

Дмитрий Олегович Глушков

К.ф.-м.н., доцент Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов

Концепция лабораторной работы

«Проектирование и настройка всережимного МРС-регулятора соотношения топливо–воздух энергетического котла»

для студентов старшего курса бакалавриата

По результатам открытого конкурса ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»
«Энергия инноваций в инженерном образовании» (экспертная комиссия ИТАЭ)

**Национальная научно-практическая конференция
«Энергия инноваций в инженерном образовании»**

г. Москва
28 июля 2021

I. Основные требования, сформулированные экспертной комиссией, к лабораторной работе

- **Работа должна выполняться не более чем за 4 академических часа, включая подготовку рабочего участка, настройку измерительной аппаратуры и пр.**

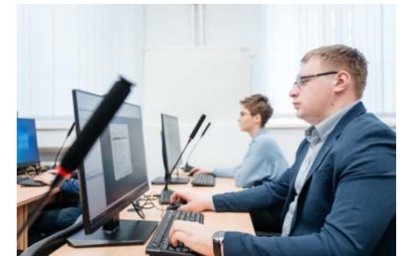
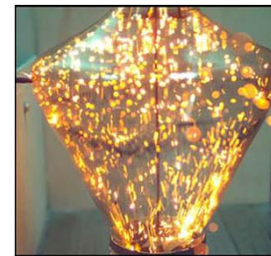
Первая часть – работа с программно-аппаратным комплексом (экспериментальный стенд, оборудование нижнего, среднего, верхнего уровней автоматизации). Вторая часть – проведение экспериментального исследования в рамках индивидуального задания (варьирование параметров в широких диапазонах).

- **Работа должна представлять собой законченное учебно-научное исследование. Должна быть ясна как конкретная цель данной лабораторной работы, так и формируемые с ее помощью знания и умения студентов.**

Выполнение работы позволит закрепить на практике теоретические знания, приобретенные в рамках группы учебных дисциплин (например, ТАУ, ТИПСА, АСУ ТП, ИСПУ), а также получить/улучшить навыки и опыт самостоятельного проведения учебно-научных исследований.

- **Работа должна быть реализуема.**

Разработка программно-аппаратного комплекса с модульными заданиями разного уровня для реализации группы лабораторных работ в рамках тематики основных локальных АСР и АСУ ТП энергетического котла.



II. Место лабораторной работы в образовательном процессе

- **Направление подготовки:** 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника.
- **Образовательная программа:** Теплоэнергетика и теплотехника / Автоматизация теплоэнергетических процессов.
- **Курс:** четвертый.
- **Дисциплины:** Микропроцессорные контроллеры; Технические измерения, приборы и средства автоматизации; Энергосбережение в теплоэнергетике; Вычислительные машины, системы и сети; Автоматизация тепловых процессов.
- **Компетенции, соответствующие результатам освоения образовательной программы в рамках выполнения лабораторной работы:**
 - УК(У)-1. Способность осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач;
 - ОПК(У)-2. Способность демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин, готовностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; применять для их разрешения основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;
 - ПК(У)-8. Готовность к участию в организации метрологического обеспечения технологических процессов при использовании типовых методов контроля режимов работы технологического оборудования.

III. Структура методических указаний к лабораторной работе

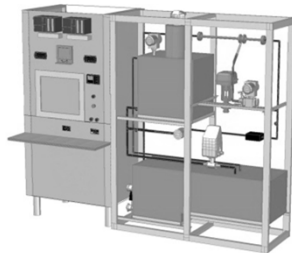
- 1) Цель.
- 2) Задачи.
- 3) Основные сведения о технологическом объекте.
- 4) Основные сведения об АСР, АСУ ТП.
- 5) Описание экспериментального стенда (с элементами техники безопасности) и методов исследования.
- 6) Порядок выполнения работы (для двух частей: часть 1 – работа с программно-аппаратным комплексом; часть 2 – проведение экспериментального исследования).
- 7) Варианты индивидуальных заданий.
- 8) Содержание отчета.
- 9) Контрольные вопросы.
- 10) Список источников.

