

моделі формування сигналів дозволяють сформулювати обернену задачу і вирішити її. Проте розглянуті моделі, в основному, приймають до уваги лише амплітудні дані відбитого хвильового поля та побудовані на принципі інтерференції звукових хвиль. Все вищесказане дозволяє констатувати, що незалежно від алгоритму реконструкції відображення дефекту, він, по суті, є лише інтерпретатором дефекту, тобто на основі деяких принципів і уявлень про формування сигналів алгоритм здійснює розрахунок зображення. Тому завжди є доля вірогідності, що деякі дефекти не будуть представлені на зображенні, або навпаки можуть формуватись помилкові картини дефектів (артефакти).

1. *Ермолов И.А.* Наиболее перспективные направления развития ультразвукового контроля металлов (по материалам 7-й Европейской конференции). – Дефектоскопия, 2003, № 4, С.71-100.
2. *Хуанг Т.* Цифровая голография. ТИИЭР, 1971, Т. 59, № 9, С.63-76.
3. *Евдокимов В.Ф., А.С. Огир* О дискретной математической модели звуковой голограммы. – Электронное моделирование, Т. 22, № 1, 2000, С.3-8.
4. *Огир А.С.* Исследование процессов компьютерного восстановления акустических изображений. – Методы и средства компьютерного моделирования. Сб. научн.тр. ИМПЭ НАН України, 1997, С.41-44.
5. *Евдокимов В.Ф., Огир А.С.* О построении системы ультразвукового контроля конструкционных материалов объектов энергетики и машиностроения. – Электронное моделирование, Т. 23, № 5, 2001 – С.85-90.
6. *Огир А.С.* Новая информационная технология формирования голограммных акустических изображений высокого разрешения в системах ультразвуковой визуализации медицинского назначения / *А.С. Огир, В.В. Тарапата, Е.А. Огир* // Электронное моделирование – 2014. – Том 36, № 1. – С.49-57.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3860766>

Поступила 16.09.2019р.

УДК 519.8

О.М. Джигун, Київ

ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГЕС ЯК СКЛАДОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Abstract. We offer an approximate approach to the construction of mathematical model of modes of operation of hydroelectric power plants

Глобальною проблемою сучасності є проблема збереження безпечного стану навколишнього середовища для життєдіяльності суспільства. Прогнози,
© О.М. Джигун

що засновані на розрахунках і моделюванні розвитку суспільства, соціально-економічна ситуація, що сьогодні склалася в різних країнах світу, а також тенденція її розвитку, показують неухільне зростання електро- і водоспоживання.

За прогнозами світове споживання електроенергії до 2030 р. зросте у 2 рази, а до 2050 р. – у 4 рази. Тому зростає роль гідроенергетики, що використовує відновлювальні екологічно чисті гідроенергетичні ресурси. Незважаючи на те, що навіть освоєння всього економічно ефективного гідроенергетичного потенціалу може покрити лише частину прогнозованого зростання потреби у електроенергії, гідроенергетичні об'єкти замінюють частину теплових електростанцій, що дозволяє значно зменшити викиди забруднюючих речовин в навколишнє середовище. Одночасно ГЕС комплексно вирішують проблеми водопостачання, зрошення, захист від паводків і т. ін. [1, 2].

На рівні 2000 р. у світі засвоєно близько 32 % економічно ефективного гідроенергетичного потенціалу, що складає 2650 млрд кВтч електроенергії, виробленої на ГЕС встановленої потужності 670 млн кВтч. Подальший розвиток гідроенергетики базується на комплексному використанні водосховищ для задоволення таких потреб, як водопостачання населення, промисловості, сільського господарства, зрошення, захист від паводків. В багатьох випадках ГЕС та їх каскади є ядром великих водогосподарських і територіально-виробничих комплексів, що забезпечують зростання економіки, поліпшення соціальних умов регіонів.

Гідроелектростанції є важливою складовою частиною сучасних електроенергетичних систем. Вони використовуються для виконання таких відповідальних функцій, як балансування потужності та енергії. Висока маневреність генеруючих блоків ГЕС дозволяє покривати найбільш нерівномірні частини добових графіків навантажень, а наявність запасів водно-енергетичних ресурсів забезпечує розміщення резервів потужності, необхідних для регулювання частоти і активної потужності в електроенергетичній системі.

Спільно з прогнозуванням режимів енергосистеми в цілому здійснюється прогнозування коротко- і довгострокових режимів роботи ГЕС. Завдання такого прогнозування є оптимізаційними і полягають в пошуку економічно доцільних режимів, які можуть бути реалізовані в умовах дотримання ряду технологічних вимог і обмежень щодо використання енергетичного обладнання та водних ресурсів [3].

