

СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБОРОТНИМИ ГІДРОАГРЕГАТАМИ ГАЕС, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ ЗІ ЗМІННОЮ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Запропоновано першу вітчизняну систему управління для оборотних гідроагрегатів, які працюють зі змінною частотою обертання. Така система забезпечує всі необхідні режими роботи ГАЕС, які працюють зі змінними напорами.

Ключові слова: синтез, система управління, ГАЕС, оборотний гідроагрегат, асинхронізований синхронний генератор, електрогідравлічний регулятор, змінна частота обертання.

Вступ

Дослідження, проведені за останні кілька десятиліть зарубіжними [1—3] та вітчизняними вченими [4, 5], дали вагомий техніко-економічний обґрунтування нової ресурсозбережної технології у роботі агрегатів гідроелектростанцій зі змінними напорами. Вже ні в кого не викликає сумніву, що введення на ГАЕС режиму роботи гідроагрегату зі змінною частотою обертання та змінних напорах в генераторному режимі дозволяє підвищити їх ККД на величину 2—4 %, залежно від типу турбіни. Достовірність цих теоретичних положень доведено і на практиці в процесі реалізації пілотних проектів на ГЕС Compuerto (Іспанія) і ГАЕС Yagisawa (Японія) [6].

Результати дослідження

В [7] показано, що найкращий склад оборотних гідроагрегатів, які призначені для переведення в режим роботи зі змінною частотою обертання, повинен включати в себе радіально-осьову гідротурбіну і асинхронізований синхронний гідрогенератор (АСГГ). Такий склад енергоблоку дозволяє регулювати частоту обертання в досить широкому діапазоні (до $\pm 30\%$) [8].

Потужні асинхронізовані генератори, що з'явилися останнім часом в Україні та за кордоном [9], дають всі підстави говорити про реальність появи незабаром нових потужних ГАЕС, які будуть працювати зі змінними частотами обертання.

На превеликий жаль, на українських ГЕС і ГАЕС до теперішнього часу немає жодного енергоблоку, у складі якого працював би АСГГ.

Вже зараз на засіданнях науково-технічної ради асоціації «Укргідроенерго» розглядаються пропозиції про включення до складу одного з гідроагрегатів другої черги Дністровської ГАЕС замість запроєктованого раніше синхронного гідрогенератора, асинхронізованого синхронного гідрогенератора.

Для вітчизняної гідроенергетики запуск такого пілотного проекту є вкрай важливим, оскільки це дозволить на практиці детально та всебічно дослідити режими гідроагрегатів, що працюють зі змінною частотою обертання, що поклало б основу широкому впровадженню таких режимів на нових гідроелектростанціях.

Треба мати на увазі, що впровадження нових режимів на ГАЕС вимагає принципово нового підходу до проектування і створення систем управління цими агрегатами. На жаль, наразі ні в Україні, ні на території країн СНД подібні роботи не проводилися, а в зарубіжних джерелах зустрічаються тільки загальні описи таких систем, без будь-якої конкретної інформації про особливості поведінки гідроагрегатів та їх систем управління.

Що стосується таких систем, то з одного боку, вони повинні забезпечувати всі нормальні режими роботи гідроагрегату з синхронною частотою обертання робочого колеса турбіни і ротора генераторів, а також забезпечувати стійку і надійну роботу блоків при пусках і зупинках агрегатів і при зміні їх навантаження, забезпечуючи необхідну точність регулювання та якість перехідних процесів.

З іншого боку, при переході в режим «Корекції ККД за напором» система повинна виконувати роль слідкувальної системи ККД за напором, основним завданням якої має бути забезпечення такого відкриття напрямного апарата, яке забезпечить значення оптимального для цього режиму ККД, за відповідних значень напору і частоти обертання турбіни.

На кафедрі електричних станцій НТУ «ХП» протягом останнього часу проводяться роботи зі створення такої системи управління для оборотних гідроагрегатів, призначених для роботи зі змінною частотою обертання.

