

УДК 62-346

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА БАЗЕ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

¹Ильдияров Е.Н., ²Сизов А.Н., ¹Чубаров Ф.Л.

¹КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Калуга, e-mail: mail@bmstu-kaluga.ru;

²ОАО «Калужский турбинный завод», Калуга, e-mail: sizov_an@power-m.ru

Продолжено исследование электрогидравлического контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины малой мощности, построенного на основе современного отечественного высокоточного быстрореагирующего электромеханического привода (ЭМП). Основная цель исследования в данной работе – выработка проектных рекомендаций по узлам системы регулирования, а также упрощение процедуры подбора оптимальных параметров регулятора. Большинство современных систем регулирования паровых турбин являются электрогидравлическими или электромеханическими, построенными на базе специальных электромеханических преобразователей. Высокие эксплуатационные характеристики таких электро-механических преобразователей обусловлены применением в его конструкции ролико-винтовой пары, основные особенности конструкции учтены в оригинальной математической модели. Модель построена на базе традиционных представлений о динамике подобных систем с учётом ряда существенно нелинейных элементов. При этом гидромеханическая часть системы регулирования является традиционной для паровых турбин Калужского турбинного завода. Исследование также проводится с целью адаптации системы регулирования под требования обеспечения качества вырабатываемой в РФ электроэнергии. Настройка параметров регулятора в подобных системах является нетривиальной задачей, однако она может быть облегчена путем применения автоматизированных процедур с использованием специализированного программного обеспечения.

Ключевые слова: регулирование, паровые турбины, электрогидравлика, электромеханический привод, модель, имитационное моделирование, настройка ПИД-регулятора

ELECTROMECHANICAL DRIVE-TYPE BASED, ELECTROHYDRAULIC CONTROL CIRCUIT FOR THE SPEED OF THE STEAM TURBINE INVESTIGATION

¹Ildiyarov E.N., ²Sizov A.N., ¹Chubarov F.L.

¹Kaluga branch Moscow State Technical University named after Bauman (National Research University),
Kaluga, e-mail: mail@bmstu-kaluga.ru;

²Open Joint Stock Company «Kaluga turbine works», Kaluga, e-mail: sizov_an@power-m.ru

This study continues research of a domestic high-precision fast response electromechanical drive-type based, electrohydraulic control circuit for the speed of the low-power steam turbine. The main purpose of the study is to work out some project recommendations for governing system parts design along with optimal regulator parameters choosing. Most of such a systems are electrohydraulic or electromechanical type, based on a special electromechanical drives. This drive's high performance is due to its construction features such as roller-screw pair, considered in an original mathematic model. The model is built in traditional way for a control system dynamic, some substantially non-linear elements considered. Wherein the other part of a system – its hydromechanical part – is traditional for a Kaluga JSC turbines. An another aim of the research is control circuit adapting to meet the requirements to a power quality in Russian Federation. Controller adjustment in such type of a system is not a trivial, but it could be facilitated by using automated procedures with specialized software support.

Keywords: control, steam turbines, electrohydraulic, electromechanical drive unit. model, simulation modeling, PID-controller adjustment

Работа электрогенерирующего оборудования в энергосистеме РФ регламентирована для следующих основных режимов – первичного регулирования частоты (общего или нормированного) и автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков мощности [1, 2]. Причём для небольших (до 100 МВт) объектов электрогенераций (ТЭС, ТЭЦ) главной задачей, как правило, остаётся обеспечение требований к качеству именно вторичного регулирования [3, 4]. Подобные требования (диапазон регулирования, требования к динамике изменения мощности) в большой степени

определяют конструктив применяемого электрогенерирующего оборудования, равно как и налагают ограничения на область его применения. В части паровых турбин, как приводных двигателей для электрических генераторов, исследования их динамики и влияния на неё конструктивных параметров ведутся достаточно давно [5, 6] и хорошо систематизированы, особенно для турбин средней и большой мощности (100 и более МВт). Однако и турбины меньшей мощности (с постоянной времени до 10–12 секунд [7]) также остаются хорошим и наглядным объектом для теории

автоматического регулирования (ТАР), по которой для обеспечения устойчивой работы с заданным качеством важны и свойства самого объекта, и настройки его регулятора. Обеспечение заданных свойств в части профильного, «целевого» проектирования узлов регулирования и защиты, а также оптимальных настроек регулятора – по-прежнему является нетривиальной нелинейной задачей ТАР, представляющей практический интерес для проектных организаций, о чём свидетельствует большое количество работ по той теме [4, 6, 8].