IV. Материально-техническое обеспечение лабораторной работы

КОНЦЕПЦИЯ

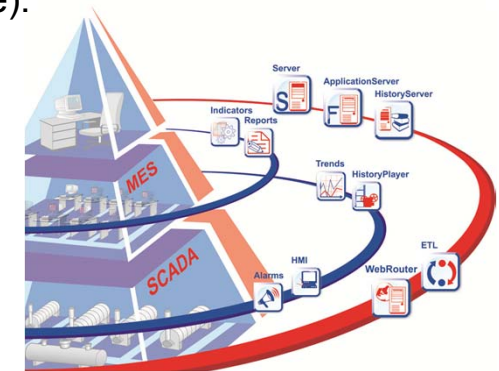
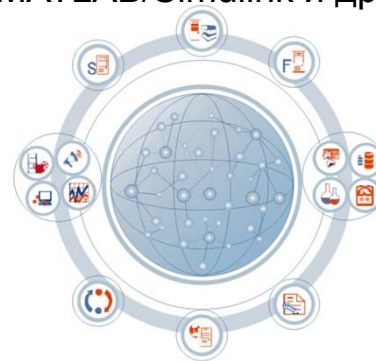
Аппаратная часть:

- **Вариант 1** – имитация технологического процесса, развитые средства трех уровней автоматизации (доминирование образовательной составляющей).
- **Вариант 2** – модельная реализация реального технологического процесса с применением только основных технических средств автоматизации нижнего и среднего уровней (доминирование исследовательской составляющей).
- **Вариант 3** – модельная реализация реального технологического процесса с развитыми средствами трех уровней автоматизации (образовательная и исследовательская составляющие сопоставимы).



Программная часть:

- **Прикладное ПО** для ПЛК (например, CoDeSys, OpenPCS, Simatic Step 7 и другие).
- **Системное ПО и SCADA-система** для APM оператора (например, Windows, Windows Server, Linux, Infinity, Integrity, TRACE MODE, WinCC и другие).
- **ПО для разработки моделей** процессов, проведения численного моделирования и обработки экспериментальных данных (например, MATLAB/Simulink и другие).



Компоненты лабораторной работы для проработки:

- 1) Общее описание работы. Что определяется и зачем – почему важно это измерять. Чему студенты научатся, выполняя данную лабораторную работу. Какие теоретические знания они укрепят, навык работы с какими приборами они получат, какие общие методы освоят. Есть ли аналоги данной лабораторной работы? Где проводятся исследования подобного рода или где могут быть использованы их результаты?
- 2) Методика выполнения работы, теоретические основы.
- 3) Описание установки (со схемой). Из данного пункта должна следовать реализуемость лабораторной работы как таковой.
- 4) Примерная смета создания экспериментального стенда.

VI. Компоненты лабораторной работы

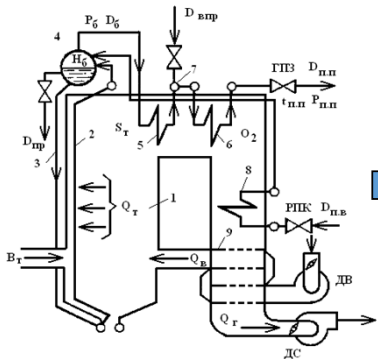
1. Общее описание работы

- 1) **Целью** лабораторной работы является получение практических навыков работы с типичным оборудованием трех уровней автоматизации, прикладным ПО, SCADA-системой, а также проведение экспериментального исследования качества работы MPC-регулятора (в том числе путем сравнения с качеством работы PI/PID-регулятора) в составе АСР экономичности процесса сжигания топлива энергетического котла по соотношению «топливо–воздух».
- 2) **Задачи** лабораторной работы:
 - изучить основные принципы автоматического регулирования нагрузки и процесса горения в топках энергетических котлов (на примере барабанных) с акцентом на АСР экономичности процесса сжигания топлива по соотношению «топливо–воздух»;
 - изучить структуру трехуровневой АСУ ТП, интерфейсы и протоколы передачи данных между уровнями автоматизации;
 - изучить принцип действия датчиков и первичных преобразователей, особенности прикладного ПО и SCADA-системы, а также получить практические навыки работы с ними;
 - изучить принципы функционирования MPC-регулятора и его преимущества по сравнению с PI/PID-регулятором для объектов с нелинейными свойствами и относительно большим временем запаздывания;
 - провести эксперименты и установить влияние достоверности описания математической модели технологического процесса, настроечных параметров MPC-регулятора (горизонт прогнозирования, горизонт управления, время цикла пересчета) на качество процесса регулирования.

