

ние всех упомянутых принципов, в единой управленческой концепции является достаточно сложной задачей. Анализ подходов Iran Khodro к выпуску своей продукции показывает, что для достижения превосходства в качестве в условиях современной экономики, нужно находить в основном в применение знаний, инновации и обучение. Это хороший пример, который может быть заимствован, для методов управления, принятый в качестве аксиомы менеджерами в автомобильных компаниях развивающихся стран.

Список литературы: 1. Никитина, Н. В. Управление качеством машиностроительной продукции на основе маркетингового подхода, 2003 г. [Электронный ресурс]: автореферат диссертации [Текст] / Н. В. Никитина; – Режим доступа: <http://economy-lib.com/upravlenie-kachestvom-mashinostroitelnoy-produktsii-na-osnove-marketingovogo-podhoda#ixzz3vFae8Kzx>. – Название с экрана. – Дата обращения: 17.03.2016. 2. Икрам, Сабиров. Иранский автопром — амбициозные цели и сложные реалии [Текст] / Сабиров Икрам // Иранский автопром — амбициозные цели и сложные реалии: интернет-журн. – 2010. – Вып. 4. – 13 с. – Библиогр.: [Электронный ресурс]: <http://regnum.ru/news/1872149.html>– Назва з екрану. <http://regnum.ru/news/1872149.html> 3. Juran, J. M. Juran's Quality Handbook [Текст] / Juran J. M., Godfrey A. B. – 5-th ed. – McGraw-Hill, 1998. – 1730 p. 4. Иран Ходро - крупнейший производитель автомобилей в Иране. [Электронный ресурс] / Иран Ходро - крупнейший производитель автомобилей в Иране: [Электронный ресурс]: Название с экрана. <http://www.investiran.com.ua/index.php/economy-of-iran/avtomobili/155-iran-khodro-krupnejshij-proizvoditel-avtomobilej-v-irane> 5. Новая версия ISO 9001:2015 [Электронный ресурс] / Методы менеджмента качества 07. 2014 г [Текст]: Системы менеджмента качества. [Электронный ресурс]: Название с экрану. – Требования: [http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9001-2015-\(rus\).pdf](http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9001-2015-(rus).pdf) 6. Фатхутдинов, Р. А. Инновационный менеджмент : учебник для ВУЗов [Текст] / Р. А. Фатхутдинов. – [4-е изд.]. – М. : ЗАО «Бизнес-школа «Интел-Синтез», 2003. – 400 с. 7. Кросби, Ф. Б. Качество бесплатно. Искусство убеждать в необходимости качества [Текст] / Ф. Б. Кросби. – Нью-Йорк : МакГро-Хилл, 1979. – 309 с. 8. Пичурин, И. И. Сущность понятия «качество» [Текст] / И. И. Пичурин // Стандарты и качество. – 2002. – № 8. – С. 62–63. 9. Степанов, А. В. О терминологии и процессном подходе [Текст] / А. В. Степанов // Стандарты и качество. – 2007. – № 1. – С. 84–88. 10. Управление качеством и ISO 9000 [Электронный ресурс] / Управление качеством и ISO 9000 [Электронный ресурс]: Название с экрану: http://www.cfin.ru/management/iso9000/iso9000_tech.shtml 11. Труш, Ю. Я. Обгрунтування основних шляхів підвищення управління якістю продукції [Текст] / Ю. Я. Труш // Формування ринкових відносин в Україні. – 16949/0.

2011. – № 8. – С. 91–94. 12. Wuensch, Karl L. (October 4, 2005). «What is a Likert Scale? and How Do You Pronounce 'Likert?'».[Текст] / Karl L. Wuensch // East Carolina University. Retrieved April 30, 2009. 13. Разъяснения по шкале Лайкерта. [Электронный ресурс] / Разъяснения по шкале Лайкерта : интернет-журн. – Режим доступа: <https://ru.surveymonkey.com/mp/likert-scale/>. 14. Автомобильная промышленность [Электронный ресурс] / Автомобильная промышленность : интернет-журн. – Режим доступа: <http://www.bsigroup.com/ru-RU/ISO-TS-16949/0>.