Для забезпечення адекватності прогнозованих режимів ГЕС в оптимізаційних завданнях використовуються технологічні особливості експлуатації гідроенергетичних установок і споруд окремих станцій і каскадів з них, а також особливості використання водосховищ неенергетичних учасниками водогосподарських систем такими, як сільське господарство, промисловість, комунальне господарство, водний транспорт і рибне господарство. При цьому водно-енергетичні ресурси ГЕС оцінюються в

умовах очікуваних змін клімату, а обсяги використання таких ресурсів обмежуються екологічними вимогами, встановленими в законодавчих і нормативних документах [4, 5].

В статті розглянемо апроксимативний підхід до моделювання режимів роботи ГЕС як складової частини електроенергетичної системи.

В основі такого підходу лежить гіпотеза про оптимальність водно-енергетичних режимів роботи ГЕС, які спостерігаються в минулому, користуючись статистичними даними. Витратні характеристики ГЕС є основою водно-енергетичних розрахунків.

Побудова таких характеристик виконується для кожного гідроагрегату окремо на основі обробки експериментальних даних про потужності генерації, напорі води і її витраті через турбіну [5]. Маючи дані про середньодобові рівні води у верхніх б'єфах гребель ГЕС, витратах води через турбіни та добових обсягах електроенергії, виробленої гідрогенераторами найбільшої в Україні компанії ПрАТ «Укргідроенерго» [6], встановлюємо економетричні залежності виду

$$E_{\Sigma i} = C_{0i} + C_{Qi}Q_i + C_{Hi}H_i, \quad \forall i \in I, \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_{\min i} \leq Q_i \leq Q_{\max i} \\ H_{\min i} \leq H_i \leq H_{\max i} \end{cases}, \quad \forall i \in I,$$

де $E_{\Sigma i}$ – добовий обсяг електроенергії, що виробляється i – й ГЕС при рівні води H_i в верхньому б'єфі і сумарної витраті води Q_i через її турбіни, I – множина ГЕС, що належать цій компанії, C_{0i} , C_{Qi} , C_{Hi} – значення отриманих коефіцієнтів економетричних залежностей.

Залежності (1) дозволяють визначати добові обсяги вироблення електроенергії основними ГЕС України по заданих параметрах водності річок, на яких вони розташовані, і можуть бути використані в плануванні добових режимів роботи ГЕС.

Маневрування потужністю ГЕС в різних межах здійснюється в різні періоди часу. Для визначення динаміки граничних значень потужності протягом доби проведено аналіз статистичних даних для двох множин, а саме робочих D_p і вихідних D_e днів кожного місяця. Для кожного добового періоду $t \in T$ тривалістю Δt за статистичними даними про обсяги виробленої електроенергії i – й ГЕС \tilde{E}_{itd} обчислимо середню на цьому періоді потужність, що розвивається

$$\tilde{N}_{itd} = \frac{\tilde{E}_{itd}}{\Delta t}, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I, \quad d \in D_p \cup D_e. \quad (2)$$

Для кожної з виділених множин днів знайдемо граничні значення потужності:

$$N_{\min it} = \tilde{N}_{itd} \xrightarrow{d \in D} \min, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I, \quad (3)$$

$$N_{\max it} = \tilde{N}_{itd} \xrightarrow{d \in D} \max, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I,$$

За обчисленими значеннями \tilde{N}_{itd} визначимо зростання потужності

$$\Delta \tilde{N}_{itd} = \tilde{N}_{itd} - \tilde{N}_{it-d}, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I, \quad d \in D_p \cup D_e \quad (4)$$

і для виділених множин днів (робочих і вихідних) знайдемо граничні значення таких збільшень

$$\Delta N_{\min it} = \Delta \tilde{N}_{itd} \xrightarrow{d \in D} \min, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I, \quad (5)$$

$$\Delta N_{\max it} = \Delta \tilde{N}_{itd} \xrightarrow{d \in D} \max, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I.$$

Значення ступеню зміни зростання потужності

$$Var_{it} = \frac{1}{|D|} \sum_{d \in D} \left| \Delta \tilde{N}_{itd} - \frac{\sum_{d \in D} \Delta \tilde{N}_{itd}}{|D|} \right|, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I, \quad (6)$$

де $|D|$ – потужність множини D . В результаті обробки статистичних даних відповідно до (2) – (6) для моделюючих значень N_{it} і зростання потужності $\Delta N_{it} = N_{it} - N_{it-1}$ встановлюємо сукупність обмежень виду

$$N_{\min it} \leq N_{it} \leq N_{\max it}, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I, \quad (7)$$

$$\Delta N_{\min it} \leq \Delta N_{it} \leq \Delta N_{\max it}, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I. \quad (8)$$

Значення ступеню зміни зростання потужності визначаємо як

$$Z_{it} = \left| \Delta N_{it} \right|, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I, \quad (9)$$

при умові

$$\sum_{t \in T} \Delta N_{it} = 0, \quad \forall i \in I \quad (10)$$

У відповідність до прийнятої гіпотези про оптимальність режимів

роботи ГЕС в минулому часі модельні значення ступеню зміни зростання потужності Z_{it} повинні бути максимально наближені до раніше встановлених значень цієї міри Var_{it} , яка є еталоном.

