

2. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем [Текст] / И. Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
3. Пырков, В. В. Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование [Текст] / В. В. Пырков. – К.: ИП «Такі справи», 2007. – 252 с.
4. Лошаков, А. Н. Взаимовлияние замкнутых контуров связанных систем регулирования [Текст] / А. Н. Лошаков // Журнал С.О.К. – 2013. – № 11.
5. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления [Текст] / Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
6. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, 2<sup>nd</sup> Edition [Text] / A. O'Dwyer. – Imperial College Press, Londod, 2006. – 545 p. doi: 10.1142/9781860949104
7. Пугачев, В. И. Метод расчета и оптимизации параметров системы управления с сервомотором постоянной скорости [Текст] / В. И. Пугачев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2010. – № 5. – Режим доступа: <http://jurnal.org/articles/2010/inf8.html>
8. Альбом принципиальных схем блочных тепловых пунктов Данфосс [Текст] / К.: Такі справи, 2006. – 57 с.
9. Сканава, А. Н. Отопление [Текст]: учебник / А. Н. Сканава; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1988. – 416 с.
10. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
11. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления [Текст]: учебник / В. Я. Ротач; 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
12. PID Controller Tuning in Simulink [Electronic resource] / MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing. – Available at: <http://www.mathworks.com/help/slcontrol/guided/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html/> – 24.04.2015. – Title from the screen.
13. Åström, K. J. Advanced PID Control [Text] / K.J. Åström, T. Hägglund. – Research Triangle Park, NC: Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 461 p.

*Проведено дослідження працездатності і динаміки нової системи автоматичного управління оборотними гідроагрегатами в штатних режимах їх роботи і в режимі корекції ККД по напору. Показано ефективність роботи такої системи і можливість її застосування для оборотних гідротурбін всіх видів ГАЕС, включаючи підземні і шахтні ГАЕС*

*Ключові слова: оборотний гідроагрегат, змінна частота обертання, система автоматичного управління, ККД, напір*

*Проведены исследования работоспособности и динамики новой системы автоматического управления обратимыми гидроагрегатами в штатных режимах их работы и в режиме коррекции КПД по напору. Показана эффективность работы такой системы и возможность ее применения для обратимых гидротурбин всех видов ГАЭС, включая подземные и шахтные ГАЭС*

*Ключевые слова: обратимый гидроагрегат, переменная частота вращения, система автоматического управления, КПД напор*

УДК 621.22–546

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.42495

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАТИМЫХ ГИДРОАГРЕГАТОВ, РАБОТАЮЩИХ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ

И. И. Червоненко

Аспирант

Кафедры электрических станций

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: Chervonenko\_Ivan@mail.ru

## 1. Введение

Улучшение технологии конструирования и производства современных гидротурбин, за счет совершенствования оборудования и применения компьютеризированных систем при их проектировании, привело

к тому, что современные гидроагрегаты работают с достаточно высокими энергетическими показателями, увеличение которых уже мало зависит от их конструктивных особенностей. Это в первую очередь касается главного критерия эффективности гидротурбины – ее КПД. В настоящее время конструкторы практически

решили все вопросы оптимальных конструктивных решений проточной части турбины.

Ниже в статье показан новый подход к повышению энергоэффективности обратимых гидроагрегатов ГАЭС разных типов, которые работают с переменными напорами. При этом показаны наиболее эффективные режимы работы этих агрегатов, которые не применяются на традиционных гидроаккумулирующих станциях, но которые дают возможность существенно повысить КПД при изменении напоров. Предложена новая система управления, которая реализует на практике указанные режимы.

## 2. Анализ литературных данных и постановка задачи

В начале 90-х годов прошлого века появилась одна из первых зарубежных публикаций [1], в которой автор впервые исследовал изменение параметров гидротурбины при работе с постоянной и переменной частотой вращения. В результате проведенного анализа характеристик этих машин автор показал возможность повышения энергоэффективности гидроагрегатов при их работе с переменной частотой вращения. В появившейся затем работе авторов Yanagisawa T. [2], были подтверждены результаты для агрегатов, работающих в насосном режиме. В работе Merino J. [3] были описаны результаты первого проекта на действующей ГЭС Compuerto (Испания) по внедрению указанных режимов работы энергоблоков. Результаты подтвердили выводы предыдущих двух авторов и поставили новые проблемы по дальнейшему развитию этих режимов на гидростанциях.