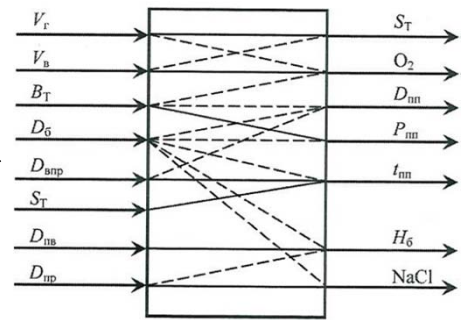
VI. Компоненты лабораторной работы

2. Методика выполнения работы, теоретические основы

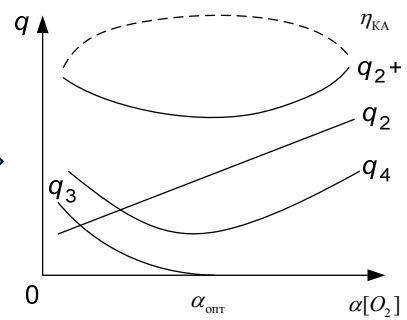
3) Основные сведения о технологическом объекте управления.



Паровой котел как объект регулирования



Основные АСР



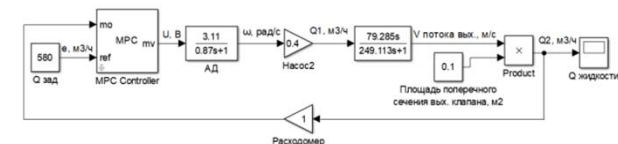
АСР нагрузки и процесса горения в топке

- по соотношению:
- «задание–воздух»;
 - «пар–воздух»;
 - «теплота–воздух»;
 - «топливо–воздух».

$$\eta_k = \frac{D_{н.л.}(i_0 - i_{н.в.})}{B_m Q_H^p} \quad \alpha = \frac{21}{21 - [O_2]}$$

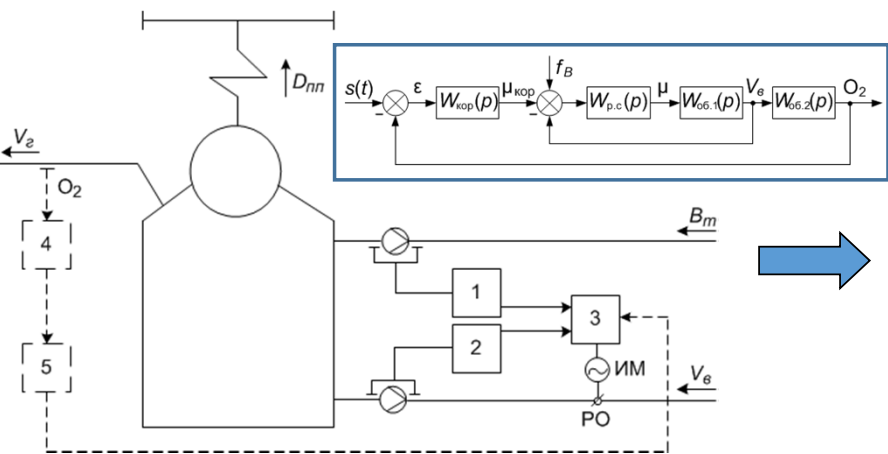
$$\eta_k = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

