

УДК 681.5

**СТЕНД ОТЛАДКИ АЛГОРИТМОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**Блинов Николай Алексеевич<sup>1</sup>, Зорин Александр Геннадьевич<sup>2</sup>,  
Зорин Андрей Геннадьевич<sup>3</sup>, Зрюев Владислав Николаевич<sup>4</sup>, Зинин Николай Александрович<sup>5</sup>,  
Смирнов Александр Евгеньевич<sup>6</sup>, Стасовский Валентин Александрович<sup>7</sup>**

<sup>1</sup>Начальник группы;

Объединенный институт ядерных исследований;

Лаборатория физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;

старший инженер;

ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна»,

Кафедра общей физики;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;

e-mail: nikolay.a.blinov@mail.ru.

<sup>2</sup>Старший техник;

Объединенный институт ядерных исследований;

УНОРиМС / Научно-технический отдел АСУ;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;

e-mail: fergys321@mail.ru.

<sup>3</sup>Научный сотрудник;

Объединенный институт ядерных исследований;

Лаборатория физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;

e-mail: andrey.zorin@inbox.ru.

<sup>4</sup>Научный сотрудник;

Объединенный институт ядерных исследований;

Лаборатория физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;

e-mail: vlad@jinr.ru.

<sup>5</sup>Электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования;

Объединенный институт ядерных исследований;

Лаборатория физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;

<sup>6</sup>Электросварщик ручной сварки;

Объединенный институт ядерных исследований;

Лаборатория физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.

<sup>7</sup>Станочник широкого профиля;

Объединенный институт ядерных исследований;

Лаборатория физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;

Студент;

ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна»,

Кафедра прикладной геофизики;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;

e-mail: stasovskiy91@mail.ru.

Приводится описание стенда отладки алгоритмов системы стабилизации температуры, предназначенного для отработки принципов стабилизации температуры от +10С° до +28С° с точностью ± 0,1С° в автоматическом режиме, что необходимо при работе с контроллерами датчиков в физических установках.

Ключевые слова: стабилизация температуры, ПИД-регулирование.

## STAND FOR DEBUGGING OF TEMPERATURE REGULATION'S ALGORITHM

**Blinov Nikolay Alexeevich<sup>1</sup>, Zorin Alexander Gennadevich<sup>2</sup>,  
Zorin Andrey Gennadevich<sup>3</sup>, Zruev Vladislav Nikolaevich<sup>4</sup>, Zinin Nikolay Alexandrovich<sup>5</sup>,  
Smirnov Alexander Evgen'evich<sup>6</sup>, Stasovski Valentin Alexandrovich<sup>7</sup>**

<sup>1</sup>Group director;

Joint institute for nuclear research,

Laboratory of High Energy Physics named after V. I. Veksler and A. M. Baldin;

Russia, 141980, Dubna, Moscow reg., 6 Joliot-Curie st.;

Dubna State University,

Department of general physics;

Russia, 141980, Moscow reg., Dubna, 19 Universitetskaya st.;

e-mail: nikolay.a.blinov@mail.ru.

<sup>2</sup>Senior technician;

Joint institute for nuclear research,

SO&IC Office / Automated Management Information Systems Department;

Russia, 141980, Dubna, Moscow reg., 6 Joliot-Curie st.;

e-mail: fergys321@mail.ru.

<sup>3</sup>Researcher;

Joint institute for nuclear research,

Laboratory of High Energy Physics named after V. I. Veksler and A. M. Baldin;

Russia, 141980, Dubna, Moscow reg., 6 Joliot-Curie st.;

e-mail: andrey.zorin@inbox.ru

<sup>4</sup>Researcher;

Joint institute for nuclear research,

Laboratory of High Energy Physics named after V. I. Veksler and A. M. Baldin;

Russia, 141980, Dubna, Moscow reg., 6 Joliot-Curie st.;

e-mail: vlad@jinr.ru.