Цель исследования

Целью настоящей работы явилась выработка практических рекомендаций по определению настройки параметров регулятора в контуре регулирования конкретного объекта. Не рассматривая здесь многокритериальную задачу оптимизации выбранной структуры системы регулирования, остановимся на некоторых практических вопросах её конструирования и настройки. Настоящая

работа служит продолжением цикла, посвящённого исследованию быстродействующего прецизионного электромеханического привода, как исполнительного механизма системы регулирования частоты вращения паровой турбины малой мощности [9, 10]. Практический интерес к данному вопросу вызван тем обстоятельством, что большинство паровых турбин Калужского турбинного завода в настоящее время перешло на комплектацию системой регулирования электрогидравлического типа, обладающих рядом эксплуатационных преимуществ по сравнению с прежней гидродинамической системой [11]. Такая система, как правило, состоит из двух функциональных частей: электронной управляющей (ЭУЧ) и гидромеханической исполнительной (ГМЧ), её принципиальная схема показана на рис. 1.

В состав электронной управляющей части входят (рис. 1):

- электронное управляющее устройство 5;
- электромеханический преобразователь 4;
- шесть датчиков частоты вращения 6.

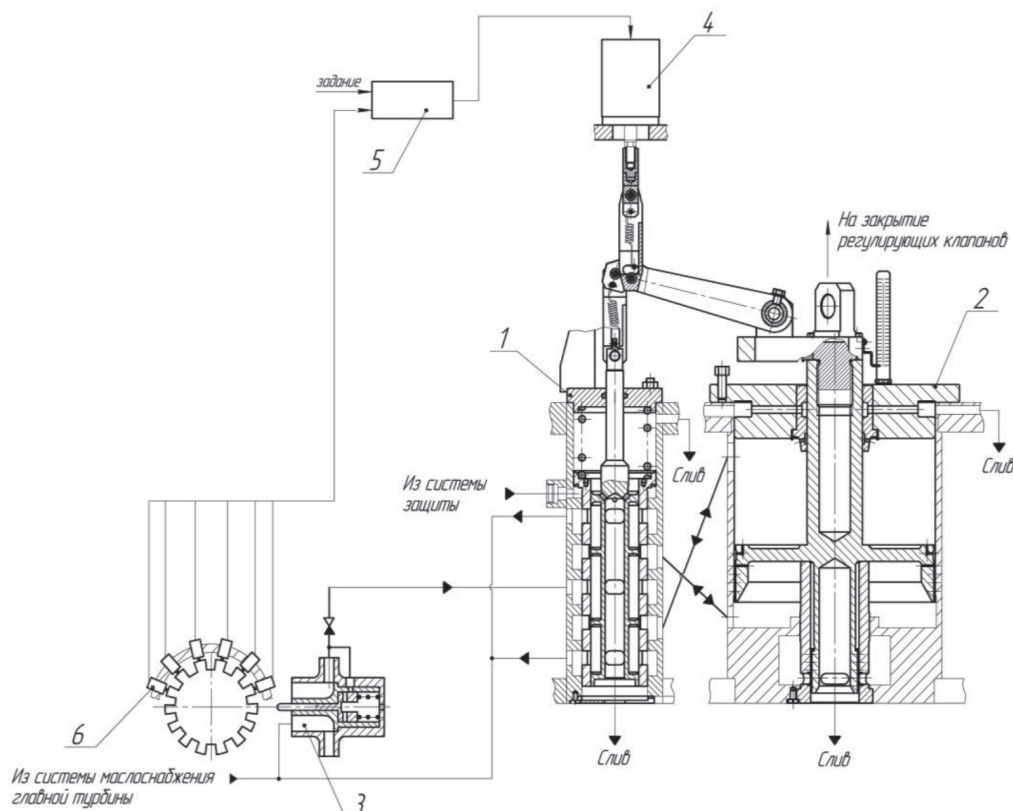


Рис. 1. Принципиальная схема системы регулирования с ЭУЧ ЭГСАР для турбины типа К-17 со следующими условными обозначениями: 1 – отсечной золотник; 2 – сервомотор; 3 – насос-регулятор; 4 – электромеханический преобразователь; 5 – электронное управляющее устройство; 6 – датчик частоты вращения