Регулирование экономичности процесса горения

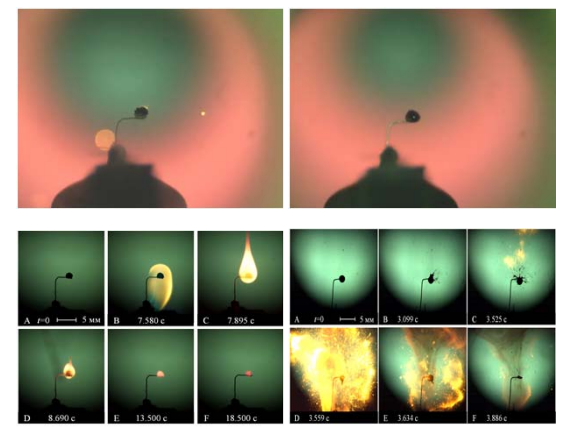


- максимальное отклонение содержания кислорода в дымовых газах (0,3 % от α) при возмущении нагрузкой 10 %;
- отклонение содержания кислорода в дымовых газах ($\pm 0,2$ %) в стационарном нормальном режиме;
- интегральная квадратичная оценка качества переходного процесса ($\leq 10(\%O_2)^2 \cdot c$) при возмущении нагрузкой 10 %.

Математическая модель ТП, требования к качеству работы АСР 8/18



АСР экономичности процесса горения по соотношению «топливо–воздух»

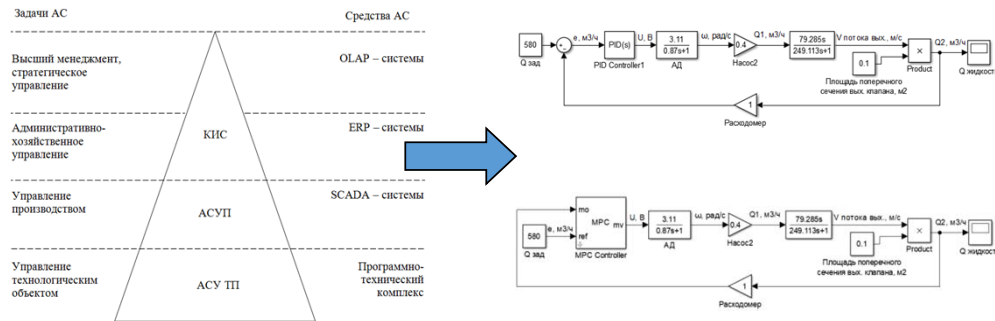


Жидкие топлива, топливные эмульсии и суспензии

VI. Компоненты лабораторной работы

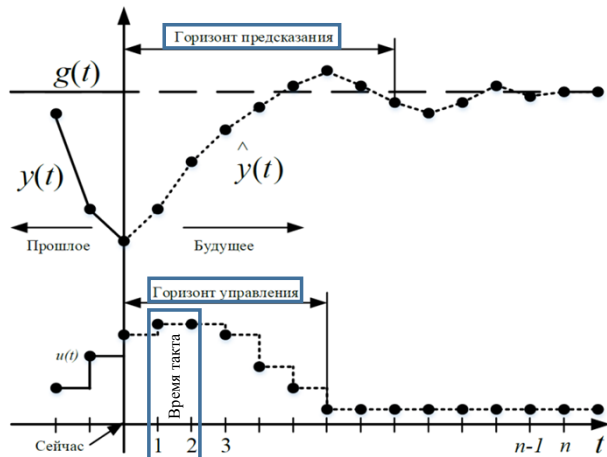
2. Методика выполнения работы, теоретические основы

4) Основные сведения об АСР, АСУ ТП.



