітних індукцій в осерді статора за рахунок збільшення зовнішнього діаметра осердя та внаслідок зменшення повітряного зазору гідрогенератора до рівня, що забезпечує оптимальне значення відношення короткого замикання, але дозволяє зберігати безпечний проміжок між нерухомими та обертовими частинами в будь-яких режимах роботи гідрогенератора;

- зниження втрат в осерді статора завдяки зменшенню магнітних індукцій за рахунок збільшення зовнішнього діаметру осердя;

- зниження втрат в підп'ятнику завдяки використанню однорядного підп'ятника замість дворядного.

Економічна ефективність реконструкції визначена в рамках розробки проекту «ГЕС Укргідроенерго. Реконструкція. II черга » 2006 р. У 2013 році було виконано коригування проекту з уточненням обсягів реконструкції і визначенням, у поточному періоді, вартості проекту. Питання ефективності при коригуванні проекту не порушувалися у зв'язку з актуальністю переходу на новий рівень оплати електроенергії при переході на ринкові відносини. При



цьому розумілося, що ефективність ГЕС з їх подальшою можливістю брати участь у більш дорогих послугах регулювання частоти і потужність в енергосистемі значно підвищується.

Розрахунки економічної ефективності другої черги реконструкції ГЕС Укргідроенерго основані на порівнянні витрат у варіанті реконструкції з витратами на подальшу експлуатацію ГЕС без проведення реконструкції. В розрахунки закладені потужність, виробіток і експлуатаційні витрати, які відносяться до агрегатів, що підлягають реконструкції, ГЕС Дніпровського каскаду, а також до всіх агрегатів Київської ГАЕС та Дністровської ГЕС-1.

Капіталовкладення (економічні) в реконструкцію визначалися на основі розрахункової вартості в сумі 5 290,6 млн грн без витрат на безпеку споруд, ПДВ- 868,5 млн грн, інфляційних коштів – 1 183,2 млн грн, податків і зборів – 0,1 млн грн та зворотних сум – 26,6 млн грн і склали 3 212 млн грн.

Річний дохід в розрахунках економічної ефективності від приросту виробітку електроенергії і потужності визначався по такому розрахунковому двоставковому тарифу, який забезпечить окупність капіталовкладень в реконструкцію за десять років після її завершення або за двадцять два роки з урахуванням тривалості реконструкції.

*Таким чином*, здійснення II черги реконструкції ГЕС Укргідроенерго, крім продовження терміну їхньої експлуатації, дозволить збільшити енерговіддачу приблизно на 3-4 %. Очікувані після реконструкції значення збільшення основних показників енерговіддачі становитимуть:

- середньобагаторічного річного виробітку електроенергії  
207,3 млн кВт·год;
- наявної зимової потужності 90 % забезпеченості 181,2 МВт;
- потужності при розрахунковому напорі 245,2 МВТ, а з урахуванням зниження ККД гідроагрегатів за роки експлуатації становитимуть:  
середньобагаторічного річного виробітку електроенергії  
501 млн кВт·год; наявної зимової потужності 90 % забезпеченості  
293 МВт.

Розрахунки економічної ефективності II черги реконструкції ГЕС Укргідроенерго підтверджують ефективність цього проєкту. Реконструкція дасть можливість за рахунок підвищення вироблення ГЕС і ГАЕС зниження експлуатаційних витрат дістати додатковий прибуток. Приріст прибутку забезпечить повернення капіталовкладень за 22 роки з початку проведення реконструкції (або через 10 років після її завершення) і чистий дисконтований прибуток (інтегральний ефект) у розмірі 1260 млн грн. Внутрішня норма рентабельності становитиме 13,1 %.

Виконання комплексу заходів, передбаченого цією роботою, дозволить створити сучасні умови праці відповідно до чинної нормативної документації, а також знизити вплив на навколишнє середовище.



Осадчий С. Д.



Рассовський В. Л.



Бураков О. С.



Єфименко В. М.



Коршунов О. О.



Кобзар І. В.



Ковальов Ю. М.



Хорев О. М.