Розробляючи таку систему, автори брали до уваги, що АСГГ має дві взаємоперпендикулярні обмотки збудження і двоканальний регулятор. Як показала практика, така конструкція задовольняє всім необхідним вимогам до надійності, якості електроенергії та діапазону регулювання частоти на шинах генератора. Основна складність у налаштуванні регулятора системи збудження АСГГ є правильне налаштування коефіцієнтів зворотних зв'язків.

Для забезпечення нормальних режимів роботи гідротурбін ГАЕС пропонується укомплектувати їх електрогідравлічними регуляторами (ЕГР) фірми «Енергорегулятор» (м. Харків), які добре зарекомендували себе на багатьох вітчизняних і зарубіжних гідроелектростанціях. Необхідно зауважити, що структура електрогідравлічного регулятора частоти обертання турбін на сьогоднішній день добре відома і у різних фірм — виробників регуляторів практично нічим не відрізняється. З нею можна ознайомитися в будь-якій літературі з проектування регуляторів частоти гідротурбін [10], або ж на сайтах виробників.

Так як ЕГР радіально-осьової гідротурбіни за багато років експлуатації зарекомендували себе з найкращої сторони, а також враховуючи необхідність в мінімізації матеріальних витрат при впровадженні запропонованої технології, було ухвалено рішення, під час розробки нової системи управління максимально використовувати штатну конструкцію регулятора, а всі зміни і вдосконалення робити шляхом внесення певних змін в його електричну частину.

З метою розділення функцій системи управління залежно від режимів її роботи і необхідної перебудови структури регулятора, запропоновано ввести спеціальний перемикач, встановлений на виході чутливого елемента (ЧЕ) ЕГР, і назвати його фільтром режимів (ФР). Він дає можливість автоматично або вручну змінювати структуру системи управління гідроагрегата відповідно до завдань, передбачених режимами роботи цього агрегату (рис. 1).

У сталому режимі роботи енергоблоку ГАЕС ФР повинен «розривати» замкнутий контур регулювання частоти обертання, підключаючи «Коректор ККД» на вхід ЕГР, для забезпечення максимальної ефективності роботи турбіни у разі зміни її робочих напорів.

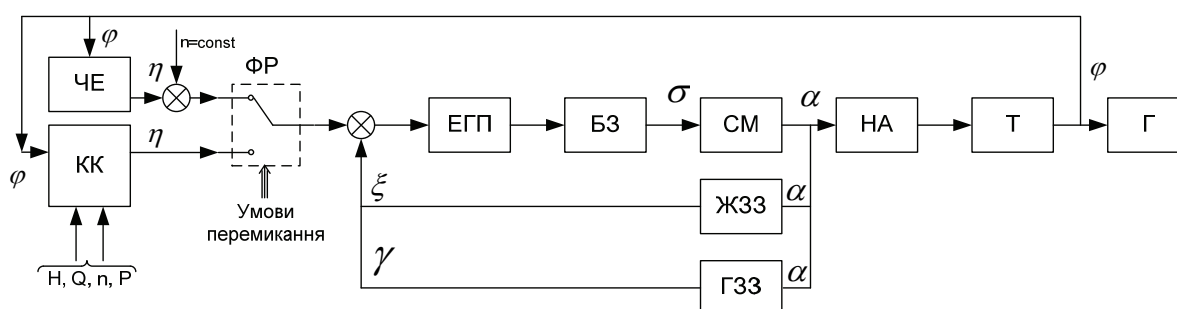


Рис. 1. Функціональна схема системи управління оборотним гідроагрегатом ГАЕС:

ЧЕ — чутливий елемент; КК — коректор ККД; ЕГП — електрогідравлічний перетворювач; БЗ — блок золотників; СМ — сервомотор; ЖЗЗ — жорсткий зворотний зв'язок; ГЗЗ — гнучкий зворотний зв'язок; НА — направляючий апарат; Т — турбіна; Г — генератор

Коректор ККД за напором аналізує величини вхідних сигналів, які надходять від давачів (напору, витрат води, частоти обертання і потужності), визначає необхідне для цього режиму найбільш оптимальне значення відкриття направляючого апарата, яке забезпечує отримання найвищого ККД турбіни за відповідної зміни напору.

