

УДК 681.523:621.22

## СИСТЕМНІ ВИМОГИ ДО ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

РАДЧЕНКО В. В. канд. техн. наук., доцент, доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна, e-mail: radchvv@ukr.net;

**Мета роботи.** Визначення резервів основного обладнання з погляду системної ролі гідроелектростанцій.

**Методи досліджень.** Комплексний поліпредметний підхід до аналізу й визначення діючих складових генерації та основного енергетичного обладнання.

**Отримані результати.** Наведена актуальність і основа системних вимог до ефективності енергетичного обладнання гідроелектростанцій, що дозволяють забезпечувати формування необхідного функціонального рівня процесу генерації. Розглянуті особливості основних компонентів технології перетворення і їх взаємодії. Відображені впливи складових наскрізного тракту процесу генерації. Отримані характеристики ефективності перетворення в умовах системної режимної мобільності. Показані основні можливості й шляхи організації ефективного енергоінформаційного обміну на рівні гідрогенератора. Запропоновані шляхи підвищення ефективності роботи діючого обладнання гідроелектростанцій.

**Наукова новизна.** Запропоновано поліпредметну конкретизацію системного підходу для визначення резервів обладнання та підвищення ефективності генерації, що дозволяє визначити динамічні складові генерації та критерії ефективності діючого обладнання гідроелектростанцій.

**Практична цінність.** Визначено системні вимоги до наскрізного тракту енергетичних перетворень та підвищення ефективності генерації основного обладнання гідроелектростанцій за його системної ролі.

**Ключові слова:** гідроенергетика; резерв потужностей; динаміка гідроагрегату; гідрогенератор; ефективність.

### I. ВСТУП

Гідроенергетика має особливу й важливу системну роль в формуванні збалансованої національної енергетичної сфери та надає можливості оперативно реагування на зміну її режимів.

Національні гідроенергетичні системи досить потужні й важливі технічні об'єкти, втілюють не тільки складні, багатоступеневі енергетичні перетворення. Вони вирішують ще й низку гідротехнічних, кліматичних та екологічних проблем, в тому числі й регіональних. Тому до підвищення їх показників увага не випадкова.

Системна роль вітчизняної гідроенергетики, визначена у вигляді динамічного резерву потужностей енергетичної системи, обумовлює підвищені вимоги до поточних технічних характеристик обладнання, в тому числі динамічних, та ефективності його використання.

Можливість роботи Дніпровської гідроелектростанції (ГЕС) у компенсаційному й піковому режимах та майже хвилинна готовність гідроагрегатів, забезпечує не тільки стабільність системну, але й помірне фінансове навантаження споживачів відносно пікових системних процесів.

Саме тому ефективність роботи енергетичного обладнання суттєво залежить від врахування основних системних складових, важливих з погляду сучасних вимог до реалізації технологічних процесів генерації ГЕС.

### II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

ГЕС та їх енергетичне обладнання за ознаками повною мірою відповідають техніці великих складних систем [1], що вимагає відповідної деталізації системних підходів до аналізу ефективності та побудови складових процесів генерації. Тому необхідною й своєчасною є увага практично до всіх ланок процесу енергетичних перетворень з погляду їх ефективної реалізації, [2]. Основними елементами зазначеної ланки на рівні гідроагрегатів ГЕС є гідротурбіна та гідрогенератор.

Схеми заміщення гідрогенераторів з електричним еквівалентом механічної потужності певною мірою сприяють уніфікації методик та алгоритмів досліджень за основними принципами системності [3], однак вони не деталізують робочих складових технологічних процесів, особисто ГЕС. Разом з тим, необхідно враховувати особливості й базові принципи побудови та властивості електромеханічних перетворювачів ГЕС, [4].

Гідромеханічні енергетичні перетворювачі – турбіни розраховані розробниками переважно на стабільні режими навантажень, що забезпечують їх досить високу ефективність, [5], [6]. Однак дані динамічної ефективності гідравлічних турбін, відповідні сучасній системній ролі гідроенергетики, практично відсутні.

Рівень та якість інформаційного забезпечення процесів керування [7], [8] теж досить суттєво впливає на ефективність генерації. Особливо важливо це за умов режимної реалізації зазначеного мобільного

резерву потужностей агрегатами ГЕС.

Тому актуальним та своєчасним є напрям досліджень ефективності первинних перетворювачів енергії ГЕС за деталізованим системним підходом. Це важливо також з погляду можливостей практичної модернізації енергетичного обладнання ГЕС з погляду сучасних системних вимог.