Bibliography (transliterated): 1. Nikitina, N. V. (2016). Upravlenie kachestvom mashinostroitelnoy produkcii na osnove marketingovogo podhoda, 2003 g. [Elektronnyj resurs]: avtoreferat dissertacii. Rezhim dostupa: <http://economy-lib.com/upravlenie-kachestvom-mashinostroitelnoy-produktsii-na-osnove-marketingovogo-podhoda#ixzz3vFae8Kzx>. Nazvanie s ekrana. Data obrasheniya:17.03.2016. 2. Ikram, Sabirov. (2010). Iranskiy avtoprom — ambicioznye celi i slozhnye realii. Iranskiy avtoprom — ambicioznye celi i slozhnye realii: internet-zhurn, Vyp. 4, 13. Bibliogr.: [Elektronnyj resurs]: <http://regnum.ru/news/1872149.html>– Nazva z ekranu. <http://regnum.ru/news/1872149.html>. 3. Juran, J. M., Godfrey, A. B. (1998). Juran's Quality Handbook. 5-th ed. McGraw-Hill, 1730. 4. Iran Khodro – krupnejshij proizvoditel avtomobilej v Irane: [Elektronnyj resurs]: Nazvanie s ekranu. <http://www.investiran.com.ua/index.php/economy-of-iran/avtomobili/155-iran-khodro-krupnejshij-proizvoditel-avtomobilej-v-irane>. 5. NOVAYa VERSIYa ISO 9001:2015[Elektronnyj resurs] / METODY MENEDZHMENTA KACHESTVA 07. 2014 g: Sistemy menedzhmenta kachestva. [Elektronnyj resurs]: Nazvanie s ekranu. Trebovaniya: [http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9001-2015-\(rus\).pdf](http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9001-2015-(rus).pdf). 6. Fatxutdinov, R. A. (2003). Innovacionnyj menedzhment : uchebnik dlya VUZov. [4-e izd.]. Moscow : ZAO «Biznes-shkola «Intel-Sintez», 400. 7. Krosbi, F. B. (1979). Kachestvo besplatno. Iskustvo ubezhdat v neobxodimosti kachestva. Nyu-York : MakGro-Xill, 309. 8. Pichurin, I. I. (2002). Sushhnost ponyatiya «kachestvo». Standarty i kachestvo, № 8, 62–63. 9. Stepanov, A. V. (2007). O terminologii i processnom podhode. Standarty i kachestvo, № 1, 84–88. 10. Upravlenie kachestvom i ISO 9000 [Elektronnyj resurs] / Upravlenie kachestvom i ISO 9000 [Elektronnyj resurs]: Nazvanie s ekranu: http://www.cfin.ru/management/iso9000/iso9000_tech.shtml. 11. Trush, Yu. Ya. (2011). Obruntuvannya osnovnix shlyaxiv pidvishhennya upravlinnya yakistyu produkcii. Formuvannya rinkovix vidnosin v Ukraïni, № 8, 91–94. 12. Wuensch, Karl L. (2009). «What is a Likert Scale? and How Do You Pronounce 'Likert?'». East Carolina University. Retrieved April 30. 13. Razyasneniya po shkale Lajkerta : internet-zhurn. Rezhim dostupu: <https://ru.surveymonkey.com/mp/likert-scale/>. 14. Avtomobilnaya promyshlennost [Elektronnyj resurs] / Avtomobilnaya promyshlennost : internet-zhurn. Rezhim dostupu: [http://www.bsigroup.com/ru-RU/ISO-TS-](http://www.bsigroup.com/ru-RU/ISO-TS-16949/0)

Поступила (received) 20.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хади Аминэ – Аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Кафедра 303 - авиационных приборов и измерений, ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61000; e-mail: hadiamineh@hotmail.com.

УДК 621.224

В. В. ЛІТВІНОВ, Є. В. ГАЛЬКО

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ГІДРОАГРЕГАТАМИ З НЕІДЕНТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТУРБІН

В статті досліджено проблему роботи гідроагрегатів у системі САРЧП та запропоновано її вирішення шляхом удосконалення методу розподілу навантаження між гідроагрегатами при роботі в САРЧП. Удосконалення методу полягає в тому, що на гідроелектростанціях, які мають неідентичні характеристики турбін навантаження між агрегатами розподіляється виходячи з умови максимізації загальностанційного ККД та мінімізації кількості перевідних режимів. Для розв'язання сформованої оптимізаційної задачі використано генетичний алгоритм.

Ключові слова: гідроагрегат, турбіна, оптимізація, завдання потужності, генетичний алгоритм, ГРАП, загальностанційний ККД.

© В. В. Литвінов, Є. В. Галько. 2015

Вступ. Починаючи з 90-х років ХХ століття в електроенергетичній системі України дуже гостро стоїть проблема забезпечення балансу між генерацією та споживанням електричної енергії в умовах необхідності підтримання нульового сальдо за міждержавними перетоками електроенергії та забезпечення якості електроенергії, в першу чергу за частотою.

Останнім часом вирішення цієї проблеми ускладнилось через зниження генерації теплових електростанцій України внаслідок дефіциту первинного палива. Найбільш ефективним рішенням цієї проблеми є використання маневрових потужностей гідроелектростанцій (ГЕС) Дніпровського та Дністровського каскаду, а також гідроакumuлюючих електростанцій (ГАЕС).

В 2003 році в електроенергетичну систему України було введено в експлуатацію систему автоматичного регулювання частоти та активної потужності (САРЧП) [1], основним призначенням якої є регулювання перетоків активної потужності між Україною та сусідніми державами з корекцією за частотою. Ключову роль в САРЧП України відіграють ГЕС. Алгоритм роботи САРЧП реалізовано таким чином, щоб мати оптимальну кількість генераторів, що працюють в генераторному режимі. В логіку роботи закладена пріоритетність включення та зупинення гідроагрегату. Зупинений гідроагрегат з найвищим пріоритетом буде запущено першим, а працюючий з найнижчим пріоритетом буде зупинений першим. Пріоритетність пуску/зупинення кожного агрегату встановлює оперативний персонал ГЕС [1].

