

С.Ф. АРТЮХ, д.т.н., проф., НТУ «ХПИ»
И.И. ЧЕРВОНЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»
С.В. БОРЩЕВ, ведущий инженер, ООО «НПП Энергорегулятор»,
 Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАТИМЫМИ ГИДРОАГРЕГАТАМИ ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС

Предложена структура новой системы автоматического управления обратимыми гидроагрегатами ГАЭС, работающими с переменной частотой вращения, что дает возможность повысить их КПД. Проведен сравнительный анализ переходных процессов полученных на математической модели и данных полученных в результате пусконаладочных работ гидроагрегата Днестровской ГАЭС.

Ключевые слова: обратимый гидроагрегат, КПД, переменная частота вращения, регулятор.

Введение. Как было доказано в многочисленных трудах отечественных и зарубежных ученых, введение режима работы обратной радиально-осевой турбины ГАЭС с переменной частотой вращения, существенно повышает эффективность ее работы при изменении напора [1-4]. При этом для получения синхронной частоты напряжения на шинах станции предлагается использовать асинхронизированный синхронный гидрогенератор (АСГГ) [5–7].

Введение такого режима работы требует создания новой системы автоматического управления (САУ) энергоблоками в составе радиально-осевой гидротурбины и АСГГ, которая обеспечила бы режим коррекции частоты вращения в зависимости от изменения напора на станции.

Синтез новой структуры системы управления гидроагрегатами ГАЭС

Традиционно для обеспечения нормальных режимов работы ГАЭС, с соблюдением всех требований к качеству электрической энергии, используют автоматический регулятор частоты вращения гидротурбин, в качестве которого обычно используется электрогидравлический регулятор (ЭГР) частоты вращения [8].

Они зарекомендовали себя наилучшим образом, обеспечивая надежную работу, высокую чувствительность и высокую точность

© С. Ф. Артюх, И. И. Червоненко, С. В. Борщев, 2015

регулирования.

После появления в 60-е годы XX века первого ЭГР, их гидромеханическая часть практически не претерпела никаких изменений. На сегодняшний день так же используется электрогидравлический преобразователь (ЭГП), блок золотников (БЗ) и сервомотор (СМ). Что же касается электрической части, то она существенно изменилась и представляет собой микропроцессорное устройство, которое обрабатывает большое количество входных параметров, в аналоговом и цифровом виде и выдает необходимые сигналы на электрогидравлический преобразователь.

Создавая новую САУ для обратимых гидротурбин, работающих с переменной частотой вращения, максимально использовалась структура ЭГР, функциональная схема которого показана на рисунке 1. Это было сделано с целью минимизации материальных затрат при введении новых режимов работы энергоблока ГАЭС.

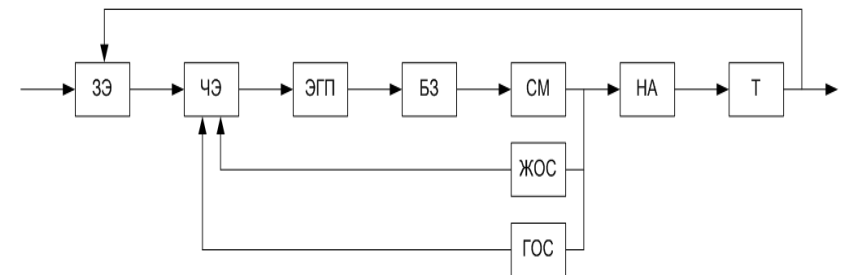


Рис. 1 – Функциональная схема электрогидравлического регулятора частоты вращения гидротурбины: ЗЭ – задающий элемент; ЧЭ – чувствительный элемент; НА – направляющий аппарат; ЖОС – жесткая обратная связь; ГОС – гибкая обратная связь

Новая система автоматического управления должна обеспечить все штатные режимы работы обратимого гидроагрегата (пуск, останов блока, регулирование частоты в аварийных режимах и в режиме резкого изменения нагрузки), и кроме того, обеспечивать коррекцию КПД при изменении напора.