В статьях Иванченко И. П. и Артюха С. Ф. были проведены подобные исследования для действующих электростанций России [4] и Украины [5, 6]. Эти статьи были посвящены анализу технико-экономических параметров существующих агрегатов при замене синхронных генераторов на асинхронизированные генераторы. Результаты исследований показали, что при изменении напоров в широких пределах, можно повысить КПД гидроагрегатов за счет их работы с переменной частотой вращения. Перевод радиально-осевой гидротурбины в режим с несинхронной частотой вращения, дает возможность повысить КПД в турбинном режиме на 3–5 % и в насосном режиме работы на 3–4 %.

При этом появляется необходимость совершенствовать регуляторы гидротурбин и разработать

новые алгоритмы их работы. Прежде всего, такой регулятор должен обеспечить все без исключения штатные режимы работы агрегата при поддержании постоянной частоты вращения, надежную и устойчивую работу энергоблока в объединенной энергосистеме, и должное качество регулирования при переходных процессах.

Кроме того, предлагаемая система управления в установившемся режиме должна переключаться в режим корректировки КПД обратимого гидроагрегата, обеспечивая при этом оптимальное его значение при изменении напора ГАЭС.

## 3. Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является проверка работоспособности предложенной САУ обратимыми гидроагрегатами гидроаккумулирующих электростанций и проверка динамики новой системы управления с учетом влияния на процесс регулирования гидравлического удара.

Основными задачами исследования являются:

- построение области устойчивости рассматриваемой САУ и определение оптимальных параметров регулятора, обеспечивающих необходимое качество регулирования;
- анализ переходных процессов при работе предложенной системы регулирования во всех режимах ее работы.

## 4. Синтез новой системы автоматического управления обратимыми гидроагрегатами ГАЭС

Реализация всех вышеизложенных задач требует изменения структуры электрогидравлического регулятора (ЭГР). С этой целью в структуру ЭГР включается фильтр режимов (ФР), который разрывает замкнутый контур регулятора по частоте и преобразует его в следящую систему КПД по напору. При этом на вход системы управления подключается новое звено, которое называется корректор КПД (КК). КК должен обеспечить оптимальное открытие направляющего аппарата (НА) и определить необходимую частоту вращения агрегата, соответствующую действующему напору и нагрузке генератора. Функциональная схема такой системы показана на рис. 1.

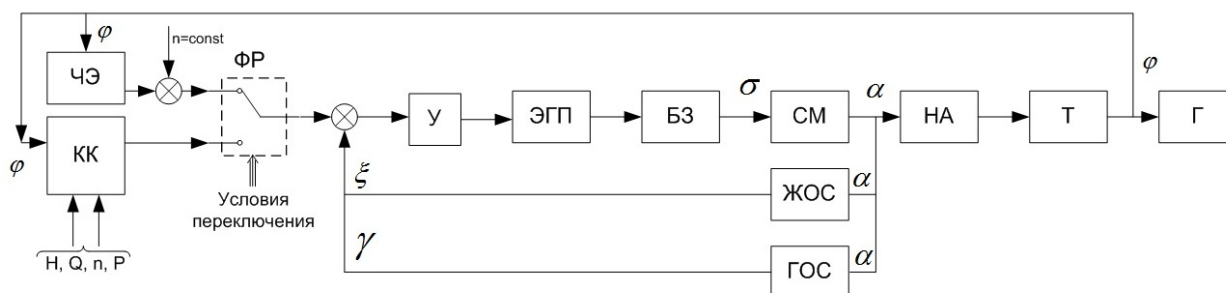


Рис. 1. Функциональная схема электрогидравлического регулятора с фильтром режимов и корректором КПД: ЧЭ — чувствительный элемент, ЭГП — электрогидравлический преобразователь, БЗ — блок золотников, СМ — сервомотор, НА — направляющий аппарат, Т — турбина, Г — генератор, ЖОС — жесткая обратная связь, ГОС — гибкая обратная связь