Десятирічний досвід експлуатації САРЧП показав, що використання гідрогенераторів в системі групового регулювання активної потужності (ГРАП) призводить до погіршення їхнього технічного стану, швидкого зношення ресурсу вузлів гідроагрегата та зростання кількості несправностей внаслідок збільшення кількості перевідних режимів та роботи гідравлічних турбін в неоптимальних режимах [2]. Наслідками роботи гідроагрегатів в режимі ГРАП є:

- погіршення температурних та вібраційних показників генераторів;
- зростання кількості відмов допоміжного обладнання (насоси МНУ, компресори режиму синхронного компенсатора);
- почастішання випадків електричного пробую обмотки статора;
- більш швидке кавітаційне зношення робочого колеса турбіни;
- посилення протікань води при закритому положенні направляючого апарату.

Таким чином, задача удосконалення режиму ГРАП на ГЕС шляхом зниження кількості перевідних режимів гідроагрегатів та оптимізації їхніх енергетичних режимів є актуальною.

Аналіз сучасного стану проблеми. В САРЧП алгоритм роботи закладено таким чином, щоб мати оптимальну кількість генераторів, що працюють в генераторному режимі. В логіку роботи закладена пріоритетність включення та зупинення гідроагрега-

ту. Зупинений гідроагрегат з найвищим пріоритетом буде запущено першим, а працюючий з найнижчим пріоритетом буде зупинений першим. Пріоритетність пуску/зупинення кожного агрегату встановлює оперативний персонал ГЕС [1]. При цьому на оперативний персонал (осіб, що приймають рішення) покладається додаткова відповідальність за правильний вибір агрегатів для встановлення в систему ГРАП та їхньої пріоритетності з урахуванням фактичного технічного стану.

Класичний підхід до оптимального розподілення активної потужності між гідроагрегатами ГЕС полягає в рівномірному розподілі завдання за активною потужністю між всіма гідроагрегатами ГЕС за умови що характеристики всіх турбін на ГЕС однакові [2,3]. В цьому випадку відносні прирости розходу води за однакового напору ($H=\text{const}$) будуть рівними між собою:

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n. \quad (1)$$

Виходячи з цього, при наявності завдання активної потужності для ГЕС $P_{зад}$, оптимальний розподіл потужності між гідроагрегатами виглядає наступним чином:

$$P_{z/a} = \frac{P_{зад}}{n}, \quad (2)$$

де n - кількість гідроагрегатів на ГЕС, що знаходяться в роботі.

Цей спрощений метод розподілу потужностей між гідроагрегатами ГЕС не враховує наступні особливості:

1) можливу неоднаковість характеристик турбін ГЕС (наприклад, якщо на ГЕС відбувається реконструкція енергетичного обладнання і частина турбін вже замінена або модернізована, а частина – ні);

2) наявність у гідравлічних турбін зони нерекондованої експлуатації, яка в залежності від типу турбіни складає $[(0,1\dots0,3)P_{ном}; (0,6\dots0,9)P_{ном}]$.

Для врахування цих факторів в роботі [4] запропоновано оптимізаційні алгоритми управління складом гідроагрегатів на основі методів «гілок і границь» і «динамічного програмування». Методи, засновані на принципі пошуку оптимального рішення по одному домінуючому критерію – критерію економічності режиму роботи гідроагрегатів. Такий підхід є досить простим і зручним, а також не вимагає великих обчислювальних потужностей, однак він не завжди дозволяє отримати ефективне рішення в такій багатокритеріальній та слабкоструктурованій системі як ГЕС [5].

Для врахування особливостей і цілей управління, індивідуальних для кожної ГЕС, в роботі [5] була розроблена процедура ідентифікації цілей управління. Проведення процедури ідентифікації для кожної конкретної станції дозволять формалізувати стратегію двохкритеріального управління агрегатами ГЕС у вигляді логіко-множинної операції, вид якої визначається на основі ступеня пріоритетності параметрів експлуатаційної надійності і економічності режиму роботи агрегатів.

Також проблема оптимального розподілу навантаження між агрегатами ГЕС розглядається у статті [2]. Автором запропоновано розподілення навантаження між агрегатами ГЕС за якого усереднений ККД гідроагрегатів буде максимальним. Залежності ККД турбін від потужності $\eta_i(P_i)|_{H=H_{роб}}$, за якими формується цільова функція усередненого ККД:

$$F = \left(\sum_{i=1}^n \eta_i(P_i)|_{H=H_{роб}} \right) / n, \quad (3)$$

визначаються шляхом апроксимації перетинів експлуатаційних характеристик турбін при фіксованому значенні напору $H=const$. Для вирішення сформульованої в [2] оптимізаційної задачі через значну нелінійність цільової функції та велику кількість обмежень у формі нерівностей, застосовано генетичний алгоритм [6, 7].