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є визначення поточних резервів та шляхів підвищення ефективності основного обладнання ГЕС з погляду його сучасної системної ролі - мобільного резерву потужностей національної енергетичної системи.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У якості базового об'єкта досліджень обрана Дніпровська ГЕС. Для цього є щонайменше декілько вагомих причин. Це одна з найперших та найпотужніших вітчизняних ГЕС, реалізованих за системним планом державної електрифікації. З початку її побудови минуло вже майже 90 років. Це досить поважний вік для такої потужної гідротехнічної споруди, зважаючи на те, що встановлені потужності за цей час теж суттєво змінилися від 640 до 1500 МВт. Тому й увага до неї підвищена.

З іншого боку, проведені добудови й модернізації за зазначений час, що фактично подвоїли встановлену потужність обладнання, суттєво підвищили загальне технологічне навантаження. Змінилась також і системна роль гідроенергетики, що теж суттєво впливає на експлуатаційні режими обладнання. Однак, навіть зміна системної ролі теж фактично не врахована в повній мірі, що загалом не сприяє ефективній генерації ГЕС – досить коштовних енергетичних об'єктів, що забезпечують найнижчу вартість пікової енергії.

Слід зазначити, що Європа, не маючи таких можливостей, вимушено забезпечує пікові потреби використання дорогих газотурбінних станцій, з досить низьким загальним ККД, близько 25% та функціональною готовністю приблизно 10 хв., що суттєво підвищує вартість пікової енергії. Тому проблема покриття пікових навантажень в сучасній енергетиці досить загострена.

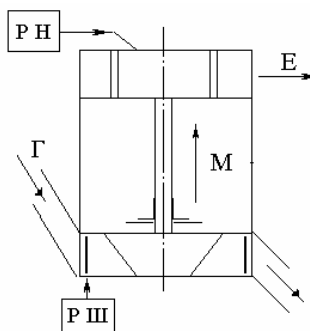
Однак, саме така робота обладнання ГЕС, в якості динамічного резерву системи, має наслідком підвищені навантаження та втрати перехідних процесів, з якими неможливо не рахуватися, зважаючи на статистику зростання робочих циклів агрегатів, притаманну зазначеній вище ролі.

Узагальнена технологічна схема первинного енергетичного перетворювача ГЕС – гідроагрегата наведена на рис. 1. Вона містить регулятори процесу та основні діючі впливи [2].

Така модель дозволяє системно розглядати діючі

впливи технологічного процесу гідроагрегату. Реалізує комплексний підхід до аналізу й визначення потрібних складових, що дозволяє провести аналіз наскрізного технологічного тракту перетворення енергії ГЕС [9].

Важливим є те, що наскрізний технологічний тракт ГЕС практично реалізує складну схему енергетичних перетворень, що послідовно включає гідравлічну, механічну та електричну складові:  $G \rightarrow M \rightarrow E$ . Кожна зі складових має свої технологічні обмеження.



*G – потік гідравлічний; M – потік механічний; E – потік електричний; РН – регулятор напруги; РШ – регулятор швидкості.*

**Рисунок 1.** Узагальнена технологічна модель перетворювача ГЕС.

Запропонований підхід дозволив визначити існуючий стан й шляхи підвищення ефективності ГЕС дефіцит мобільних потужностей яких досить гостро відчувається в енергетичній системі. Для цього з'ясовано наступне:

- витрати активної електричної енергії на збудження гідрогенераторів разом складають 3,71% від загальних обсягів виробленої енергії;
- витрати енергії гідрогенераторами в режимі синхронної компенсації становлять 2,44% від обсягів вироблення активної енергії за рік;
- власні потреби станції складають 3,14% від обсягів виданої енергії;
- втрати на шинах розподільчого пристрою становлять 3,97%;
- рівень ефективності гідроагрегата суттєво залежить від навантаження, так на рівні 50%, ККД зменшується на 22%;
- витрати енергії в режимі синхронної компенсації становлять 5%, що майже вдвічі менше витрат холостого ходу, які для кожного гідроагрегату Дніпровської ГЕС рівнозначні втратам 7,2 Мвт. год. на рік;
- втрати генерації суттєво зростають при відхиленні потужності гідроагрегата понад 5%;
- втрати на перехідних режимах, що становлять до 60 сек. переважно пов'язані з проточним трактом.;
- характеристики гідроагрегата нелінійні, суттєво залежить від навантаження, ККД на рівні 50% змен-

шується з 92% до 70%;

- витрати неробочого ходу складають 10% потоку крізь турбіну для кожного гідроагрегату;

Слід зазначити – витрати первинного джерела енергії мають тенденцію переважного впливу на ефективність гідроагрегату. Тоді загальний ККД ГЕС становить щонайменше 95, 12%. Однак його характеристика суттєво нелінійна (рис. 2).