Для этого в структуру регулятора было добавлено новое звено, так называемый фильтр режимов (ФР), который подключается на выходе чувствительного элемента. Задача ФР состоит в том, чтобы изменять структуру ЭГР в зависимости от режима работы гидроагрегата. При включении агрегата в турбинном режиме, или в

режиме закачки воды в верхний резервуар, структура изменяется и он переходит в режим следящей системы по напору для получения оптимального КПД.

С этой целью на вход следящей системы подключается специально разработанный блок, который получил название корректор КПД (КК). На вход КК подаются действующие значения напора, расхода воды через рабочее колесо, частота вращения агрегата и мощность генератора. Исходя из данных, поступающих на вход КК, по специальным массивам-таблицам или по кривым, которые запрограммированы в микроконтроллере, определяется такое открытие НА и частота вращения турбины для действующего напора, при которых КПД гидроагрегата будет самым высоким.

Функциональная схема синтезированной САУ показана на рисунке 2.

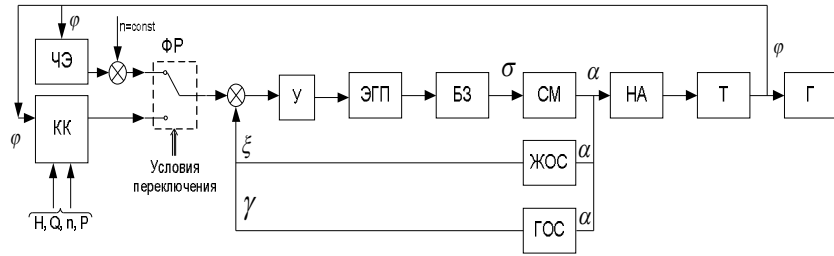


Рис. 2 – Функциональная схема САУ с корректором КПД и фильтром режимов

Построение математической модели гидроагрегата

Для построения математической модели САУ рассмотрим структурную схему ЭГР показанного на рисунке 2 без учета некоторых звеньев, которые несущественно влияют на качество и динамику переходных процессов в силу малости их коэффициентов и постоянных времени (Рис. 3).

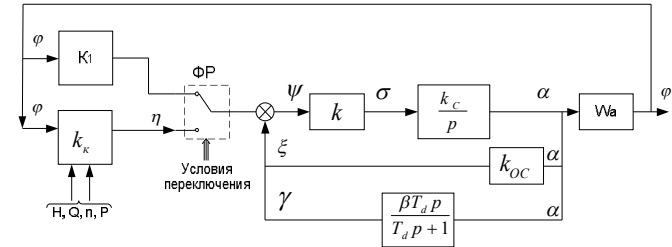


Рис. 3 – Структурная схема регулятора

Описать работу гидротурбины с учетом гидравлического удара в напорном водоводе можно системой уравнений (1).

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= M_T - M_{\mathcal{E}} \\ M_T &= \frac{P_T}{\omega} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T}{\omega} \\ H &= H_0 + \Delta h \\ \Delta h &= -T_W \cdot \frac{dQ}{dt} \\ T_W &= \frac{Q_H}{gH_H} \sum \frac{L_i}{S_i} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

- где J – момент инерции гидроагрегата;
- ω – угловая скорость вращения гидроагрегата;
- $M_T; M_{\mathcal{E}}$ – момент турбины и момент электромагнитный;
- P_T – активная мощность турбины, кВт;
- γ – удельный вес воды;
- H – напор, м.;
- η_T – КПД турбины;
- Δh – гидравлический удар;
- T_W – постоянная времени водовода, с.;
- L – длина водовода, м.;
- S – площадь сечения водовода, м²;
- Q – расход воды через турбину, м³/с.

Математическая модель исследуемой системы показана на рисунке 4.