Розроблений у [2] метод є достатньо ефективним при неідентичних характеристиках турбін. В той же час, усереднений ККД, який є середнім арифметичним ККД усіх агрегатів не досить наглядно відображає ефективність даного методу через те, що в рівній мірі враховує ККД гідроагрегатів, завантажених на повну потужність та частково завантажених. Тому цей метод потребує удосконалення шляхом визначення та обґрунтування більш інформативної цільової функції, яка буде позбавлена вказаного вище недоліку.

Мета і задачі дослідження. Метою даного дослідження є удосконалення процесу групового регулювання активної потужності на ГЕС шляхом визначення оптимального розподілу навантаження між гідроагрегатами з урахуванням індивідуальних експлуатаційних характеристик турбін. У відповідності до визначеної мети, в роботі поставлено наступні завдання:

- удосконалення методу розподілу активного навантаження між гідроагрегатами, що працюють у ГРАП, на станціях, які мають неідентичні характеристики турбін за критеріями максимізації загальностанційного ККД та мінімізації кількості перевідних режимів;
- вирішення сформованої оптимізаційної задачі групового регулювання гідроагрегатів ГЕС з використанням генетичного алгоритму та обґрунтуванням його оптимальної структури.

Метод розподілу активного навантаження між агрегатами ГЕС. Одним з основних показників, який характеризує ефективність роботи ГЕС в цілому є загальностанційний ККД, який представляє собою відношення сумарної потужності генераторів, що працюють в генераторному режимі, до сумарної потужності первинного енергоносія, підведеного до гідротурбін. Враховуючи те, що ККД гідроагрегату визначається як відношення вихідної потужності на валу i -го генератора $P_{вих}$ до вхідної потужності, підведеної до i -ї гідротурбіни $P_{вх}$:

$$\eta_i = \frac{P_{вих-i}}{P_{вх-i}}, \quad (4)$$

загальностанційний ККД визначається відношенням сумарної потужності агрегатів, що працюють, до сумарної підведеної потужності гідротурбіни:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n P_{вих-i}}{\sum_{i=1}^n P_{вх-i}}, \quad (5)$$

де n – кількість гідроагрегатів між якими розподіляється навантаження.

Якщо підставити (4) в (5):

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n P_{вих-i}}{\sum_{i=1}^n P_{вих-i} / \eta_i}. \quad (6)$$

Вираз (6) представляє собою цільову функцію, яку необхідно максимізувати за умови, що напір дорівнює робочому значенню на момент розподілу навантаження між агрегатами $H=H_{роб}$:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n P_{вих-i}}{\sum_{i=1}^n P_{вих-i} / \eta_i(P_{вих-i})|_{H=H_{роб}}} \rightarrow \max. \quad (7)$$

Із завдання активної потужності для ГЕС $P_{зад}$ формується обмеження у формі рівності:

$$P_{зад} = \sum_{i=1}^n P_{вих-i}. \quad (8)$$

З урахуванням діапазонів рекомендованої роботи гідроагрегатів формуються обмеження у вигляді нерівностей загальною кількістю n :

$$P_{ном-i} \leq P_i \leq P_{рек-i}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (9)$$

Для вирішення сформованої оптимізаційної задачі через нелінійність цільової функції та велику кількість обмежень у формі нерівностей, застосовано генетичний алгоритм [7, 8]. Схема роботи генетичного алгоритму наступна. Оптимізаційна задача (цільова функція) формалізується таким чином, щоб її рішення можна було представити у вигляді вектору генів $P_i = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, кожен з яких є певним числом. За допомогою генератора випадкових чисел формується множина генотипів початкової популяції. Кожен елемент в популяції має певний рівень якості, який характеризується значенням цільової функції. Ці значення оцінюються з використанням «функції пристосованості» [9, 10].

З отриманої множини рішень з урахуванням значення «пристосованості» обираються рішення до яких застосовуються генетичні оператори «схрещування» та «мутація», в результаті чого отримуються нові рішення. Для них також визначається пристосованість та проводиться відбір кращих рішень у наступне покоління, і т. д. Якщо виконуються умови закінчення циклу – останнє покоління приймається в якості рішення, якщо ні – цикл виконується знову.

Рішенням є вектор значень режимних потужностей гідроагрегатів:

$$\bar{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}, \quad (10)$$

де n - кількість агрегатів, що знаходяться в роботі.

В загальному випадку, кількість агрегатів на ГЕС m може бути більшою, ніж задіяна у системі ГРАП n . При цьому загальний вектор завантаження агрегатів ГЕС прийме вигляд:

$$\bar{P}_{ГЕС} = \{P_1, P_2, \dots, P_n, 0_{n+1}, \dots, 0_m\}. \quad (11)$$

У випадку коли завдання потужності для ГЕС $P_{зад}$ мале, то можливим є виникнення нульових елементів серед n перших елементів множини вектора $\bar{P}_{ГЕС}$:

$$\bar{P}_{ГЕС} = \{P_1, P_2, \dots, 0_i, \dots, P_n, 0_{n+1}, \dots, 0_m\}. \quad (12)$$

Нульові значення елементів свідчать, що для виконання завдання $P_{зад}$ певна кількість агрегатів має або знаходитись в режимі синхронного компенсатора, або бути відключена від мережі.