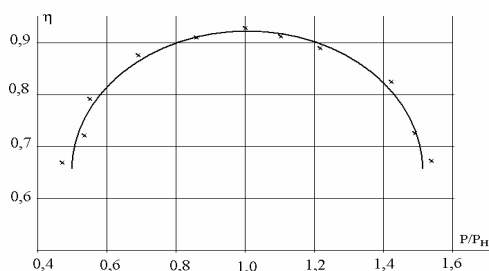


Рисунок 2. Зміна ККД ГЕС за навантаженням.

Слід зазначити, що наведені значення відображають переважно статичні чинники ефективності в роботі гідроенергетичного обладнання. При цьому існують певні технологічні, технічні резерви й можливості поліпшення якісних характеристик. Проте, на практиці найчастіше такі поліпшення досягаються ціною невиправданого технічного ускладнення обладнання, явної функціональної надмірності й неспіврозмірної витрати енергоносія. Це, у свою чергу, спричиняє масу технічних, екологічних і соціальних проблем, безпосередньо впливає на ефективність процесів та обладнання ГЕС.

Основним чинником, суттєво стримуючим розвиток сучасної енергетики є виражені умови її екологічності. Поширене рішення вказаної проблеми тільки засобами енергозбереження, точніше обмеження енерговикористання без істотного підвищення ефективності процесів первинного перетворення енергії на сучасному етапі технічного прогресу практично неможливе. Тільки комплексні рішення здатні вирішити таку важливу й нагальну проблему підвищення віддачі енергетики, а також зняти багато існуючих технічних і екологічних обмежень.

Однак існуючі динамічні складові перехідних процесів суттєво знижують ефективність роботи первинних енергетичних перетворювачів ГЕС. Слід враховувати, що число робочих циклів обладнання ГЕС протягом останніх років має стійку тенденцію зростання. Так гідроагрегати Дніпровської ГЕС за останні роки подолали відмітку 5000 робочих циклів на рік й досить швидко наближаються до значень, що переважають 8000 циклів. Це означає, що час сталої роботи агрегату, для якої визначено й нормовано практично всі робочі характеристики обладнання, неупинно скорочується, а динамічна складова зростає.

Критерій ефективності процесу гідроенергетичного перетворення в загальному вигляді

$$K_E = G/P, \quad (1)$$

де  $G$  – первинний ресурс перетворений в електричну складову;  $P$  – енергетичний ресурс проточного тракту гідроагрегату.

Таким чином можливо оцінити загальну ефективність не тільки наскрізного тракту перетворення енергії, але й гідроенергетичного перетворювача. Проте в даному випадку існує проблема точності обліку важливої складової – ресурсу проточного тракту.

Ефективність гідроенергетичної системи на прикладі основної функціональної одиниці – гідроагрегату, визначається щонайменше трьома основними групами складових: гідравлічними, механічними й електричними, що природно витікає з схеми технологічного процесу ГЕС. Саме їх поєднання забезпечує загальний рівень функціональності і ефективності.

$$R_E = \sum_{i=0}^N G_i + \sum_{k=0}^M M_k + \sum_{l=0}^J E_l, \quad (2)$$

де  $G_i$ ,  $M_k$ ,  $E_l$  – відповідно гідравлічні, механічні й електричні діючі складові ефективності.

Системні вимоги до ефективності гідроагрегатів мають й динамічний аспект. Динамічні складові періодичної дії, позначаються переважно на перехідних процесах і змінах робочих режимів

$$R'_D = \frac{dG}{dt} + \frac{dM}{dt} + \frac{dE}{dt}. \quad (3)$$

Їх інтегровану дію можливо представити як

$$R_D = \int_0^{t_D} G_D + \int_0^{t_D} M_D + \int_0^{t_D} E_D, \quad (4)$$

де  $G_D$ ,  $M_D$ ,  $E_D$  – динамічні складові перехідного процесу гідроагрегату.

Проте дані по динамічним складовим ефективності гідроенергетичних перетворювачів практично відсутні. Тому важливо визначати системний вплив окремих груп фізичних чинників.

Важливу роль в ефективності гідроагрегату відіграють характеристики регуляторів: РН та РШ. Робочу основу вказаних регуляторів складають технічні засоби цифрової обробки сигналів, [10] – [12] а також якість інформаційного забезпечення технологічного процесу генерації.

Для багатовимірного енергетичного об'єкту, яким за своєю технічною суттю є гідроагрегат, об'єднаний умовами режимної єдності технологічного процесу, структурно-функціональний опис можливо представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} u_a &= X_a I_a + G U_f \\ P &= M \omega_0 \end{aligned} \quad (5)$$

Перше матрично-векторне операторне рівняння

безпосередньо відображає процес формування рівня основного електричного параметра гідрогенератора – його напруги  $u_a$ . Воно включає взаємодію фізичних параметрів машини і управління збудженням, де множина  $G$  фактично відображає інформаційну складову зміни напруги гідрогенератора.