<sup>5</sup>Electrical mechanic;

Joint institute for nuclear research,

Laboratory of High Energy Physics named after V. I. Veksler and A. M. Baldin;

Russia, 141980, Dubna, Moscow reg., 6 Joliot-Curie st..

<sup>6</sup>Electric welder of manual welding;

Joint institute for nuclear research,

Laboratory of High Energy Physics named after V. I. Veksler and A. M. Baldin;

Russia, 141980, Dubna, Moscow reg., 6 Joliot-Curie st..

<sup>7</sup>Universal machine tool operator;

Joint institute for nuclear research,

Laboratory of High Energy Physics named after V. I. Veksler and A. M. Baldin.

Russia, 141980, Dubna, Moscow reg., 6 Joliot-Curie st.;

Student; Dubna State University,

Department of applied geophysics;

Russia, 141980, Moscow reg., Dubna, 19 Universitetskaya st.;

e-mail: stasovski91@mail.ru.

*Description of stand for debugging of temperature regulation's algorithm from +10C<sup>0</sup> to +28C<sup>0</sup> within the accuracy  $\pm 0,1C^0$  in automatic mode with necessary during work with sensor controller physical installation.*

Keywords: temperature regulation, PID-control.

## Введение

Стенд отладки алгоритмов системы стабилизации температуры предназначен для отработки принципов стабилизации температуры от  $+10C^0$  до  $+28C^0$  с точностью  $\pm 0,1C^0$  в автоматическом режиме, что необходимо при работе с контроллерами датчиков в физических установках.

В ходе испытаний обнаружилось, что промышленные контроллеры, использующие классические алгоритмы, не предназначены для точной автонастройки ПИД-коэффициентов в сильно инерционных системах, где тепловая волна идет до контрольной точки больше двух с половиной минут и где точность регулирования температуры требуется меньше двух градусов. В результате понадобился стенд, на котором можно было находить в ручном режиме коэффициенты ПИД-регулирования для классической формулы (1) [1, 2, 3, 4, 5, 6]:

$$N = \frac{100}{K_p} \left( \Delta T + \frac{1}{K_i} \int_0^t \Delta T dt - K_d \frac{dT}{dt} \right), \tag{1}$$

где  $\Delta T = T_{установка} - T_{текущая}$ ,  $T_{текущая}$  – измеренная температура в текущий момент времени  $t$ ,  $N$  – мощность в относительных единицах. Коэффициенты  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  подбираются вручную после серии тестовых запусков, главной целью которых является нахождение параметров передаточной функции.

Стенд можно условно разделить на три части: управление, исполнительная часть и водные магистрали с тепловым экраном, которые в «железе» выглядят как шкаф управления, исполнительный шкаф и магистрали до контрольной точки, где поддерживается заданная температура (рис. 1 и рис. 2).