Для отримання математичного виразу цільової функції оптимізаційної задачі необхідно визначити з експлуатаційних характеристик гідроагрегатів аналітичні залежності ККД від потужності турбіни за робочого значення напору $\eta_{i,j}(P_{i,j})_{|H=H_{роб}}$. За експлуатаційними характеристиками для перетину $H = H_{роб}$ визначається множина точок $\eta_{i,j}(P_{i,j})$, $i=1, \dots, m$. Отримані пари значень $\eta_{i,j}(P_{i,j})$ апроксимуються аналітичною залежністю – поліномом k -го порядку, де ступінь поліному визначається наступними умовами:

- коефіцієнт кореляції апроксимованої функції та множини пар значень $\eta_{i,j}(P_{i,j})$ має бути $R^2 > 0,99$;
- графік апроксимуючої функції має бути максимально наближений до графіку, побудованого по

дискретним значенням $\eta_{i,j}(P_{i,j})$ не тільки в області наявних дискретних точок, але й в інтервалах між ними.

Приклад розподілу навантаження між агрегатами ГЕС. В якості прикладу розглянемо оптимізацію режиму групового регулювання активної потужності на Дніпровській ГЕС-1.

На Дніпровській ГЕС-1 встановлено три турбіни F-193 (США, потужність за розрахункового напору $P_{ном} = 65$ МВт) та шість турбін РО45-В-545 (Україна, потужність за розрахункового напору $P_{ном} = 72$ МВт). Їхні експлуатаційні характеристики приведені на рис.1 та 2.

З рис. 1 та 2 видно, що експлуатаційні характеристики турбін Дніпровської ГЕС-1 значно відрізняються одна від одної. Зони рекомендованої роботи для них складають:

- 1) для турбіни F-193 [42...65] МВт;
- 2) для турбіни РО45-В-545 [43...72] МВт.

Необхідно виконати оптимальне розподілення навантаження $P_{зад} = 100$ МВт між гідроагрегатами Дніпровської ГЕС, що працюють у режимі ГРАП. Згідно до алгоритму ГРАП [1], таке завдання по навантаженню розподіляється між $n=2$ гідроагрегатами. Відповідно до заданого оперативним персоналом Дніпровської ГЕС пріоритету гідроагрегатів у системі ГРАП, найвищий пріоритет мають гідроагрегати №2 (турбіна типу F-193) та №7 (турбіна типу РО45-В-545).

Для формування цільової функції, за експлуатаційними характеристиками турбін F-193 та РО45-В-545 визначаються множини значень $\eta_{i,j}(P_{i,j})$, $j=1, \dots, 12$, для робочого значення напору $H=36$ м. Визначені множини зведені в табл. 1.