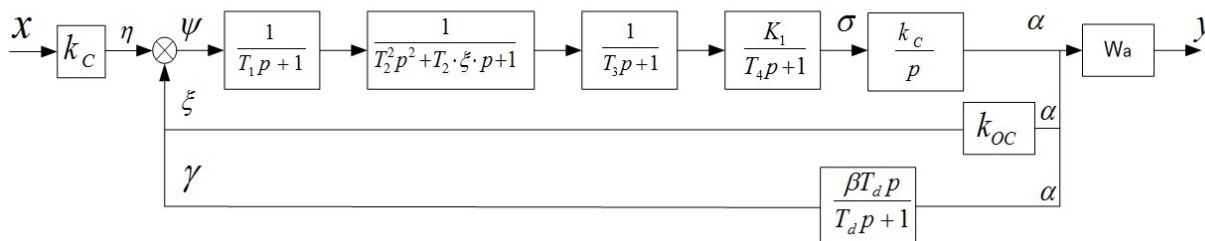


Рис. 2. Структурная схема внутренних регулирующих контуров следящей системы «КПД по напору»

Структурная схема такого регулятора показана на рис. 2. При анализе работы рассматриваемой схемы были допущены некоторые упрощения, связанные с малостью постоянных времени промежуточных звеньев гидромеханической части ЭГР.

После упрощения структурная схема системы управления гидротурбины в режиме «Коррекции КПД по напору» показана на рис. 3.

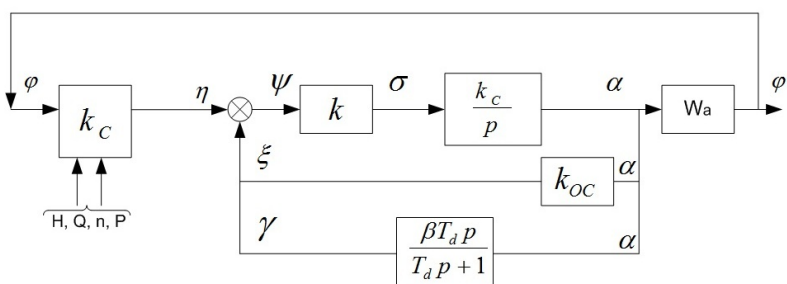


Рис. 3. Конечная структурная схема САУ РО гидротурбины в режиме «Коррекции КПД по напору»

Особенностью такой системы является то, что следящая система будет работать только в установившемся режиме работы энергоблока и при медленных малых внешних возмущениях, а при пуске, останове блока, развороте агрегата в насосный режим, и при сбросах нагрузки регулятор работает по своей классической схеме.

### 5. Математическое моделирование предложенной САУ

При моделировании САУ в режиме следящей системы КПД по напору предполагается, что электромагнитная мощность генератора, и, соответственно, электромагнитный тормозной момент на валу турбины, будет поддерживаться постоянным, за счет воздействия одного из каналов двухканальной системы регулирования возбуждения, который регулирует электрогидравлическую мощность асинхронизированного синхронного гидрогенератора (АСГГ).

Таким образом, моментная характеристика генератора при заданной его мощности будет оставаться неизменной при любых значениях частоты вращения ротора турбины. При этом использовано принципиальное свойство асинхронизированных синхронных генераторов о независимости регулирования электромагнитной мощности генератора и его напряжения [7–9].

Для исследования динамических свойств системы управления была разработана и математическая модель, в состав которой входит модель объекта регулирования, состоящего из радиально-осевой гидротурбины и АСГГ.

Гидромеханические переходные процессы, возникающие в нормальных эксплуатационных режимах, описываются рядом алгебраических и дифференциальных уравнений, которые характеризуют режим работы гидротурбины. Учитывая, что эти гидроагрегаты могут работать в условиях очень высоких напоров, например в условиях подземных и шахтных ГАЭС, крайне важно при рассмотрении переходных процессов учесть влияние гидравлического удара, возникающего при изменении мощности агрегата и расхода воды через турбину.

С одной стороны гидроудар оказывает обратное действие изменению электромагнитному моменту, что снижает быстрдействие регулирования, а, с другой, представляет угрозу механической прочности водоводов и турбины.