Друге, з наведених рівнянь, фізично відображає загальну потужність генерації через дію гідромеханічної частини агрегату з регулятором швидкості, що забезпечує другий важливий системний параметр – частоту  $f$ , та реалізується балансным методом енергоінформаційного обміну гідроагрегату. Тоді чинник інформаційний є відображенням

$$G : T \times u \rightarrow I . \quad (6)$$

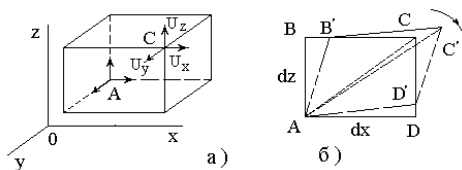
При цьому виникає ряд практичних питань про те, що саме представляє така інформація, якою має бути і в якому вигляді необхідна, а також як вона позначається на структурах і характеристиках відповідних систем, [13], [14]. Очевидно, що діючі кількісні підходи не відповідають умовам системного інформаційного забезпечення й не сприяють ефективності генерації ГЕС. Продуктивним шляхом системних рішень в інформаційній технологічній царині мають бути змістовні складові процесів, [17].

Основним чинником перетворення кінетичної енергії рідини є її швидкість [5]. Механіка рідини визначає швидкість потоку на основі формули Торічеллі

$$V = \varphi_0 \sqrt{2g \cdot h} , \quad (7)$$

де  $\varphi_0$  – коефіцієнт швидкості та втрати натиску.

При цьому існує об'ємна рухливість рідкого середовища на рівні елементарних часток потоку, модель якого можливо представити у вигляді рис. 3.



а) одиничний об'єм; б) складові нерівномірності й деформації

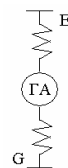
**Рисунок 3.** Узагальнена модель руху рідкого середовища.

Наведена об'ємна модель відображає характер руху окремих часток потоку рідини в часі. Кожна мала частинка рідини при русі змінює не тільки своє відносне положення, але й форму. Зміна форми безпосередньо пов'язана з тим, що швидкості в різних точках частинки різні за величиною та напрямом. Відповідні кутові деформації за координатами мають вигляд:

$$\theta_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right); \quad \theta_z = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right). \quad (8)$$

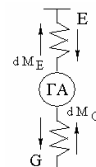
Наведені залежності відображають гідроенергетичні процеси мікро й макрорівнів. У загальних енергетичних характеристиках процесів вони найчастіше інтегруються й усереднюються, але впливають на загальну ефективність процесу.

Канал генерації енергії гідроагрегатом пов'язує між собою дві різномірні пружні системи гідравлічну й електричну (рис. 4). Представлення наскрізного каналу перетворення енергії гідроагрегатом у вигляді пружної гідроелектродинамічної моделі дозволяє розглянути єдність впливів різномірних стихій. При цьому обидві системи можуть бути представлені еквівалентними пружними елементами з певними характеристиками.



**Рисунок 4.** До аналізу впливів каналу перетворення енергії.

Елемент  $G$  відповідає властивостям гідравлічної складової процесу з її обмеженнями, а елемент  $E$  – відповідно електричної складової. Такий підхід дозволяє поєднати технологічні складові процесу генерації та врахувати діючі властивості й обмеження. Це також може бути основою теоретичної моделі взаємних впливів середовищ (рис. 5).



**Рисунок 5.** Основа гідро електродинамічної моделі.

Наведена модель дозволяє системно розглядати роботу гідроагрегату з урахуванням фактичних впливів двох метасистем: гідравлічної й електричної, що пов'язують наскрізний потік перетвореної енергії. Тоді динамічна складова гідроагрегату має вигляд

$$dM_{GA} = \sum_{i=0}^N dM_{Gi} + \sum_{j=0}^K dM_{Ej} . \quad (9)$$

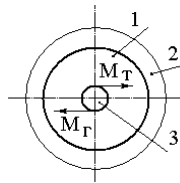
Рівняння обертання валу гідроагрегату має вигляд

$$J \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} = M_G + M_{EL} , \quad (10)$$

де  $J$  – момент інерції ротора,  $\omega$  – частота обертання,  $M_{EL}$  – електричний момент ротора гідрогенератора,  $M_G$  – гідравлічний момент турбіни.

Таким чином, в робочому стані, на вал гідроагре-

гату діють дві основних активних складових моменту, спрямовані протилежно: гідромеханічна й електро-механічна (рис. 6).



1 – турбіна, 2 – гідрогенератор, 3 – вал гідроагрегату.