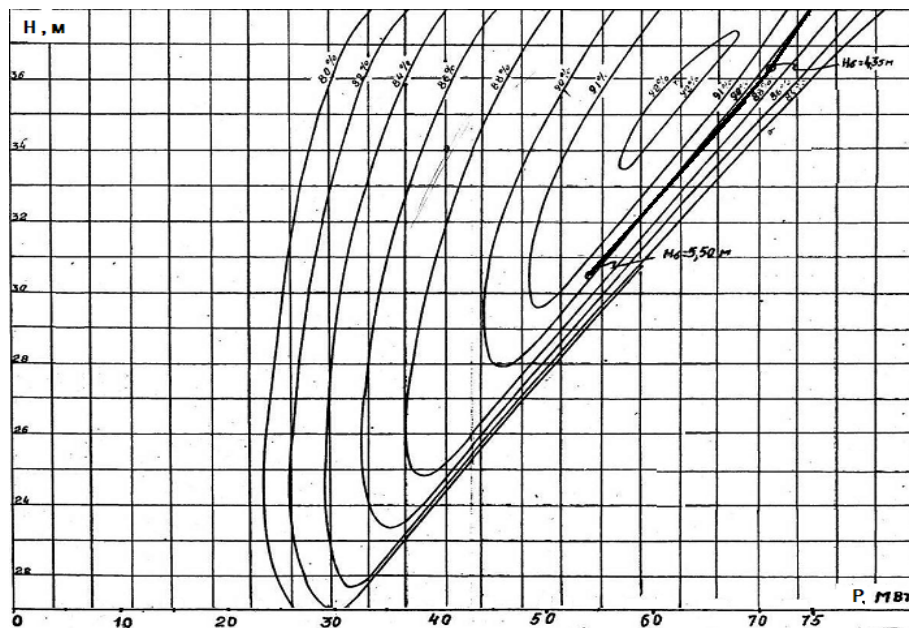


Рис. 1 – Експлуатаційна характеристика радіально-осьової турбіни F-193

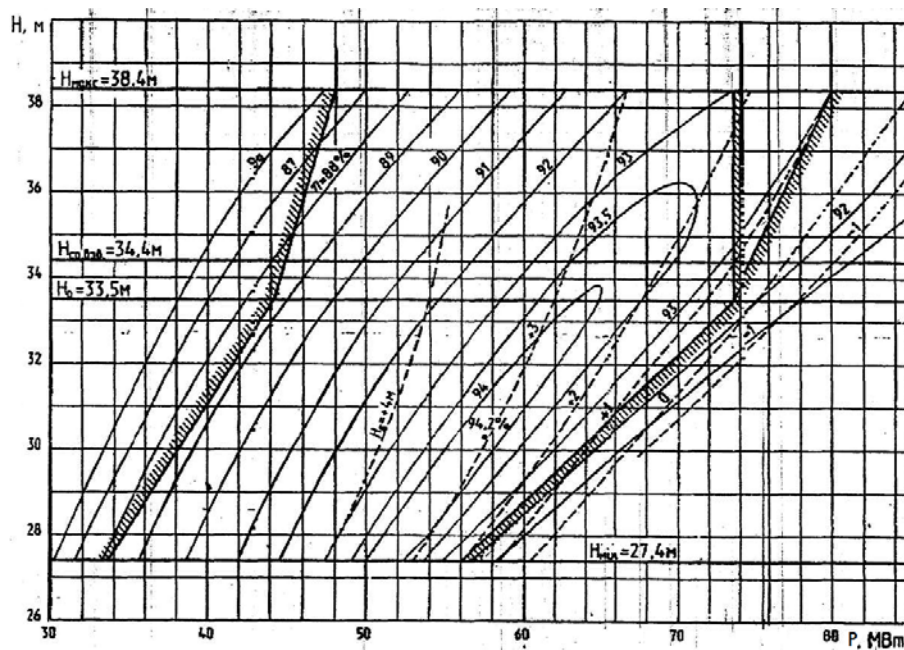


Рис. 2 – Експлуатаційна характеристика радіально-осьової турбіни РО45-В-545

Таблиця 1 – Множини $\eta_{ij}(P_{ij})$ для робочого значення напору 36 м

j	F-193		РО45-В-545	
	P_{1j} , МВт	η_{1j} , %	P_{2j} , МВт	η_{2j} , %
1	31	80	44,5	87
2	32	82	47	88
3	36,5	84	50	89
4	41	86	53,5	90
5	45,5	88	57	91
6	51	90	60,5	92
7	53,5	91	65	93
8	61	92	69	93,5
9	63,5	92	71	93,5
10	67	91	76	93
11	70	88	44,5	87
12	71,5	86	47	88

Отримана множина значень $\eta_{1j}(P_{1j})$ для турбіни F-193 з достатньою точністю апроксимується поліномом 5-го порядку ($R^2 > 0,994$):

$$\eta_1(P_1) = -9,03 \cdot 10^{-8} \cdot P_1^5 - 59,43 \cdot 10^{-7} \cdot P_1^4 + 3106,6651 \cdot 10^{-6} \cdot P_1^3 - 26695,82841 \cdot 10^{-5} \cdot P_1^2 + 95494,021519 \cdot 10^{-4} \cdot P_1 - 43,4438966122. \quad (13)$$

Множина значень $\eta_{2j}(P_{2j})$ для турбіни РО-45-В-545 – апроксимується поліномом 3-го порядку з коефіцієнтом кореляції $R^2 > 0,9989$:

$$\eta_2(P_2) = -252 \cdot 10^{-4} \cdot P_2^3 - 37,776 \cdot 10^{-3} \cdot P_2^2 + 1,559088 \cdot P_2 - 103,871904. \quad (14)$$

Якщо необхідно розподілити завдання $P_{\text{зад}} \text{ МВт}$ між $n=2$ гідроагрегатами Дніпровської ГЕС, що підключені до системи ГРАП, за робочого напору 36 м.

Цільова функція, приймає вигляд:

$$F = \frac{P_1 + P_2}{\frac{P_1}{\eta_1} + \frac{P_2}{\eta_2}} \Big|_{H=36} \rightarrow \max. \quad (15)$$

Обмеження у вигляді рівності:

$$100 = P_1 + P_2. \quad (16)$$

Обмеження у вигляді нерівностей:

$$65 \geq P_1 \geq 42, \quad (17)$$

$$72 \geq P_2 \geq 43. \quad (18)$$

Для розв'язання отриманої оптимізаційної задачі в MATLAB використано стандартний «солвер» Genetic Algorithm. За допомогою генератора випадкових чисел сформовано початкову популяцію можливих рішень з урахуванням обмежень (17) і (18). Початкова популяція приведена у табл. 2.

У результаті проведеного дослідження були отримані значення оптимального розподілу навантаження, які приведені у табл. 3.