Действие гидравлического удара можно описать следующим уравнением [10]:

$$\Delta h = -T_w \cdot \frac{dQ}{dt}, \tag{1}$$

$$T_w = \frac{Q_H}{gH_H} \sum \frac{L_i}{S_i}, \tag{2}$$

где  $\Delta h$  – гидравлический удар;  $H$  – напор, м;  $T_w$  – постоянная времени водовода, с.;  $L$  – длина водовода, м.;  $S$  – площадь сечения водовода, м<sup>2</sup>;  $Q$  – расход воды через турбину, м<sup>3</sup>/с.

Постоянная времени водовода показывает, за какой промежуток времени масса воды, находящаяся в состоянии покоя, разгонится до номинальной скорости под действием номинального напора.

Установившейся режим работы энергоблока описывается общеизвестным уравнением движения:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_{\Sigma}, \tag{3}$$

где,  $J$  – момент инерции гидроагрегата;  $\omega$  – угловая скорость вращения гидроагрегата;  $M_T; M_{\Sigma}$  – момент

турбины и момент нагрузки (электромагнитный) соответственно.

Момент турбины рассчитывается по формуле (4):

$$M_T = \frac{P_T}{\omega} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T}{\omega}, \quad (4)$$

где,  $P_T$  – активная мощность турбины, кВт;  $\gamma$  – удельный вес воды;  $H$  – напор, м.;  $\eta_T$  – КПД турбины.

Все параметры, входящие в данное уравнение, можно получить или рассчитать по универсальным характеристикам гидротурбин, с помощью формул пересчета. В [6] показано, что значения расхода и соответствующее оптимальное для данного напора значение КПД можно изменять в зависимости от частоты вращения турбины.

Структурная схема описанной математической модели показана на рис. 4.

С учетом разработанной математической модели гидроагрегата структурная схема полной модели предложенной САУ показана на рис. 5.