Структура АСУ ТП

PI/PID-регулятор,
MPC-регулятор

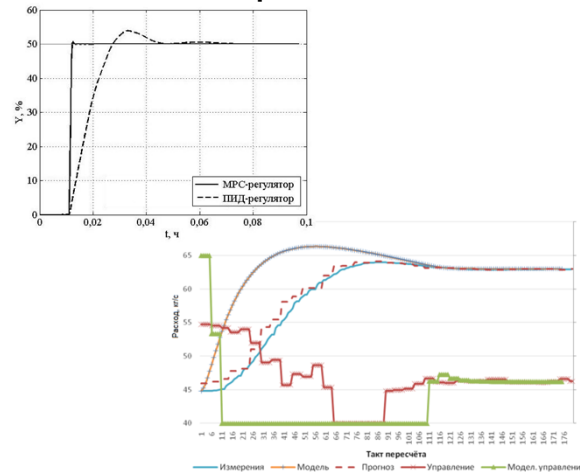


Настройка MPC-регулятора

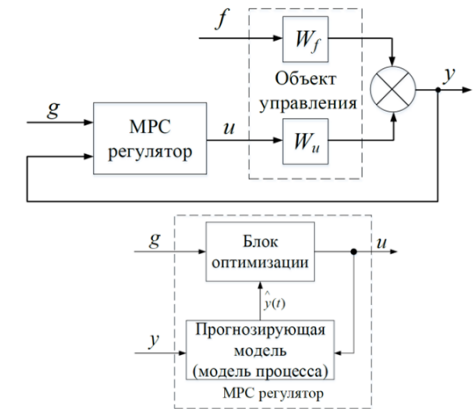
$$\left\{ \begin{aligned} \frac{k_p}{T_i} &= \frac{\omega(m^2+1) \operatorname{Im}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)}, \\ k_p &= -\frac{m \operatorname{Im}_{об}(m, \omega) + \operatorname{Re}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)}. \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{k_p}{T_i} &= \omega(m^2+1) \left[\omega C_2 - \frac{\operatorname{Im}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)} \right], \\ k_p &= -\frac{m \operatorname{Im}_{об}(m, \omega) + \operatorname{Re}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)} + 2\omega m C_2, \quad C_2 = k_p T_d. \end{aligned} \right.$$

PI/PID-регулятор,
определение ОПН методом РАФЧХ



Переходные процессы



Структура MPC-регулятора

Типичные оценки качества переходных процессов (по каналу задания и по каналу возмущающего воздействия):

- интегральная квадратичная ошибка;
- время регулирования;
- перерегулирование;
- степень затухания.