Оскільки ступінь змін Z_{it} і Var_{it} приймають невід'ємні значення, то замість виразу слід використовувати параметричний вираз

$$\bar{Z}(p, \varepsilon) = \frac{1}{|I||T|} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \left(\frac{Z_{it}}{Var_{it} + \varepsilon} \right)^p \xrightarrow{N_{it}, \forall t \in T, \forall i \in I} \min, \quad (11)$$

де введення параметра $0 < \varepsilon \rightarrow 0$ дозволяє усунути можливість формування нульових значень в знаменнику дробу функціонального виразу, а наявність цілочисельного параметру p , що приймає значення 1 або 2, дозволяє вибрати одну з двох форм функціоналу: лінійну або квадратичну.

Математична модель ГЕС побудована на основі апроксимативного підходу з використанням обмежень (7) – (10) і критерію близькості заходів мінливості потужності (11), має наступний вигляд:

$$\bar{Z}(p, \varepsilon) = \frac{1}{|I||T|} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \left(\frac{Z_{it}}{Var_{it} + \varepsilon} \right)^p \xrightarrow{N_{it}, \forall t \in T, \forall i \in I} \min, \quad (12)$$

$$0 < \varepsilon \rightarrow 0, \quad p = 1, 2;$$

$$\Delta N_{it} = N_{it} - N_{it-1}, \quad \forall t \in T, \quad t \neq 1, \quad \forall i \in I; \quad (13)$$

$$\Delta N_{i1} = N_{i1} - N_{i|T|}, \quad \forall i \in I; \quad (14)$$

$$E_{it} = N_{it} \Delta t, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I; \quad (15)$$

$$\sum_t E_{it} = E_{\Sigma i}, \quad \forall i \in I; \quad (16)$$

$$E_{\Sigma i} = C_{0i} + C_{Qi} Q_i + C_{Hi} H_i, \quad \forall i \in I; \quad (17)$$

$$L_{\min t} \leq \sum_i E_{it} \leq L_{\max t}, \quad \forall t \in T; \quad (18)$$

$$N_{\min it} \leq N_{it} \leq N_{\max it}, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I; \quad (19)$$

$$\Delta N_{\min it} \leq \Delta N_{it} \leq \Delta N_{\max it}, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I; \quad (20)$$

$$0 \leq Z_{it} \leq \Delta N_{it}, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I; \quad (21)$$

$$0 \leq Z_{it} \leq -\Delta N_{it}, \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in I. \quad (22)$$

одель у вигляді сукупності виразів (12) – (22) являє собою задачу оптимізації з лінійними обмеженнями і лінійним або квадратичним критеріями відповідно $\bar{Z}(1, \varepsilon)$ або $\bar{Z}(2, \varepsilon)$. Таким чином, користувач моделі може вибрати один з двох типів завдань: лінійного або квадратичного програмування.

Математична модель ГЕС дозволяє визначити навантажувальні режими кожної гідроелектростанції для добового графіка загального навантаження, заданого своїми межами $L_{\min t}$ і $L_{\max t}$ $\forall t \in T$, при якому

$$\sum_{t \in T} L_{\min t} \leq \sum_{i \in I} E_{\Sigma i} \leq \sum_{t \in T} L_{\max t}.$$

Якість одержуваних рішень можна інтегрально оцінювати по знайденому значенню критерія $\bar{Z}(p, \varepsilon)$. Чим ближче це значення до одиниці, тим вище адекватність знайдених режимів, які спостерігалися в минулому.

Висновки

При подальшому розвитку електроенергетики на основі гармонійного поєднання атомної, вугільної електроенергетики, гідроенергетики та інших відновлюваних джерел гідроенергетика буде відігравати важливу роль в оптимізації структури генеруючих потужностей ОЕС України, забезпечувати її необхідну маневреність, гнучкість і надійність. Використання запропонованої у статті моделі ГЕС можливе як складової частини моделі електроенергетичної системи.

1. Програма розвитку гідроенергетики на період до 2026 року <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/552-2016-%D1%80>
2. *Потапшик С.И.* О стратегических направлениях развития гидроэнергетики Украины на период до 2030 г. /Энергетика и электрификация. – 2005. – № 7.
3. *Литвінов В.В.* Оптимізація розподілу навантаження між електростанціями каскаду ГЕС, які працюють в САРЧП // Гідроенергетика України, 2018, № 3–4, С.56-60.
4. *Ландау Ю.А.* и др. Гидроэнергетика и окружающая среда. – Киев: Либра, 2004.
5. *Асарин А.Е., Бестужева К.Н.* Водноэнергетические расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
6. https://uhe.gov.ua/diyalnist/osnovni_pokaznyky

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3860768>

Поступила 12.09.2019р.