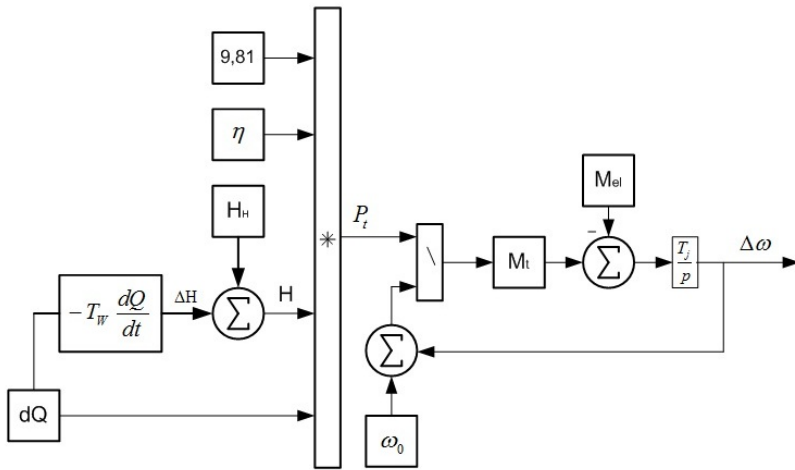


Рис. 4. Структурная схема математической модели РО гидроагрегата

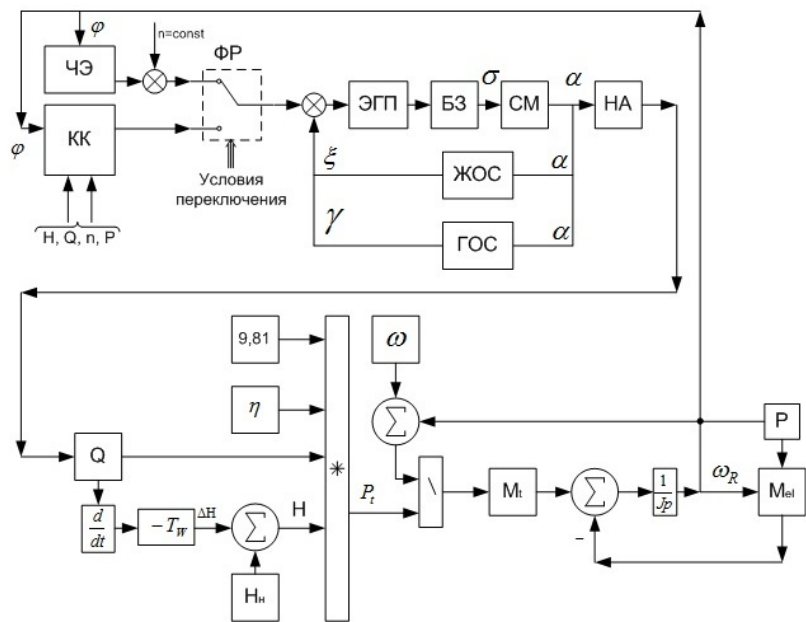


Рис. 5. Полная схема математической модели САУ обратимого гидроагрегата

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

## 6. Исследование динамики автоматической системы регулирования

В процессе исследования прежде всего была произведена проверка динамики работы выбранной САУ обратимых гидроагрегатов при их работе в штатных режимах с синхронной частотой вращения. Для этого предварительно была построена область устойчивой работы регулятора, которая представлена кривой D-разбиения в параметрах гибкой обратной связи (рис. 6). В качестве параметров гидроагрегата были приняты весогабаритные параметры перспективных турбин генераторов, которые предназначены для работы в условиях высоконапорных шахтных ГАЭС, и которые были выполнены по нашей просьбе фирмой «Харьковтурбининжиниринг» и КБ завода «Электротяжмаш».

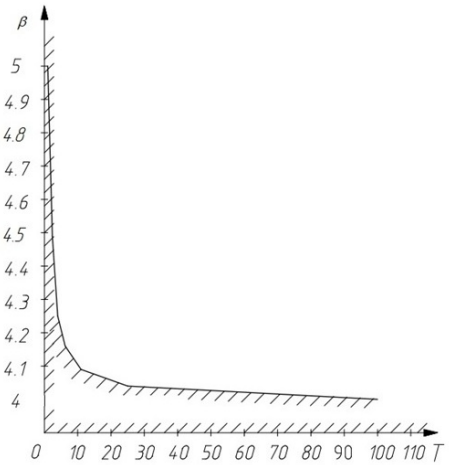


Рис. 6. Кривая D-разбиения исследуемой САУ

На основании полученной области устойчивости был осуществлен подбор параметром наилучшего сочетания  $T$ ,  $\beta$  и  $\delta$ , которые должны обеспечить требуемый уровень заброса частоты вращения турбины и должное качество регулирования. Это подтверждается приведенными ниже кривыми переходных процессов, соответствующих различным сбросам нагрузки (10 %, 30 % и 50 %) с отключенным корректором КПД. Указанные кривые представлены на рис. 7.

После этого была проверена работоспособность и устойчивость САУ при переключении ее в режим «следающей системы КПД по напору». В первую очередь была проверена правильность работы следящей системы при ступенчатом изменении уставки КК по напору. Полученная кривая показала, что в турбинном режиме при переключении САУ в режим следящей системы, при

ступенчатом изменении уставки по напору величина расхода меняется в соответствии с расчетными величинами, которые соответствуют новому значению частоты вращения и оптимальному для данного напора КПД (кривая 1, рис. 8).

Как видно из полученной кривой, в момент перехода с одного значения уставки напора на новое значение колебания расхода быстро затухали и происходил быстрый переход в установившейся режим.

При уменьшении ступени уставок по напору (кривая 2, рис. 8) переходные процессы практически исчезли и переход на новый режим проходил очень плавно. При плавном и непрерывном изменении уставок напора, система работает без каких либо переходных процессов и устойчива во всем диапазоне изменения напора (кривая 3, рис. 8).

Для окончательной оценки работы исследуемой САУ обратимых гидроагрегатов был исследован переход с режима «слеящей системы» в режим поддержания синхронной частоты вращения путем отключения фильтра режимов при обратном срабатывании. Изменение частоты вращения турбины при работе фильтра режимов и отключении корректора КПД показано на рис. 9.