**Рисунок 6.** Схема взаємодії активних складових гідроенергетичного процесу.

Проте на практиці наведені складові досить часто є поточною множиною діючих зусиль  $\{M_T\} = \{M_G\}$ .

Слід зазначити, що компонентами багатьох складових зазначених множин є величини переважно змінні. При цьому, існуючі інтегральні підходи до оцінки вказаних впливів на достатньому рівні відображають їх усереднені значення, але не в змозі забезпечити об'єктивні дані про поточні зміни. Тому основні динамічні чинники істотних складових можуть і мають виділятися й розглядатися як самостійні складові вказаних процесів.

Рівняння руху ротора агрегату можна записати у вигляді:

$$\frac{J}{k} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + D \frac{\partial \theta}{\partial t} + M_c \cdot \theta = M_z, \quad (11)$$

де  $\theta$  – кут навантаження;  $M_c$  – питомий синхронізуючий момент.

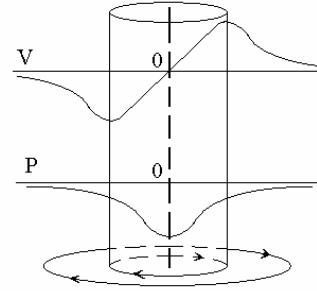
В свою чергу, це є рівняння гармонійного осцилятора з власною частотою та добротністю. Наслідком є те, що під дією збуджуючого моменту, синхронна машина здійснює синхронні гойдання. При цьому змінюється кут  $\theta$ . Відповідно змінюються електричний момент і потужність генератора. Частота синхронних гойдань гідрогенератора знаходиться в діапазоні 0,5 – 3 Гц. Однак, на них впливають ще й коливання проточної частини гідроагрегату.

Впливають також істотні постійні часу ПД-регулятора швидкості турбіни. Вони також вносять вагомий внесок за контуром управління в коливальну складову роботи агрегату, девіацію й поточні втрати потужності, а також істотно знижують загальний рівень його динамічної ефективності. Крім того, важливою причиною турбулентних пульсацій потоку є нестійкість руху рідини.

При критичних параметрах потоку, визначуваних числом Рейнольдса, випадкові хвилі збурень в рідині не затухають, а навпаки посилюються. При цьому відбувається якісна зміна структури потоку й характеру його руху. Із стаціонарного, ламінарного руху, потік переходить в турбулентний. Частинки

рідини при цьому не рухаються по стабільних траєкторіях, а змінюються у просторі та часі, потік стохастично пульсує й об'ємно перемішується.

При перехідних процесах, нерозрахункових режимах і інших нештатних ситуаціях у відсмоктуючій трубці за певних умов можливо виникнення турбулентного вихрового, або кавітаційного джгута (рис. 7).



**Рисунок 7.** Загальна схема формування вихрового джгута.

Так, в гідротурбіні відбувається унікальне поєднання різнорідних чинників впливу, у тому числі і перерахованих механізмів нестійкості. Течія відбувається не тільки за великих чисел Рейнольдса, але й на податливій, віброуючій поверхні, в умовах замкнутих об'ємів у вигляді довгих водоводів, які можуть бути своєрідними резонаторами хвиль збурення.

Так може з'являтися стійка система стоячих хвиль. За певних умов ці хвилі здатні збуджуватися в робочому процесі гідроагрегату, і накопичувати досить значну енергію. Тоді в системі водовід – гідроагрегат можуть виникати автоколивання. Враховуючи, що на власні форми коливання відчутно впливає імпеданс водяного стовпа, залежний від швидкості звуку у відсасуючій трубці, це викликає вібрацію, кавітацію й гідроудари в проточній частині.

У натурних турбін в деяких робочих зонах з'являються пульсації тиску проточної частини, знижується ККД. Спостерігається також значне гойдання потужності гідроагрегату. В результаті цього зменшується регульовальний діапазон, гідроагрегат не може вийти на проектну потужність.

Гідрогенератор в енергосистемі поводить як гармонійний осцилятор. У частотному діапазоні 0, 5 – 3 Гц у нього фактично існує пологий низькодобротний резонанс. Це означає, що гідроагрегат досить чутливий до коливань обертового моменту, залежного від пульсацій тиску у водоводі. При цьому коливання моменту, у свою чергу, приводять до коливань кута навантаження гідрогенератора в енергосистемі з амплітудою:

$$\theta_0 \approx \frac{M_z}{D} \sqrt{\frac{J}{km_c}}. \quad (12)$$

Таким чином існуюча вагова нестабільність гід-

ромеханічного тракту перетворення енергії відбивається на роботі й ефективності гідроагрегату в цілому. Цьому сприяє й динаміка електромеханічної частини енергетичного перетворювача, обумовлена її інерційністю, [15].