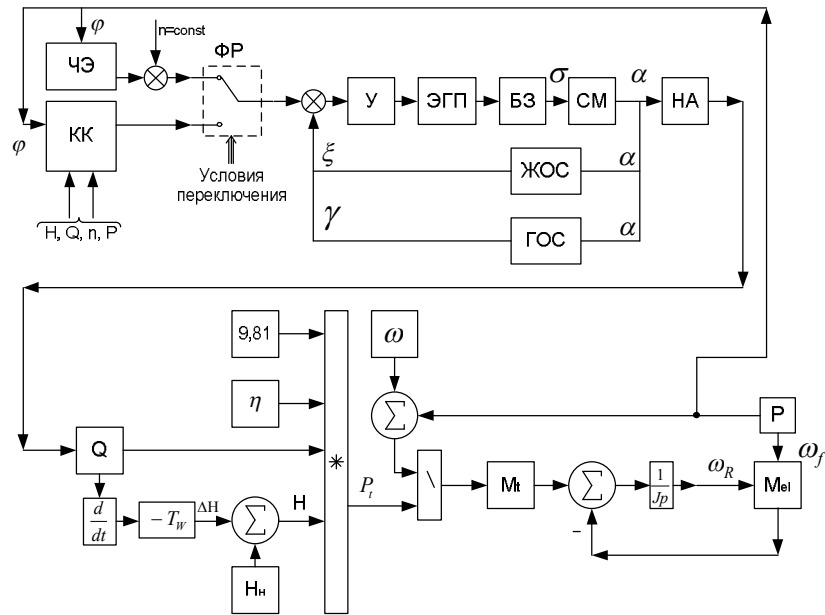


Рис. 4 – Математическая модель САУ

Основной целью дальнейших исследований являлась проверка работоспособности и точности разработанных моделей.

Проверка точности моделирования автоматической системы регулирования

Для проверки работоспособности системы управления, зададимся параметрами регулятора и гидротурбины Днестровской ГАЭС. Что бы оценить корректность работы модели проведем испытания при сбросах нагрузки энергоблока в штатном режиме его работы с постоянной синхронной частотой вращения.

На приведенных ниже кривых (Рис. 5) показаны переходные процессы, соответствующие различным сбросам нагрузки гидроагрегата

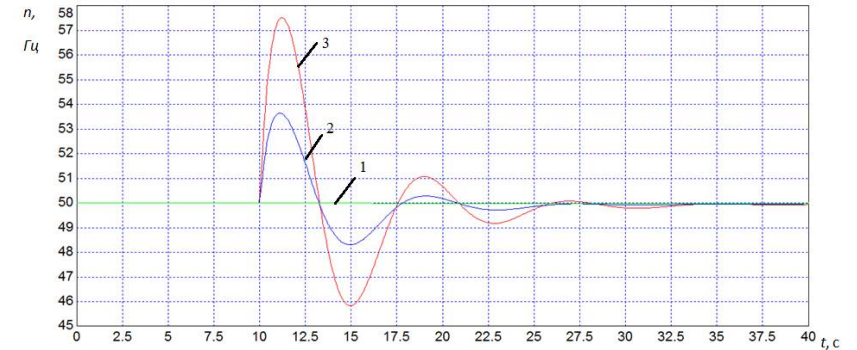


Рис. 5 – Изменение частоты вращения турбины в режиме с отключенным «корректором КПД»: 1 – частота вращения турбины при постоянной нагрузке; 2 – частота вращения турбины при сбросе нагрузки на 25 %; 3– частота вращения турбины при сбросе нагрузки на 50 %

Таким образом, полученная с помощью математической модели величина заброса частоты вращения при сбросе 25 % полной нагрузки турбины Днестровской ГАЭС составили $1,068n_{НОМ}$, а при сбросе 50 % полной нагрузки гидроагрегата соответственно $1,15n_{НОМ}$.

Для сравнения были приняты соответствующие величины забросов частоты вращения гидроагрегатов при аналогичных величинах сбросов полной нагрузки этих же турбин в условиях их натуральных испытаний.

Как следует из отчета об этих пусконаладочных работах, проведенных ООО «НПП Энергорегулятор» (г Харьков), регуляторного оборудования фирмы ANDRITZ Hydro от 22.05.2014, на обратимой турбине типа ОРОНТ- 170 Днестровской ГАЭС, то забросы частоты при сбросах нагрузки на 25 % и 50 % составили соответственно $1,058n_{НОМ}$ и $1,145n_{НОМ}$.

Таким образом, можно утверждать что погрешность разработанной модели находится в пределах 1 %.

Выводы

Разработанные модели показали их полную работоспособность и высокую точность, что дало возможность провести широкую серию исследований, касающихся режимов работы гидроагрегатов ГАЭС как с постоянной так и с переменной частотой вращения.