Как показывает приведенная кривая, система устойчиво работает в режиме коррекции КПД (рис. 9), но при возникновении сильного возмущения, в данном случае изменения нагрузки на шинах генератора (рис. 10), фильтр режима отключает корректор КПД и САУ и переключает работу САУ на ЭГР. Последующие переключения САУ в режим слеящей системы будет произведено после достижения устойчивого установившегося режима.

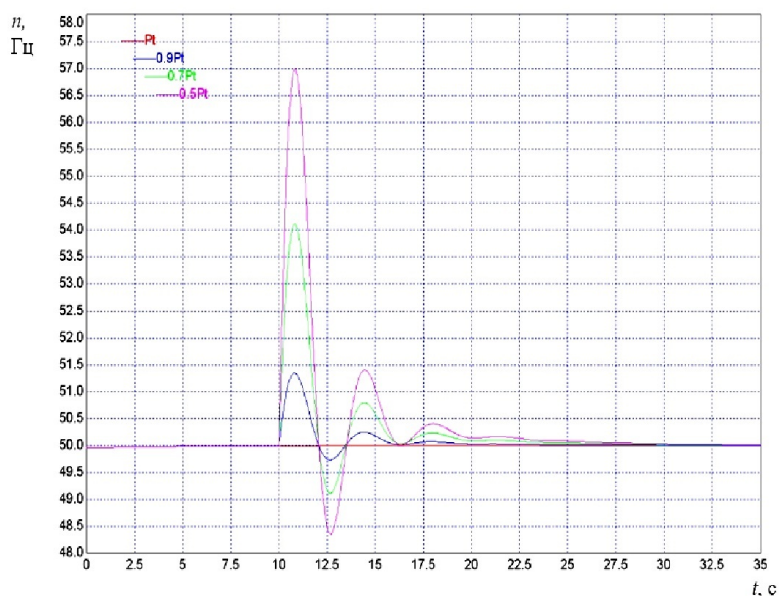


Рис. 7. Изменение частоты вращения турбины в режиме с отключенным «корректором КПД»

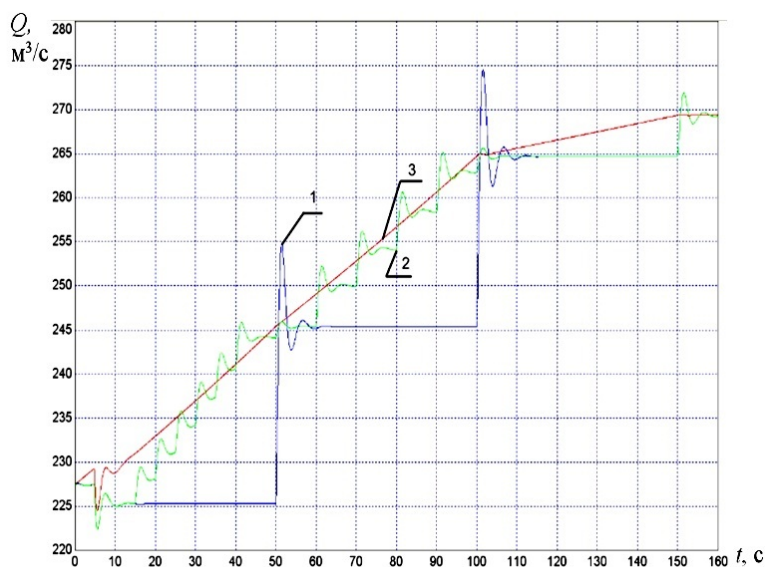


Рис. 8. Изменение расхода при различных значениях ступеней уставок по напору: 1 — при уставке по напору 5 м, 2 — при уставке по напору 1 м, 3 — при непрерывном изменении уставки по напору