ПД-регулятор системи збудження в колі зворотного зв'язку підвищує ступінь інерційності системи керування напруги, що суттєво знижує стійкість та динамічні якості первинного перетворювача енергії ГЕС. Загальний підхід до управління робочим процесом гідроагрегату становить:

$$P_m - P_e = Pa$$

або

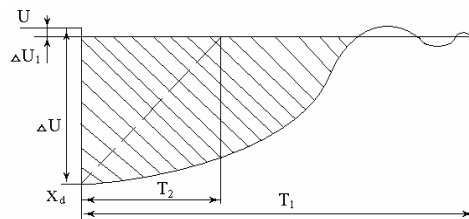
$$P_m - P_e = 2H \frac{d\omega}{dt} \cdot J, \quad (13)$$

де  $P_e$  – електричний момент;  $P_m$  – механічний момент валу ротора;  $Pa$  – прискорююча потужність;  $\omega$  – кутова швидкість;  $H$  – постійна часу інерції;  $J$  – момент інерції.

$$P_e(fv) = \frac{U_f \cdot U_\infty}{x_d(fv) + x_e} \sin(\theta) + \frac{U_\infty [x_d(fv) - x_q(fv)]}{2 \cdot [x_d(fv) + x_e] \cdot [x_q(fv) + x_e]} \sin(2 - \theta), \quad (14)$$

де:  $U_f$  – напруга збудження;  $U_\infty$  – напруга мережі;  $\theta$  – кут навантаження;  $x_d$  – синхронний індуктивний опір за подовжньою віссю;  $x_q$  – синхронний індуктивний опір поперечної вісі;  $x_e$  – зовнішній індуктивний опір;  $f$  – частота коливань.

З рівняння виходить, що електричний момент  $P_e$  пропорційний напрузі збудження  $U_f$ . Таким чином, можливо регулювати електричний момент, пропорційно змінюючи напругу збудження, а механічний – швидкістю обертання. Проте умови інерційності регуляторів при цьому досить часто мають критичне значення. Розроблений комплексний поліпредметний підхід [16], [18] до реалізації технологічного процесу підвищує ефективність генерації ГЕС. Такий підхід дозволяє шляхом модернізації системи збудження (СЗ) гідроагрегату на основі системно розроблених рішень уникнути інерційності, перерегулювання й відповідно коливань в перехідному процесі відновлення напруги гідроагрегату (рис. 8). Модернізація системи збудження гідроагрегату полягає в заміні ПД-регулятора на неінерційний, що забезпечує виключення інерційності кола зворотного зв'язку, що знижує порядок системи керування й підвищує динамічну ефективність генерації. Зростає стійкість системи регулювання, розширюються можливості форсування збудження, перехідний процес відновлення напруги суттєво скорочується.



$T_1$  – час відновлення за інерційної СЗ;  $T_2$  – відсутність інерційності СЗ.

Рисунок 8. Характеристика відновлення напруги.

Попередню оцінку динамічних втрат генерації первинним енергетичним обладнанням Дніпровської ГЕС можливо визначити наступним чином. Сумарна постійна інерції гідроагрегата складає в середньому 8 сек. Тоді втрати потужності перехідного процесу гідроагрегату можна оцінити як

$$\Delta U = 0,4 U_{CT} = 5,52 \text{ кВ}, \quad \Delta P = 0,2 \cdot 80 = 16 \text{ МВт}$$

Втрати генерації агрегата за рік

$$\Delta W = \Delta P \cdot t = 16 \cdot 8/60 \cdot 8\,000 = 17\,066 \text{ МВт} \cdot \text{г}$$

Визначені характеристики й одержані параметри перехідного процесу переконливо доводять необхідність суттєвого зниження динамічних втрат перехідного процесу за рахунок його оптимальної реалізації, що переважно досягається відсутністю інерційності та достатнім рівнем енергоінформаційного обміну кола збудження гідроагрегату. Наведені дані відображають продуктивність поліпредметного підходу та окремих його проєкцій до підвищення ефективності гідроенергетичних процесів генерації ГЕС та в формуванні досить високого енергоінформаційного потенціалу впливів, безпосередньо залежного від реалізації первинних перетворювачів контрольованих процесів.

## V. ВИСНОВКИ

1. Системні вимоги до ефективності енергетичного обладнання ГЕС дозволяють виявляти наскрізні технологічні резерви й шляхи забезпечення необхідного функціонального рівня.
2. Властивості зворотного зв'язку в гідроенергетичних перетворювачах мають переважний вплив на їх динамічні показники ефективності.
3. Суттєві втрати припадають на долю проточно-го тракту та регуляторів, що мають досить низькі динамічні властивості.
4. Втрати перехідних режимів безпосередньо пов'язані з гідро електродинамікою робочих процесів.
5. Динамічні складові процесів суттєво визначають ефективність роботи гідроагрегатів ГЕС.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Честнат, Г. Техника больших систем [Текст] / Г. Честнат. – М.: Энергия, 1969. – 656 с.