Оценки качества

VI. Компоненты лабораторной работы

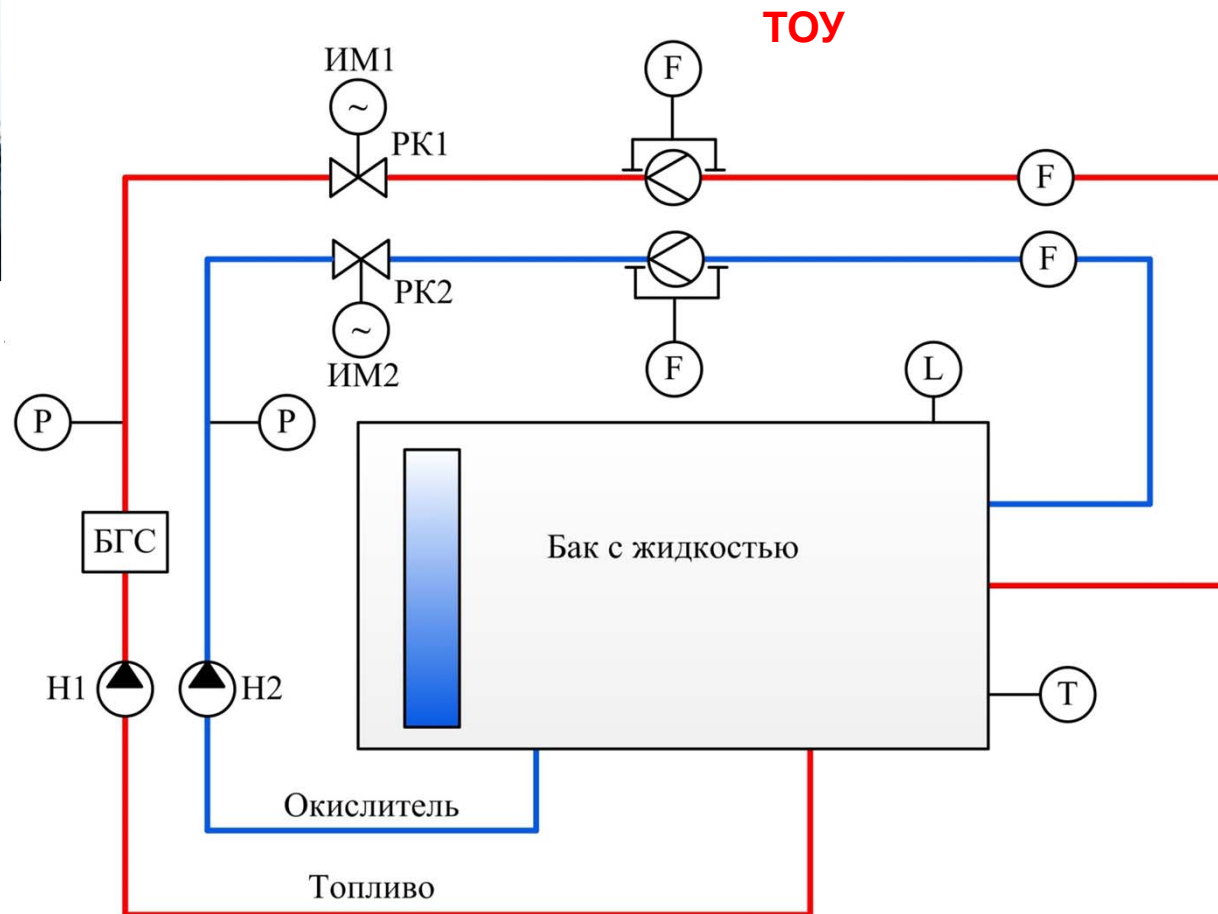
3. Описание установки

5) Описание экспериментального стенда и методов исследования.



+

ЩУ



ТОУ – бак с двумя контурами циркуляции жидкости (топливо и окислитель).

Отличие – топливный контур содержит блок динамического гидравлического сопротивления (механический или электромагнитный) для внесения стохастических возмущений.

VI. Компоненты лабораторной работы

4. Смета создания экспериментального стенда

Технические средства автоматизации.

№	Наименование	Тип, марка	Цена, руб.	Кол-во	Стоимость, руб.
1	Измерительный преобразователь абсолютного давления Siemens, диапазон измерения 0,63...63 бар, выходной сигнал 4-20 мА	SITRANS P DSIII	55 000	2	110 000
2	Диафрагма камерная, условный диаметр 40 мм, условное давление 0,3 бар	ДК-0,3-40	45 000	2	90 000
3	Преобразователь перепада давления Siemens, выходной сигнал 4-20 мА, диапазон измерений 2,5...250 мбар	SITRANS P DSIII	70 000	2	140 000
4	Измерительный электромагнитный преобразователь расхода Siemens, выходной сигнал 4-20 мА, класс точности 0,5	SITRANS MAG5000	103 000	2	206 000
5	Ультразвуковой уровнемер Siemens, диапазон измерений 0,25...6 м, выходной сигнал 4-20 мА, класс точности 0,15	SITRANS Probe LU	48 000	1	48 000
6	Измерительный преобразователь температуры Siemens, HCX Pt100, диапазон измерения -50...+200 °С, монтажная длина 170 мм, класс допуска В, выходной сигнал 4-20 мА	SITRANS TF2	15 000	1	15 000
7	Насос циркуляционный Grundfos UPE серии 2000 комплектно с частотным преобразователем, напор 1,8 м при максимальной подаче, питание 220 В	UPE 25-40	22 000	2	44 000
8	Клапан регулирующий HONEYWELL комплектно с редукторным электроприводом HONEYWELL	V5011R1026 ML7420A6017	35 000	2	70 000
9	Щит управления с ПЛК, подсистемами питания и микроклимата, аналоговыми и дискретными преобразователями, реле, блоками зажимов	ЭЛСИ-МА	360 000	1	360 000
10	АРМ оператора: Intel Core i7-10700 2.9/4.7GHz; SSD 2.5" SATA-3 500Gb Samsung 860 EVO; Монитор ASUS 27"; мышь, клавиатура	Intel Core i7	92 000	1	92 000
Итого			1 175 000		

VI. Компоненты лабораторной работы

4. Смета создания экспериментального стенда

ОСНОВНЫЕ СТАТЬИ РАСХОДОВ

№	Наименование	Стоимость, руб.	Примечание
1	Проектирование, разработка, конструирование, монтаж, пусконаладка	125 000	Зависит от квалификации
2	Технологический объект (рама, емкость, трубопроводы, запорная арматура)	200 000	Зависит от исполнения
3	Технические средства автоматизации (датчики, ИМ, РО, щит управления с ПЛК, АРМ оператора)	1 175 000	Зависит от производителя
4	ПО (системное, прикладное, SCADA, обработка)	–	Зависит от типа лицензии*
5	Расходные материалы	25 000	Монтаж стенда
Итого		1 525 000	

*возможно применение бесплатных студенческих лицензий в образовательных целях.