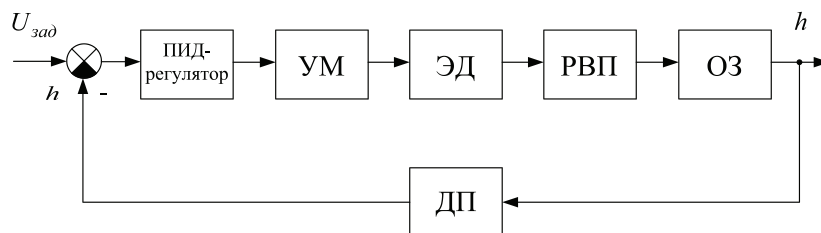


Рис. 2. Функциональная схема блока регулирования с ЭМП и ОЗ, со следующими условными обозначениями: УМ – усилитель мощности; ЭД – электродвигатель; РВП – ролик-винтовая передача; ОЗ – отсечной золотник; ДП – датчик положения

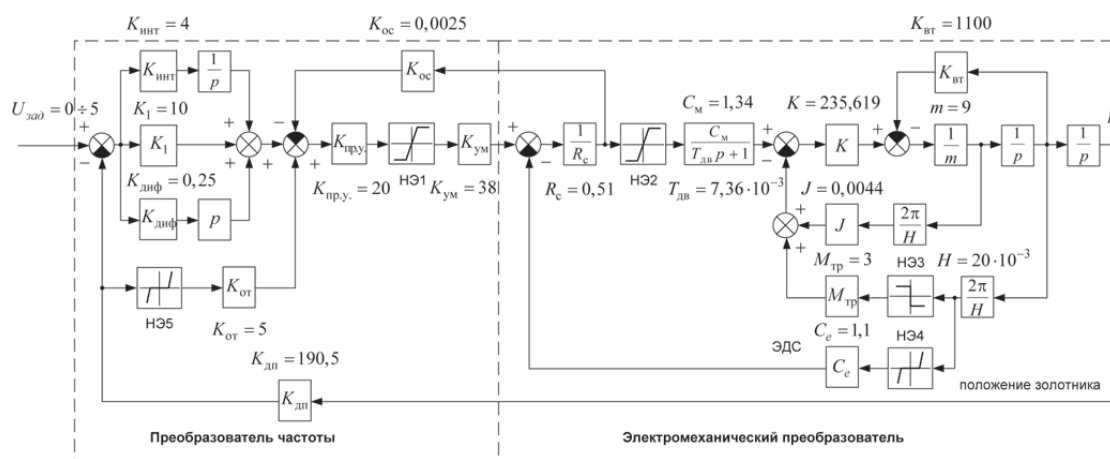


Рис. 3. Структурная схема модели ЭМП с ОЗ (подробности приведены в [12])

Материалы и методы исследования

Гидромеханическая исполнительная часть, традиционная для КТЗ, состоит из силовой части – блока регулирования (гидропривод управления положением регулирующего паровпускного клапана турбины) и механической части – парораспределения турбины [7]. В блоке регулирования скомпонованы отсечной золотник (ОЗ) 1 и сервомотор (СМ) 2 – классический следящий гидропривод с перекрёстными обратными связями и управлением СМ по отклонению от нейтрального положения ОЗ [3]. В блоке регулирования масло высокого давления подается от насоса-регулятора 3 на рабочих режимах и от пускового масляного электронасоса в режимах пуска и останова. Давление масла в линии нагнетания насоса-регулятора при номинальной частоте вращения ротора турбины составляет не более 1 МПа.

Теоретические исследования и опыт эксплуатации турбин с системами регулирования типа ЭГСАР (рис. 1) показывают, что для обеспечения требований к качеству процессов регулирования следящий электромеханический привод (ЭМП) отсечного золотника

должен обеспечивать высокую скорость перемещения отсечного золотника (до 0,25 м/сек). Ошибка достижения заданного положения отсечного золотника не должна превышать его зоны нечувствительности по гидравлике, обусловленной конструкцией подвижной пары вида «золотник – втулка» (от нескольких сотых до десятых долей мм). Перемещение отсечного золотника с помощью ЭМП должно при этом иметь характер, близкий к монотонному (относительное перерегулирование более 30% нежелательно с точки зрения потери устойчивости контура регулирования).

Функциональная и структурная схемы блока регулирования гидромеханической части на основе такого ЭМП, полученные на первоначальных этапах исследования [11, 12], показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

В рамках исследования динамики данного контура регулирования модель была упрощена и исследована на устойчивость в области выбранных варьируемых параметров (настройки регулятора), а также выполнена её отработка и частичная верификация по результатам стендовых испытаний опытного образца ЭМП [10], подтвердившая обоснованность базовых параметров

модели. На последующем этапе был выполнен анализ результатов выполненных работ. Путем подбора оптимальных значений параметров регулятора из определённой ранее области устойчивости были получены переходные процессы по положению ОЗ с параметрами качества (таблица, строки 1–5), удовлетворяющими требованиям ТЗ на систему регулирования в части времени переходного процесса ($t_{пер}$) и относительно перерегулирования (σ) [11].