Таблиця 2 – Початкова популяція рішень

№	P ₁ , МВт	P ₂ , МВт	P ₃ , МВт	P ₄ , МВт	P ₅ , МВт	P ₆ , МВт
1	51,9	48,1	0	0	0	0
2	56,7	43,3	0	0	0	0
3	48,7	51,3	0	0	0	0
4	52,7	47,3	0	0	0	0
5	49,7	50,3	0	0	0	0
6	45,8	54,2	0	0	0	0
7	43,3	56,7	0	0	0	0
8	55	45	0	0	0	0
9	45,9	54,1	0	0	0	0
10	54,5	45,5	0	0	0	0
11	47,1	52,9	0	0	0	0
12	46,3	53,7	0	0	0	0
13	47,1	52,9	0	0	0	0
14	45,7	54,3	0	0	0	0
15	43,6	56,4	0	0	0	0
16	53,9	46,1	0	0	0	0
17	47,3	52,7	0	0	0	0
18	43	57	0	0	0	0
19	52,8	47,2	0	0	0	0
20	48,1	51,9	0	0	0	0

Таблиця 3 – Результати проведеного дослідження щодо оптимального розподілу навантаження між агрегатами

Пріоритетність у ГРАП					
№2	№7	№8	№1	№4	№5
P ₁ , МВт	P ₂ , МВт	P ₃ , МВт	P ₄ , МВт	P ₅ , МВт	P ₆ , МВт
56,95	43,05	0	0	0	0

За такого розподілу навантаження цільова функція (загальностанційний ККД) досягає свого максимуму та дорівнює **92,36%**.

Для порівняння визначено загальностанційний ККД при рівномірному розподіленні навантаження $P_{\text{зад}}=100$ МВт між гідроагрегатами №2 та №7. ($P_1=P_2=50$ МВт). Такий розподіл навантаження дає загальностанційний ККД **88,98 %**.

Таким чином, підвищення загальностанційного ККД при розподілі навантаження між агрегатами за запропонованим методом складає **3,38%**.

Нижче приведено порівняльний аналіз результатів рівномірного та оптимізованого розподілу навантаження між гідроагрегатами Дніпровської ГЕС-1 у системі ГРАП (табл. 4). Дослідження проводились: а) за різних значень навантаження що розподіляється; б) за різних робочих напорів, в) за різного складу агрегатів (за характеристиками турбін) у системі ГРАП.

Таблиця 4 – Результати проведених досліджень

Напір	Склад агрегатів	Завдання за потужністю		N*	Завдання за потужністю		N	Завдання за потужністю		N	Завдання за потужністю		N
		100		2	200		4	300		5	400		6
		P*	O*	Δ*	P	O	Δ	P	O	Δ	P	O	Δ
34	1/5	90,44	92,72	2,28	90,44	91,69	1,25	92,74	92,8	0,06	92,83	93,27	0,44
	2/4	90,49	92,44	1,95	90,49	91,35	0,86	92,52	92,75	0,23	92,12	92,89	0,77
	3/3	90,55	92,14	1,59	90,55	91,79	1,24	92,29	92,78	0,49	91,42	92,24	0,82
35	1/5	89,6	91,91	2,31	89,6	90,6	1	92,25	92,26	0,01	92,84	92,98	0,14
	2/4	89,67	92,02	2,35	89,67	91,38	1,71	91,94	92,47	0,53	92,31	92,47	0,16
	3/3	89,74	91,99	2,25	89,74	90,87	1,13	91,64	92,02	0,38	91,77	91,89	0,12
36	1/5	88,98	92,36	3,38	88,98	90,97	1,99	91,95	92,29	0,34	92,95	93,14	0,19
	2/4	89,11	92,16	3,05	89,11	91,08	1,97	92,02	92,07	0,05	92,73	93,06	0,33
	3/3	89,23	92,2	2,97	89,29	91,08	1,79	92,08	92,47	0,39	92,51	92,89	0,38

У табл. 4: P* - рівномірний розподіл навантаження, %; O* - оптимальний розподіл навантаження, %; N* - кількість задіяних у ГРАП агрегатів, шт.; Δ* - різниця ККД між рівномірним розподілом навантаження та оптимальним, %.

Висновки. Розроблений метод розподілу заданої потужності між гідроагрегатами ГЕС дає можливість отримати оптимальне навантаження гідроагрегатів у випадку, якщо характеристики їхніх турбін відрізняються, що дає техніко-економічний результат –

підвищення загальностанційного ККД ГЕС, що працює у системі ГРАП.

За даними результатами також можна побачити, що при максимально можливих значеннях навантаження підвищення загальностанційного ККД складає 0,1...0,5 %. Це пов'язано з тим, що при максимальному навантаженні всі агрегати, які працюють в системі ГРАП, досягають свого номінального значення, що дозволяє машина працювати з найвищим ККД. Разом з цим, зі зменшенням заданого навантаження оптимальний розподіл дає результати від 1% до 2,5%, а в деяких випадках сягає більше 3%, що підтверджує ефективність застосування генетичного алгоритму для оптимізації групового регулювання активної потужності на ГЕС. При цьому забезпечується найвигідніший для заданої потужності та складу агрегатів загальностанційний ККД, що дозволяє зменшити витрати води на вироблення електроенергії.

Також цей метод дає можливість знизити кількість перевідних режимів гідроагрегатів через те, що у кожного гідроагрегату використовується весь рекомендований діапазон потужностей. Це дозволить полегшити роботу допоміжного обладнання ГЕС (регулятори швидкості, масло-напірні установки, компресорів відтискання води з камер робочих коліс гідроагрегатів, тощо).