6) Порядок выполнения работы (программно-аппаратный комплекс; проведение эксперимента).

Разработка подробного описания последовательности действий при проведении лабораторной работы возможна после окончания монтажа лабораторного стенда в процессе проведения пусконаладки.

7) Варианты индивидуальных заданий.

В зависимости от подготовки студентов **3 уровня заданий: начальный** (оценка качества работы АСР); **базовый** (определение настроечных параметров MPC-регулятора; оценка качества работы АСР); **продвинутый** (разработка прогностической математической модели технологического процесса – варьирование коэффициентов; определение настроечных параметров MPC-регулятора – варьирование значений горизонта прогноза и горизонта управления в условиях оценки времени такта пересчета алгоритма; оценка качества работы АСР).

8) Содержание отчета.

Обязательные разделы: титульный лист; цель и задачи работы; индивидуальное задание; основные теоретические сведения о ТОУ, MPC-регуляторе; ход выполнения работы в рамках индивидуального задания (текстовое описание и скринсейвы экрана АРМ-оператора); результаты экспериментального исследования в виде таблиц и графиков; ответы на контрольные вопросы; список источников.

9) Контрольные вопросы.

Перечень состоит из **5 блоков** (технологический объект управления; АСР и АСУ ТП; экспериментальный стенд; MPC-регулятор; анализ и обсуждение полученных результатов), в каждом **не менее 5 вопросов**. Студенту для детальной самостоятельной проработки к защите отчета будет предлагаться по одному вопросу из каждого блока.

10) Список источников.

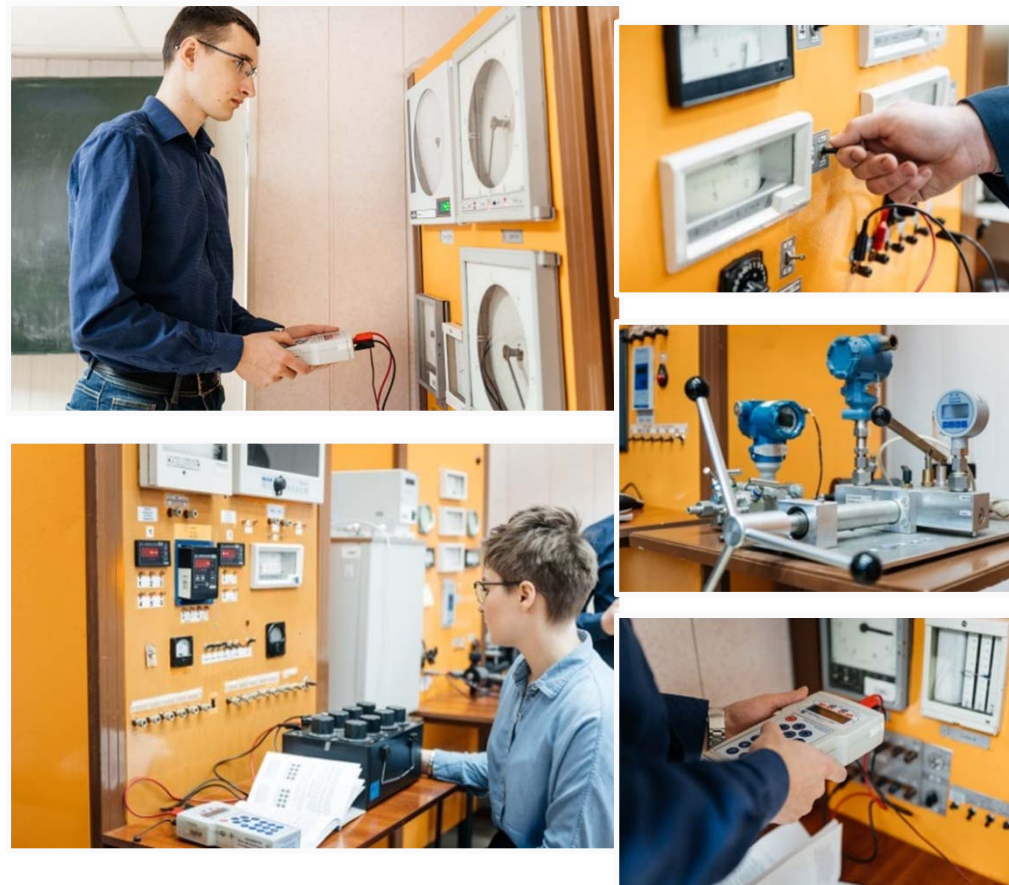
Публикации в журналах БД РИНЦ, WoS и Scopus: https://www.elibrary.ru/rubric_titles.asp?rcode=500000. 13/18