Однако данный результат был получен подбором оптимальных параметров настройки в ручном режиме. Следующей задачей, имеющей более практическую направленность, стало определение оптимальных настроек регулятора данной системы автоматическим путём. Известно, что большинство современных зарубежных промышленных регуляторов для систем автоматического регулирования широкого круга задач уже наделены свойством адаптивности – способности самостоятельно изменять свои настройки под действием внешних факторов, воздействующих на систему, в том числе способных изменять свойства объекта регулирования.

Автоматизированная настройка ПИД-регулятора

Существует множество методов настройки ПИД-регуляторов, в том числе и для сложных, существенно нелинейных объектов управления, таких как турбина со своей системой регулирования скорости вращения. Как правило, при этом стараются придерживаться следующих общих закономерностей:

- увеличение пропорционального коэффициента усиления увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- при уменьшении интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Один из способов автоматической настройки параметров ПИД-регулятора, удобный для анализа, реализован в программном обеспечении среды Simulink пакета программ Matlab [13, 14]. Для этого используется встроенный регулятор из библиотеки PID Controller, а также блок Signal Constraint. Их использование применительно к разработанной модели (рис. 3) позволяет добиться получения переходного процесса, близкого к оптимальному, при этом параметры настройки регулятора рассчитываются автоматически методом Монте-Карло. При этом решается так называемая

задача сглаживания, для которой критерий оптимизации имеет вид

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ q_0 [x_{уст} - x(t)]^2 + q_1 [x'_{уст} - x']^2 \right\} dt, \quad (1)$$

где x и x' – значения выходного сигнала и его производной в установившемся режиме (после завершения переходного процесса), q_0 и q_1 – весовые коэффициенты, которые должны удовлетворять условию

$$q_0 + q_1 = 1. \quad (2)$$

На практике вычисления интеграла проводятся на конечном отрезке времени $[0; T]$, который выбирается примерно равным $(2 - 3)T_{пер}$ ($T_{пер}$ – время переходного процесса), а если оценить ожидаемое $T_{пер}$ трудно, то $(5 - 6)T_{i(max)}$, где $T_{i(max)}$ – максимальная постоянная времени неизменяемой части системы. Кроме того, вводится нормирующий множитель $1/T$, величина $x_{уст}$ заменяется величиной уровня ступенчатого входного сигнала g_0 , а $x'_{уст} = 0$.

Таким образом, реально минимизируется функционал

$$J = (1/T) \int_0^T \left\{ q_0 [g_0 - x(t)]^2 + q_1 [x'(t)]^2 \right\} dt. \quad (3)$$

Выбор значений весовых коэффициентов q_0 и q_1 представляет самостоятельную, трудноразрешимую проблему, поэтому на начальных стадиях проектирования полагают $q_0 = q_1 = 0,5$.

Следует отметить, что выбор метода решения может быть изменён программными настройками пакета (доступны также методы Рунге – Кутты, Зиглера – Никольса, Стогестада, Шеделя и др.), в данном случае при выборе руководствовались практическими рекомендациями работы В.А. Жмудь [15].

Результаты исследования и их обсуждение

Переходные процессы по положению выходного штока ЭМП в исследуемом контуре при различных вариантах настройки представлены на рис. 4.

Ниже приведена таблица со значениями коэффициентов настройки регулятора вручную (№ 1–5) и автоматическим методом (№ 6).

Параметры качества переходных процессов ЭМП с ОЗ

№ п/п	$K_{инт}$	K_1	$t_{пер}$, сек	σ , %
1	$1,5 \cdot 10^5$	400	0,045	30
2	$4,8 \cdot 10^5$	450	0,06	61
3	$1,23 \cdot 10^6$	1 150	0,05	71
4	$1,05 \cdot 10^6$	1 050	0,05	61
5	$5,05 \cdot 10^6$	3 675	---	---
6	9426	224	0,01	6,25