Список литературы: 1. Sheldon, L. H. An analysis of the applicability and benefits of variable speed generation for hydropower [Text] / L. H. Sheldon. – Small hydro power fluid

mach., 1984. – P. 201–208. **2.** *Yanagisawa, T.* Transient Analysis of Converter-Fed Adjustable Speed Generator-Motor for the Pumped Storage Power Plant [Text] / *T. Yanagisawa, T. Kageyama, K. Okamura, K. Kusunoki, T. Taguchi, M. Abe, H. Kaneko* // *Electrical Engineering in Japan.* – 1996. – Vol. 116, Issue 2. – P. 63–76. doi: 10.1002/ej.4391160206. **3.** *Merino, J. M.* ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant [Text] / *J. M. Merino, A. Lopez* // *ABB Review.* – 1996. – Vol. 3. – P. 33–38. **4.** *Иванченко, И. П.* Использование переменной частоты вращения для повышения эффективности работы гидротурбин [Текст] / *И. П. Иванченко, В. А. Щур* // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2012. – Т. 14, № 1(2). **5.** *Артюх, С. Ф.* Повышение энергоэффективности гидроаккумулирующих электростанций [Текст] / *С. Ф. Артюх, В. В. Галат, В. В. Кузьмин, И. И. Червоненко, Ю. Г. Шакарян, П. В. Сокур* // *Электрические станции.* – 2014. – № 8. – С. 33–37. **6.** *Артюх, С. Ф.* Заощадження енергоресурсів за рахунок підвищення ефективності використання гідроагрегатів при їх роботі зі змінною частотою обертання [Текст] / *С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко* // *Енергетика, економіка, технології, екологія.* – 2014. – № 2 (36). – С. 7–10. **7.** *Лабунец, И. А.* Асинхронизированные турбогенераторы. Новости электротехники [Текст] / *И. А. Лабунец* // *Информ. спр. изд. Журнал.* – 2007. – № 1. – С. 43. **8.** *Кривченко, Г. И.* Автоматическое регулирование гидротурбин [Текст] / *Г. И. Кривченко.* – М.-Л., «Энергия», 1964. – 208 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Sheldon, L. H.* An analysis of the applicability and benefits of variable speed generation for hydropower [Text] / *L. H. Sheldon.* – *Small hydro power fluid mach.*, 1984. – P. 201–208. **2.** *Yanagisawa, T.* Transient Analysis of Converter-Fed Adjustable Speed Generator-Motor for the Pumped Storage Power Plant [Text] / *T. Yanagisawa, T. Kageyama, K. Okamura, K. Kusunoki, T. Taguchi, M. Abe, H. Kaneko* // *Electrical Engineering in Japan.* – 1996. – Vol. 116, Issue 2. – P. 63–76. doi: 10.1002/ej.4391160206. **3.** *Merino, J. M.* ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant [Text] / *J. M. Merino, A. Lopez* // *ABB Review.* – 1996. – Vol. 3. – P. 33–38. **4.** *Ivanchenko, I. P., Shchur, V. A.* (2012). Ispolzovanie peremennoy chastoty vrashcheniya dlya povysheniya effektivnosti raboty gidroturbin. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, No. 1(2). 15-18 Print. **5.** *Artyukh, S. F., Galat, V. V., Kuz'min, V. V., Chervonenko, I. I., Shakaryan, Yu. G., Sokur, P. V.* (2014). Povysenie energoeffektivnosti gidroakkumuliruyushchikh elektrostantsiy. *Elektricheskie stantsii*, No 8, 33–37. Print. **6.** *Artyukh, S. F., Chervonenko, I. I.* Zaoshchadzhennya energoresursiv za rakhunok pidvishchennya effektivnosti vikoristannya gidroaгрегатив pri ikh roboti zi zminnoyu chastotoyu obertannya. *Energetika, ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, No 2, 2014. 7–10. Print. **7.** *Labunets, I. A.* (2007). Asinkhronizirovannyye turbogeneratory. *Novosti elektrotekhniki*. No 1. 43. Print. **8.** *Krivchenko, G. I.* *Avtomaticheskoe regulirovanie gidroturbin.* Moscow-Leningrad. Energiya, 1964. Print.