Під час роботи системи управління в режимі «Корекції ККД за напором» потужність АСГГ має підтримуватися постійною за допомогою його регулятора. Це досягається за допомогою двоканальної системи збудження генератора.

Якщо ж силою різних обставин відбувається зміна навантаження гідроагрегату, викликана зов-

нішніми факторами, ФР автоматично відновлює нормальну схему регулятора, що забезпечує необхідну динаміку і необхідну якість регулювання швидкості турбіни.

Коректор ККД — це набір таблиць, в яких містяться всі комбінації змінних параметрів, і відповідні їм значення ККД, що заздалегідь прораховані за універсальними характеристиками гідротурбіни і коригуються під час пусконаладжувальних робіт на блоці.

Таким чином, коректор ККД задає необхідне відкриття направляючого апарата, що відповідає діючій частоті обертання і діючому напору, забезпечуючи при цьому максимальну ефективність роботи блоку.

Частота обертання гідротурбіни, що працює в режимі коригування ККД, в кожний момент часу буде визначатися перетином статичних характеристик генератора і турбіни (рис. 2) [11].

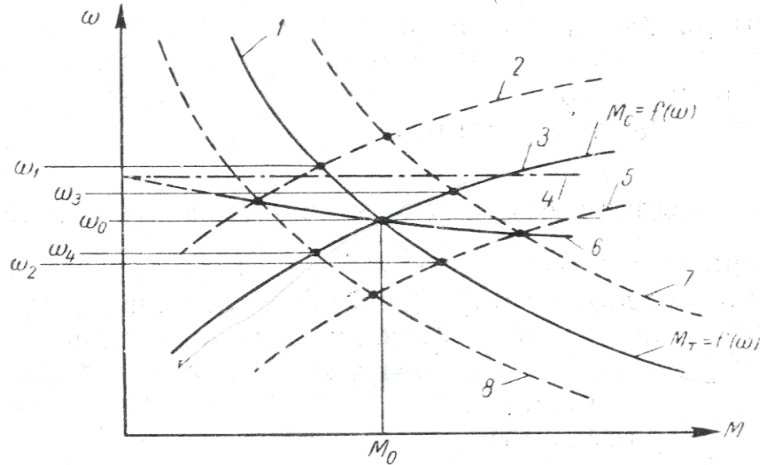


Рис. 2. Статична характеристика гідроагрегату:

$M_{T(H)}$ — момент турбіни (навантаження), Нм; ω — кутова швидкість обертання, рад/с

При цьому момент турбіни і частота її обертання зв'язані такою залежністю:

$$M_T = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H \cdot \eta}{\omega}, \quad (1)$$

де M_T — рушійний момент, Нм; γ — вага одиниці об'єму води; Q — витрата води через гідротурбіну, м³/с; H — напір, м; η — ККД; ω — кутова швидкість обертання, рад/с.

Криві 1 і 3 — це статичні характеристики турбіни і навантаження, відповідно. Точка перетину цих характеристик відповідає рівноважному, на певний момент, стану агрегату.

Зі зміною навантаження, статична характеристика зміститься в положення 2 або 5, що приведе до зміни кутової швидкості обертання з тим самим рушійним моментом.

Пропонована система регулювання забезпечує для будь-якої зміни моменту опору найбільш високий ККД турбіни з необхідною для цього частотою обертання робочого колеса.

Повна функціональна схема системи автоматичного управління гідротурбіною в режимі «Корекції ККД по напору» має вигляд, показаний на рис. 3.