- [2] Клишевич, Г. В. Энергопроцесс гидроэнергетических установок [Текст] / Г. В. Клишевич. – Л.: Энергия, 1969. – 164 с.
- [3] Китаев, А. В. Схемы замещения электрических машин [Текст] / А. В. Китаев, В. Л. Агбомасу, В. И. Глухова // Электротехника та електроенергетика. – 2013. – № 2. – С. 14-26. DOI: doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-2
- [4] Осин, И. Л., Электрические машины: Синхронные машины. [Текст] / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.
- [5] Емцев, Б. Т. Техническая гидромеханика [Текст] / Б. Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987. – 460 с.
- [6] Барлит, В. В. Гидравлические турбины [Текст] / В. В. Барлит. – К.: Вища школа, 1977. – 360 с.
- [7] Veus, H. L. The use of information in sorting [Text] / H. L. Veus // J. ACM. – 1970. – Vol. 17 – No 3. – P.17-20.
- [8] Hellerman L. A measure of computational work [Text] / L. Hellerman // IEEE Trans. – 1972. – Vol. 21 – No 5 – P. 439-446.
- [9] Пожуєв, В. І. Визначення ефективності існуючих гідроенергетичних систем [Текст] / В. І. Пожуєв, В. В. Радченко, Ф. П. Шкрабець, В. Г. Кучер, В. П. Кобець // Електротехніка та електроенергетика – 2013. – № 2. – С. 71-76. DOI: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-10
- [10] Драммонд, М. Методы оценки и измерений дискретных вычислительных систем [Текст] / М. Драммонд. – М.: Мир, 1977. – 381 с.
- [11] Миронов, В. Г. Основы технологий цифровой обработки сигналов. Ч. 1. Свойства сигналов и современные технические средства их обработки. [Текст] / В. Г. Миронов // Электричество. – 2001. – № 3. – С. 55-65.
- [12] Миронов, В. Г. Основы технологий цифровой обработки сигналов. Ч. 2. Математическое описание цифровых сигналов. [Текст] / В. Г. Миронов // Электричество. – 2001. – № 8. – С. 60-69.
- [13] Палю де Ла Барьер. Р. Курс теории автоматического управления [Текст] / Р. Палю де Ла Барьер. – М.: Машиностроение, 1973. – 396 с.
- [14] Robert E. Shannon, Systems Simulation: The Art and Science [Text] / E. Robert // Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975 – 420 p.
- [15] Dandeno, P.L. Effects Synchronous machine modeling in large-scale system stability [Text] / P.L. Dandeno, R.L. Hauth, R. Schulz // Trans. IEEE. – 1973. – Vol. 92. – №2. – P. 574-582.
- [16] Радченко, В. В. Підвищення динамічної ефективності системи збудження гідрогенератора [Текст] / В. В. Радченко // Вісник НУВГП. – 2015. – № 2 (62) – С. 262-275.
- [17] Радченко, В. В. Семантика інформаційних складових енергетичних процесів [Текст] / В. В. Радченко // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2012. – № 89. – С. 87-91.
- [18] Радченко В. В. Поліпредметний аналіз ефективності гідроагрегата ГЕС [Текст] / В. В. Радченко НТЗ Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2016. – № 97. – С. 112-116.

Стаття надійшла до редакції 06.08.2018

## СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

РАДЧЕНКО В. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики Запорожской государственной инженерной академии, Запорожье, Украина, e-mail: radchvv@ukr.net

**Цель работы.** Определение резервов основного оборудования с точки зрения системной роли гидроэлектростанций.

**Методы исследований.** A comprehensive multi-subject approach to the analysis and determination of the effective components of generation and energy equipment.

**Получены результаты.** Приведена актуальность и основа системных требований к эффективности энергетического оборудования гидроэлектростанций, позволяющих обеспечивать формирование необходимого функционального уровня процесса генерации. Рассмотрены особенности основных компонентов технологии преобразования и их взаимодействия. Отражены влияния составляющих сквозного тракта процесса генерации. Получены характеристики эффективности преобразования в условиях мобильности. Показаны основные возможности и пути организации эффективного энергоинформационного обмена гидрогенератора. Предложены пути повышения эффективности работы действующего оборудования гидроэлектростанций.

**Научная новизна.** Предложена полипредметная конкретизация системного подхода для определения резервов оборудования и повышения эффективности генерации, которая позволяет определить динамических составляющих генерации и критериев эффективности.