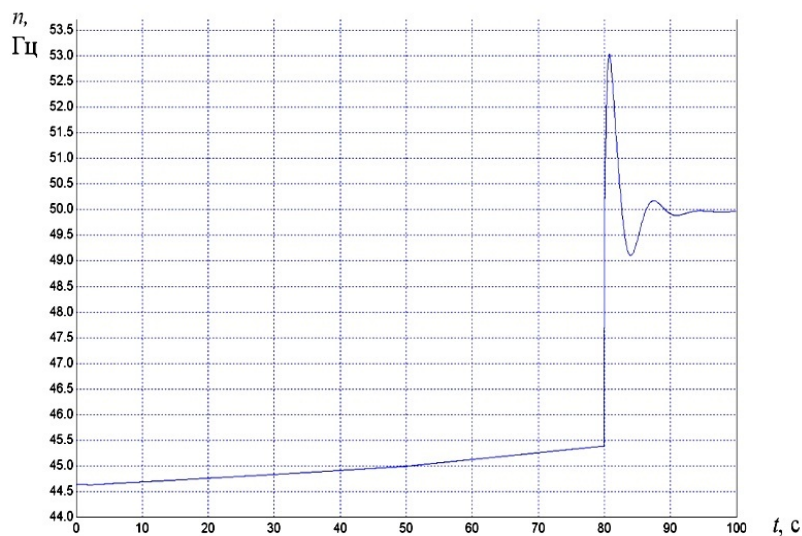


Рис. 9. Изменение частоты вращения гидроагрегата при отключении фильтра режимов при больших внешних возмущениях

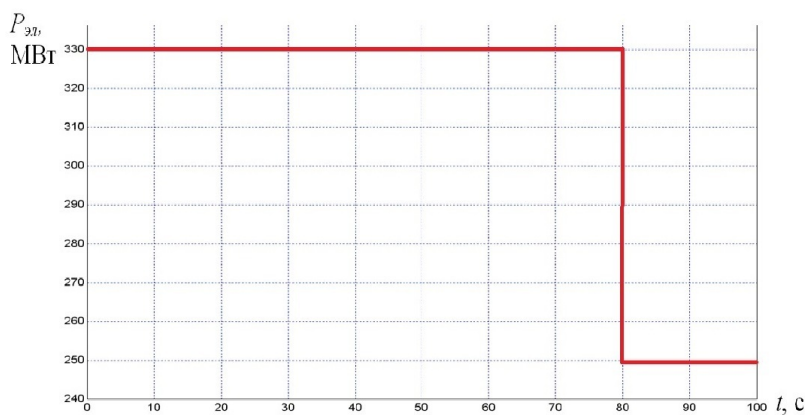


Рис. 10. Изменение мощности нагрузки

## 7. Выводы

1. Предложена система автоматического управления обратимыми гидроагрегатами ГАЭС, работающими с переменной частотой вращения, которая представляет систему с переменной структурой.

2. Определена зона устойчивости предложенной САУ в штатном режиме с агрегатами большой мощности, работающими с высокими напорами. Это в первую очередь касается агрегатов подземных и шахтных ГАЭС.

3. Построена область устойчивой работы для предложенной САУ. Определено оптимальное сочетание параметров корректирующих звеньев системы регулирования, которые обеспечивают требуемый уровень забросов частоты вращения агрегатов и требуемое качество регулирования.

4. Проведенный анализ переходных процессов работы САУ в штатных режимах, а так же в режимах коррекции КПД по напору показали ее работоспособность и то, что качество регулирования этой системы полностью соответствует требованиям, предъявляемым к регуляторам гидротурбин.

5. Показана целесообразность применения предложенной системы на всех ГАЭС с агрегатами в состав обратимых агрегатов которых входит радиально-осевые гидротурбины и асинхронизированные синхронные генераторы.

## Литература

- 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
- 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/eej.4391160206
- 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.
- 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).
- 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.
- 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.
- Шакарян, Ю. Г. Асинхронизированные синхронные машины [Текст] / Ю. Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.
- Лабунец, И. А. Асинхронизированные турбогенераторы. Новости электротехники [Текст] / И. А. Лабунец // Информ. спр. изд. Журнал. – 2007. – № 1. – С. 43.
- Kubo, T. Design and Manufacturing of The World's Largest 475 MVA/460 MW Adjustable Speed Generator-Motor for Pumped Storage Hydro Electric Power Plant [Text] / T. Kubo, O. Osada, H. Tojo, T. Shiozaki, T. Suzumura, T. Watanabe // A1\_113\_2014, Cigre, 2014.
- Кривченко, Г. И. Автоматическое регулирование гидротурбин [Текст] / Г. И. Кривченко. – М.-Л., «Энергия», 1964. – 208 с.