Учебные лаборатории

МСИС: 110 аудитория, 4 корпус ТПУ



ТИПСА: 219 аудитория, 4 корпус ТПУ



Учебные лаборатории



АСУ ТП: 111 аудитория, 4 корпус ТПУ



Научные лаборатории

Экология: 049 аудитория, 8 корпус ТПУ



Топлива: 128 аудитория, 8 корпус ТПУ



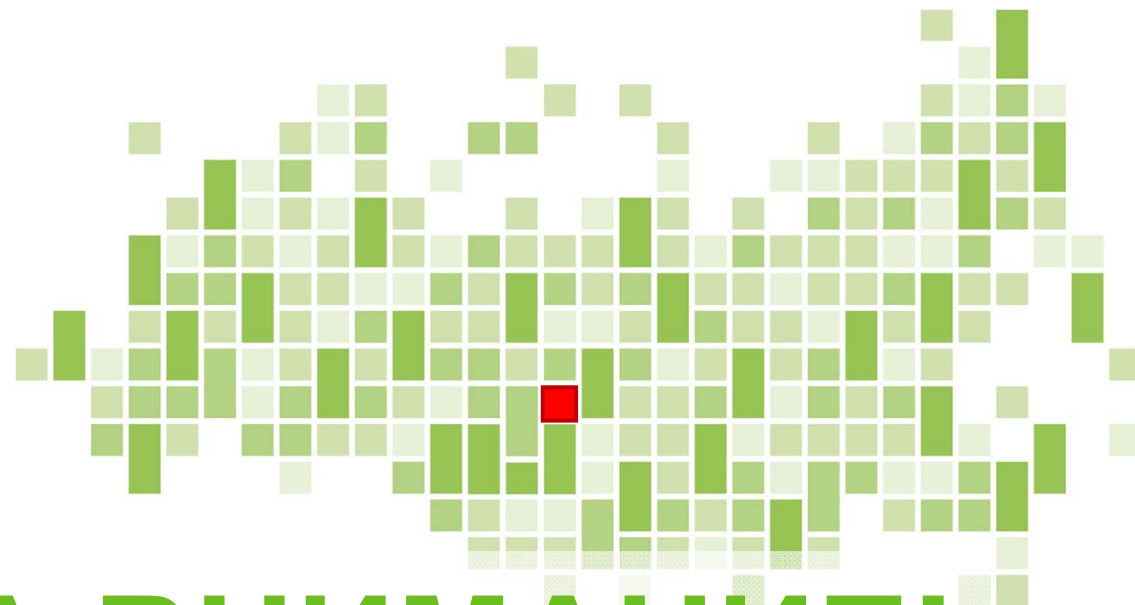
Научные лаборатории

ТМП: 137 аудитория, 8 корпус ТПУ



ГД: 264 аудитория, 8 корпус ТПУ





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30
Дмитрий Глушков, тел. (3822) 701-777 (1953)
e-mail: dmitriyog@tpu.ru
URL: <http://hmtslab.tpu.ru/>