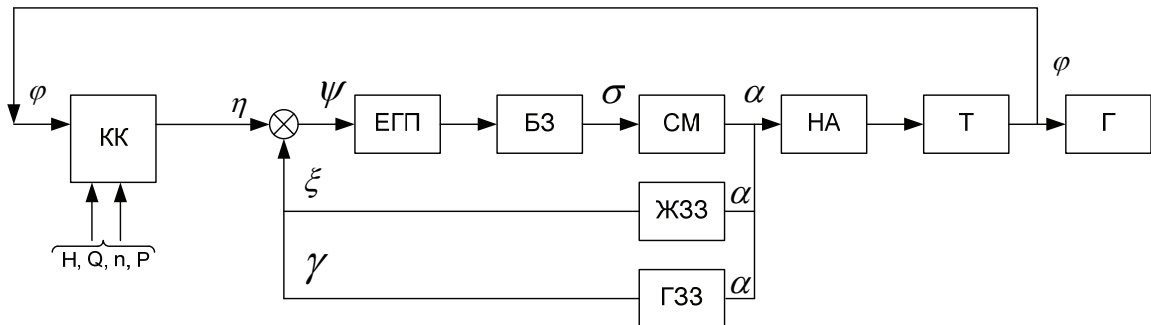


Рис. 3. Функціональна схема САУ в режимі «Корекції ККД по напору»

Структурна схема такої системи показана на рис. 4.

Загальна передаточна функція слідкуючої системи з урахуванням всіх діючих коефіцієнтів,

може бути представлена так:

$$W_s = \frac{0,053s + 1,3}{0,04s^2 + 3,96s + 26}. \quad (2)$$

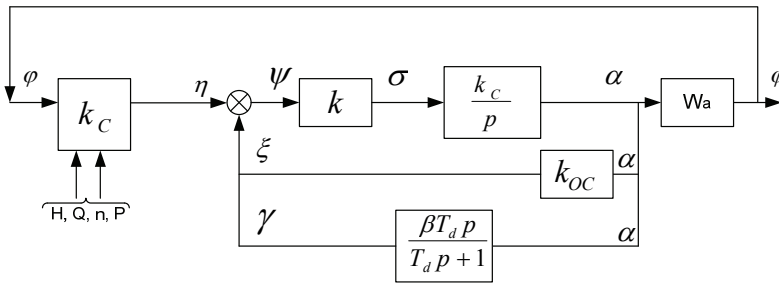


Рис. 4. Структурна схема САУ гідротурбіни в режимі «Корекції ККД за напором»

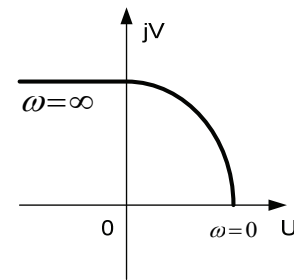


Рис. 5. Годограф слідкувальної системи в режимі «Корекції ККД за напором»

Як показує аналіз характеристичного рівняння цієї системи і побудований за критерієм Михайлова на рис. 5 годограф, слідкувальна система має достатній запас стійкості і забезпечує роботу оборотного гідроагрегату в заданому режимі.