Для покращення режимів експлуатації гідроагрегатів ГЕС у ГРАП важливим питанням є визначення пріоритетності включення/зупинки гідроагрегатів, причому пріоритет повинен базуватися на реальному технічному стані гідроагрегатів. Тому подальший розвиток досліджень у цьому напрямку передбачає розроблення моделей визначення пріоритету гідроагрегатів у ГРАП шляхом врахування стану основного та допоміжного обладнання ГЕС.

Список літератури: 1. *Редин, В. И.* Принципы построения и организация взаимодействия системы SCADA/AGC – Centralog ГЭС [Текст] / *В. И. Редин, А. Г. Баталов, Ю. Н. Бондаренко, Д. А. Олефир, А. Г. Денисенко* // Электрические сети и системы. – 2004. – № 3. – С. 3–8. 2. *Литвінов, В. В.* Оптимізація групового регулювання активної потужності на гідроелектростанціях за допомогою гене-

тичного алгоритму / *В. В. Литвінов* [Текст] // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. Технічні науки. – 2015. – Вип. 3(71), Ч. 1. – С. 190–195. 3. *Арзамасцев, Д. А.* АСУ и оптимизация режимов энергосистем [Текст] / *Д. А. Арзамасцев, П. И. Бартоломей, А. М. Холян.* – М.: Высшая школа, 1983. – 208 с. 4. *Филіппова, Т. А.* Алгоритмическая структура подсистемы рационального управления составом агрегатов в АСУ ГЭС [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / *Т. А. Филіппова* // АСУ энергосистем и электростанций. – 1975. – С. 4–16. 5. *Митрофанов, С. В.* Разработка системы поддержки принятия решений на основе многокритериальной оптимизации состава агрегатов ГЭС: дис. ... канд. тех. наук [Текст] / *С. В. Митрофанов.* – Красноярск, 2013. – 213 с. 6. *Гладков, Л. А.* Биоинспирированные методы в оптимизации [Текст] / *Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик.* – М.: Физматлит, 2009. – 384 с. 7. *Тэррано, Т.* Прикладные нечеткие системы [Текст] / *Т. Тэррано, К. Асаи, М. Сугено.* – М.: Мир, 1993. – 368 с. 8. *Balas, E.* Finding large cliques in arbitrary graphs by bipartite matching. Cliques, coloring, and satisfiability [Text] / *E. Balash, W. Niehaus* // DIMACS Discrete Mathematical Theoretical Computer Science. – 1996. – Vol. 26. – P. 29–49. 9. *Potumeyn, A. П.* Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / *А. П. Потумейн.* – Вінниця: ВНТУ, 1999. – 320 с. 10. *Рутковская, Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / *Д. Рутковская, Л. Рутковский.* – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.

Bibliography (translated): 1. *Redin, V., Batalov, A., Bondarenko, Yu., Olefir, D., Denisenko, A.* (2004). Printsipy postroeniya i organizatsii vzaimodejstviya sistemy SCADA/AGC – Centralog GES. Elektricheskie seti i sistemy, 3, 3–8. 2. *Litvinov, V.* (2015). Optimizatsiya grupovogo regulirovaniya aktivnoi potuzhnosti na gidroelektrostantsiyah za dopomogyu genetichnogo algoritmu. Visnyk Natsionalnogo universytetu vodnogo gospodarstva ta pryrodokorystuvannya, 3(71), 190–195. 3. *Arzamastsev, D., Bartolomej, P., Holian, A.* (1983). ASU i optimizatsiya rezhimov energosistem. Moscow: Vysshaya shkola, 208. 4. *Filippova, T.* (1975). Algoritmicheskaya struktura podsystemy ratsionalnogo upravleniya sostavom agregatov v ASU GES. ASU system i elektrostantsiy, 4–16. 5. *Mitrofanov, S.* (2013). Razrabotka sistemy priniatia resheniy na osnove mnogokriterialnoy optimizatsii sostava agregatov GES. Krasnoyarsk, 213. 6. *Gladkov, L., Kureichik, V., Kureichik, V.* (2009). Bioinspirirovannye metody v optimizatsii. Moscow: Fizmatlit, 384. 7. *Terano, T.* (1993). Prikladnye nechetkie sistemy. Moscow: Mir, 368. 8. *Balas, E., Niehaus, W.* (1996). Finding large cliques in arbitrary graphs by bipartite matching. Cliques, coloring, and satisfiability. DIMACS Discrete Mathematical Theoretical Computer Science, 26, 29–49. 9. *Rotshtein, A.* (1999). Intellektualnye tehnologii identifikatsii: nechetkaya logika, geneticheskie algoritmy, nejronnye seti. Vinnytsia: VNTU, 320. 10. *Rutkovskaya, D., Rutkovskiy, L.* (2004). Nejrionnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. Moscow: Goriachaya linia – Telekom, 452.

Надійшла (received) 20.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Літвінов Володимир Валерійович – кандидат технічних наук, Запорізька державна інженерна академія, доцент кафедри гідроенергетики, просп. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006, e-mail: v.v.litvinov1985@mail.ru.

Галько Євгенія Валеріївна – магістрант, Запорізька державна інженерна академія, доцент кафедри гідроенергетики, просп. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006, e-mail: galkozhenya@yandex.ru.