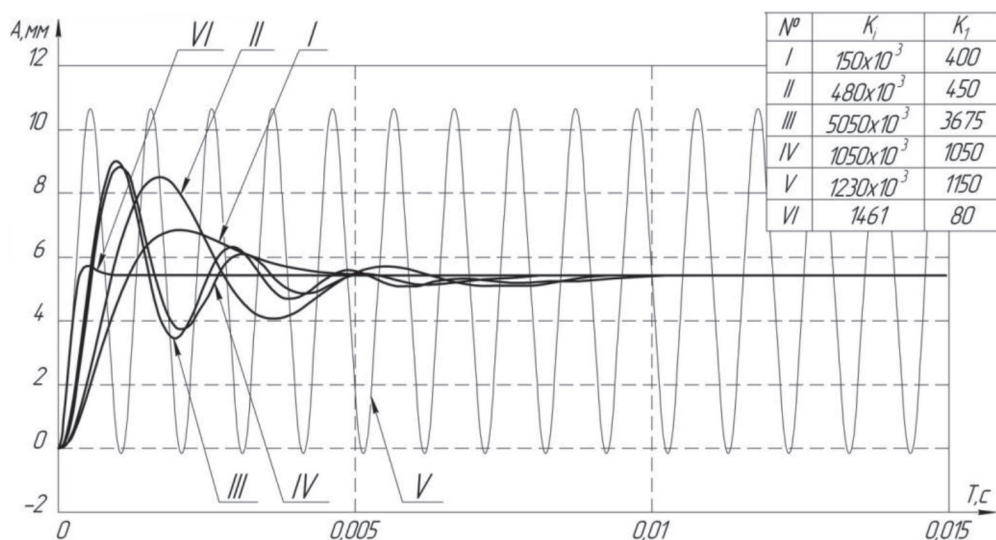


Рис. 4. Сравнительный анализ двух методов настройки регулятора с учетом внесенных изменений

Выводы

Проанализировав результаты сравнения переходных процессов, можно полагать, что метод автоматизированной настройки, базирующийся на методе Монте-Карло, более удобен и универсален для контуров регулирования данного типа, нежели подбор их параметров вручную.

Список литературы

- ГОСТ Р 55890-2013. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования. – М.: Стандартинформ, 2014 – 20 с.
- СТО 59012820.27.100.002-2013. Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 18 с.
- Булкин А.Е. Автоматическое регулирование энергоустановок: пособие для вузов / А.Е. Булкин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 507 с.
- Шавлович З.А. Совершенствование конструкций и режимов работы гидравлических приводов в системах регулирования гидротурбин: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Санкт-Петербург, 2004. – 22 с.
- Пупков К.А. Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Часть II. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2012. – 416 с.
- Новосёлов В.Б. Разработка методов исследования и совершенствования электрогидравлической системы регулирования и защиты паровых теплофикационных турбин и их элементов: автореф. дис. ... док. техн. наук. – Екатеринбург, 2014. – 47 с.
- Паровые турбины малой мощности КТЗ / В.И. Кирухин, Н.М. Тараненко, Е.П. Огурцова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 216 с.
- Кутрубас В.А. Эффективный ПИД-регулятор / В.А. Кутрубас, Е.Е. Сычёв // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2013. – № 5. – С. 60–65.
- Сизов А.Н. Разработка модели высокоточного быстродействующего следящего электромеханического привода / А.Н. Сизов, Ф.Л. Чубаров, И.В. Гусев // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19719> (дата обращения: 15.03.2018).
- Чубаров Ф.Л. Отработка модели высокоточного быстродействующего следящего электромеханического привода и её применение к системе регулирования паровой турбины / Ф.Л. Чубаров, А.Н. Сизов, А.И. Быков // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9–1. – С. 91–95.
- Ильдияров Е.Н. Сизов А.Н. Применение технологии линейных перемещений для регулирования частоты вращения и давления пара блочной паротурбинной установки // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Калуга: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2016. – Т. 2 – С. 150–154.
- Сизов А.Н., Мусатов Е.А., Баглаев П.В. Следящий электромеханический привод отсечного золотника в электрогидравлической системе регулирования частоты вращения паровой турбины // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции. – Калуга: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – Т. 2. – С. 123–130.
- Мироновский Л.А. Введение в Matlab: учебное пособие / Л.А. Мироновский, К.Ю. Петрова. – СПб.: СПбГУАП, 2005. – 119 с.
- Вебинар. Разработка регулятора типа ПИД в MATLAB и Simulink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matlab.ru/webinars/razrabotka-regulyatorov-PID-v-MATLAB-Simulink> (дата обращения: 20.02.2018).
- Жмудь В.А. О методах расчета ПИД-регуляторов // Автоматика и программная инженерия. – 2013. – № 2(4). – С. 118–124.