**Практическая ценность.** Определены системные требования к исследованию сквозного тракта энергетических превращений и повышения эффективности генерации основного оборудования гидроэлектростанций и его системной роли.

**Ключевые слова:** гидроэнергетика; резерв мощностей; динамика гидроагрегата; гидрогенератор; эффективность.

## SYSTEM REQUIREMENTS TO THE EFFICIENCY OF HYDRO ELECTRIC POWER STATIONS

RADCHENKO V. V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of thermal energy and hydroenergy department of the Zaporizhzhia state engineering academy, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: radchvv@ukr.net;

**Purpose.** Determination of the reserves of the main equipment in terms of the systemic role of hydroelectric power stations.

**Methodology.** Complex poliojecting approach to the analysis and determination of operating constituents of generation and basic energy equipment.

**Findings.** The urgency and the basis of the system requirements for the efficiency of the power equipment of hydroelectric power stations, which allows ensuring the formation of the necessary functional level of the generation process is proposed. The features of the main components of the transformation technology and their interaction are considered. Reflects the influence of the components of the end-to-end path of the generation process. Characteristics of the conversion efficiency in the mobility conditions are obtained. The main possibilities and ways of organizing an effective energy exchange of a hydro generator are shown. The ways of increasing the operating efficiency of the existing equipment of hydroelectric power stations are proposed.

**Originality.** The multi-subject requirements of the system approach is proposed for determining equipment reserves and increasing generation efficiency, which makes it possible to determine the dynamic generation components and performance criteria.

**Practical value.** The system requirements for studying the end-to-end path of energy transformations and increasing the efficiency of generating of basic equipment of the hydroelectric power stations and its systemic role are determined.

**Keywords:** hydro energy; reserve of powers; dynamics of hydro aggregate; hydro generator; efficiency.

### REFERENCES

- [1] Chestnat, G. (1969). *Tehnyka bol'shyh system*. Moscow: Energiya, 656.
- [2] Klishevich, G. V. (1969). *Energoprotsess gidroenergeticheskikh ustanovok*. Leningrad: Energiya, 164.
- [3] Kitayev, A., Agbomassou, V., & Glukhova, V. (2013). Schemes of electric machines replacement. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 14-25. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-2
- [4] Osin, I. L., Shakaryan, Yu. G. (1990). *Elektricheskie mashiny. Sinhronnyie mashiny*. Moscow: Vysshaya shkola, 304.
- [5] Emtsev, B. T. (1987). *Tekhnicheskaya gidromekhanika*. Moscow: Mashinostroenie, 460
- [6] Barlit, V. V. (1977). *Gidravlicheskie turbiny*. Kyiv: Vischa shkola, 360.
- [7] Beus, H. L. (1970). The use of information in sorting. *JACM*, 17, 3.
- [8] Hellerman, L. (1972). A measure of computational work. *IEEE Trans*, 21, 5, 439-446.
- [9] Pojuev, V., Radchenko, V., Skrabet, F., Kucher, V., & Kobets, V. (2013). Definition of efficiency of existing hydropower systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 71-76. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-10
- [10] Drammond, M. (1977). *Metodyi otsenki i izmereniy diskretnykh vychislitelnykh system*. Moscow: Mir, 381.
- [11] Mironov, V. G. (2001). *Osnovy tehnologiy tsifrovoy obrabotki signalov*. Ch. 1. Svoystva signalov i sovremennyye tekhnicheskie sredstva ih obrabotki. *Elektrichestvo*, 3, 55-65.
- [12] Mironov, V. G. (2001). *Osnovy tehnologiy tsifrovoy obrabotki signalov*. Ch. 2. Matematicheskoe opisanie tsifrovyykh signalov. *Elektrichestvo*, 8, 60-69.
- [13] Palyu de La Barer, R. (1973). *Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow: Mashinostroenie, 396.
- [14] Shannon, Robert E. (1975). *Systems Simulation: The Art and Science*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 4.
- [15] Dandeno, P.L., Hauth, R.L., Schulz, R. (1973). Effects Synchronous machine modelling in large scale system stability. *Trans. IEEE*, 92, 2, 574-582.
- [16] Radchenko, V. V. (2015). Pidvyshhennja dynamichnoi' efektyvnosti systemy zbudzhennja gidrogeneratora. *Visnyk NUVGP*, 2 (62), 262-275.
- [17] Radchenko, V. V. (2012). Semantika informatsiy nih skladovih energetichnih protsesiv. *Girnycha elektromekhanika ta avtomatika*, 89, 87-91.
- [18] Radchenko, V. V. (2016). Polipredmetnyj analiz efektyvnosti gidroagregata GES. *Girnycha elektromekhanika ta avtomatika*, 97, 112-116.