Висновки

1. Теоретично доведено і підтверджено практикою роботи ГАЕС Compuerto (Іспанія) і Yagisawa (Японія), що найефективнішим шляхом підвищення енергоефективності роботи гідроелектричних станцій зі змінними напорами є переведення гідроагрегатів цих станцій в режим з несинхронною частотою обертання.
2. Детальний аналіз можливих структур оборотних гідроагрегатів, які забезпечують подачу в енергосистему електроенергії з синхронною частотою за будь-якої частоти обертання турбіни, показує, що найперспективнішою є структура гідроагрегату, до складу якої входять радіально-осьова гідротурбіна і асинхронізований синхронний гідрогенератор.
3. Переведення гідроагрегатів ГАЕС у роботу в режимі з несинхронною частотою обертання вимагає нового підходу до визначення структури та алгоритму роботи системи автоматичного управління такими енергоблоками.
4. Пропонується система управління оборотними гідроагрегатами, яка має змінну структуру і забезпечує всі можливі експлуатаційні режими ГАЕС, з урахуванням режиму корекції оптимального ККД турбіни за зміни напору на станції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sheldon L. H. An analysis of the applicability and benefits of variable speed generation for hydropower / Sheldon L. H. // Small hydro power fluid mach., 1984: Winter Annu. Meet., New Orleans, La. 9—14 Dec., 1984. — New York, N. Y. 1984. — P. 201—208.
2. Farell C. Hydromechanics of variable-speed turbines / C. Farell, J. Gulliver // Proc. Amer. Power Conf., Chicago, Ill. 22—24 Apr., 1985. — P. 1154—1160.
3. Transient Analysis of Converter-Fed Adjustable Speed Generator-Motor for the Pumped Storage Power Plant / [T. Yanagisawa, T. Kageyama, K. Okamura and others] // Electrical Engineering in Japan. — 1996. — Vol. 116, No. 2. — P. 63—76.
4. Merino J. M. ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant / J. M. Merino, A. Lopez // ABB Review. — 1996. — No. 3. — P. 33—38.
5. Иванченко И. П. Использование переменной частоты вращения для повышения эффективности работы гидротурбин / И. П. Иванченко, В. А. Щур // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2012. — Т. 14, № 1(2).
6. Повышение энергоэффективности гидроаккумулирующих электростанций / [С. Ф. Артюх, В. В. Галат, В. В. Кузьмин и др.] // Электрические станции. — 2014. — № 8 — С. 33—37.
7. Артюх С. Ф. Заощадження енергоресурсів за рахунок підвищення ефективності використання гідроагрегатів при їх роботі зі змінною частотою обертання / С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко // Енергетика, економіка, технології, екологія. — 2014. — № 2 (36). — С. 7—10.
8. Шакарян Ю. Г. Асинхронизированные синхронные машины / Ю. Г. Шакарян. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 192 с.
9. Design and Manufacturing of The World's Largest 475 MVA/460 MW Adjustable Speed Generator-Motor for Pumped Storage Hydro Electric Power Plant / T. Kubo, O. Osada, H. Tojo, T. Shiozaki, T. Suzumura, T. Watanabe // A1_113_2014, Cigre. 2014.

10. Кривченко Г. И. Автоматическое регулирование гидротурбин / Г. И. Кривченко. — М. — Л. : Энергия, 1964. — 208 с.
11. Ротач В. Я. Теория автоматического управления: учеб. для ВУЗов / Ротач В. Я. — 5-е изд. перераб. и доп. — М. : Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 13.03.2015

Артюх Станіслав Федорович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електричних станцій, e-mail: Artjuch@mail.ru;

Червоненко Іван Ігорович — аспірант кафедри електричних станцій.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

S. F. Artiukh¹
I. I. Chervonenko¹

Synthesis of control system for reversible hydropower supply HPSS with variable rotational speed on hydroelectric pumped storage power plant

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

In this article the author proposes the first domestic control system for reversible hydropower supply units with variable rotational speed. This type of system provides all required operating modes on hydroelectric pumped storage variable-head power plant.

Keywords: synthesis, control system, hydroelectric pumped storage power plant, reversible hydropower supply units, asynchronous synchronous motor, electric-hydraulic controller, variable rotational speed.

Artiukh Stanislav F. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Power Stations, e-mail: Artjuch@mail.ru;

Chervonenko Ivan I. — Post-Graduate Student of the of Chair of Power Stations

С. Ф. Артюх¹
И. И. Червоненко¹

Синтез системы управления обратными гидроагрегатами ГАЭС, работающими с переменной частотой вращения

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Предложена первая отечественная система управления обратными гидроагрегатами, работающими с переменной частотой вращения. Такая система обеспечивает все необходимые режимы работы ГАЭС, работающих с переменными напорами.

Ключевые слова: синтез, система управления, ГАЭС, обратимый гидроагрегат, асинхронизированный синхронный генератор, электрогидравлический регулятор, переменная частота вращения.

Артюх Станислав Федорович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электрических станций, e-mail: Artjuch@mail.ru;

Червоненко Иван Игоревич — аспирант кафедры электрических станций