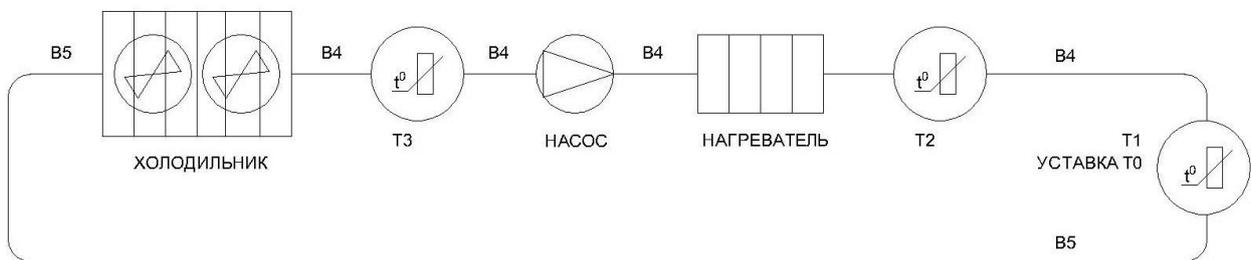
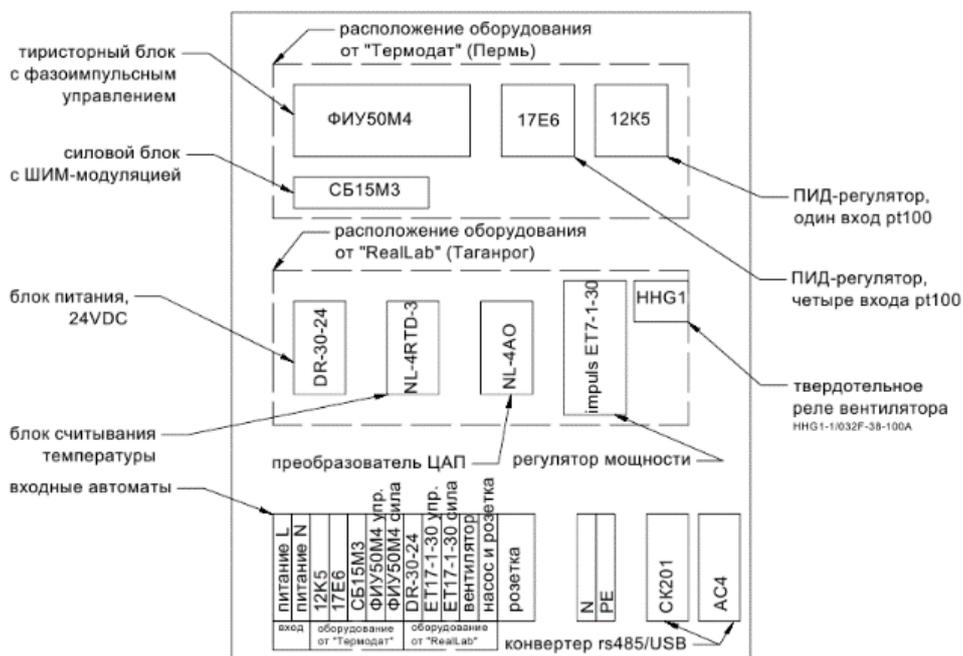


Рис. 1. Принципиальная схема с расположением датчиков температуры, насоса, нагревателя и холодильника



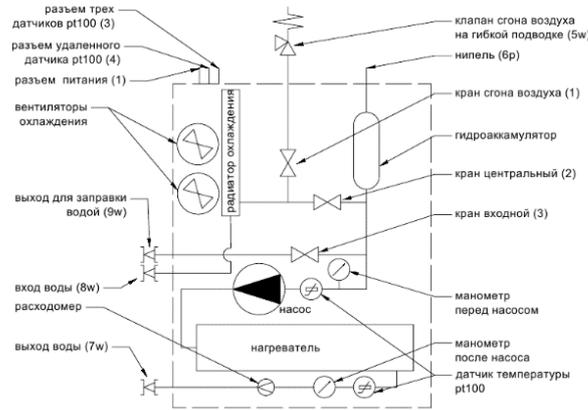


Рис. 2. Шкаф управления и шкаф с исполнительными устройствами

Расстояние между лабораторным нагревателем и холодильником можно выбирать до 200 метров или общая длина не больше 400 м. В качестве теплоносителя использовалась обычная вода. В стенде для измерения температуры используются датчики *pt100* с трехпроводным подключением. Управление стендом построено на базе промышленных контроллеров «*RealLab!*» и программного обеспечения, разработанного специально для стенда.

В качестве датчиков температуры использовались платиновые датчики *pt100* в кожухе от фирмы «Термодат ТС713А-d6-H030-L2-M16-МГТФЭ-Pt100». Теплоносителем выступала обычная вода. Подводящие магистрали – гибкие шланги с внутренним диаметром 8 мм. При общей длине шлангов 215 метров общий объем воды в системе составляет примерно 11 л.

Одним из устанавливаемых насосов был циркуляционный насос с мокрым ротором и напором до 8 м «*Wilo Star-RS 25/8*». Как оказалось, чем мощнее насос, тем быстрее доходит тепловая волна до контрольной точки и легче идет процесс регулировки. Мощность насоса ограничена прочностью водной магистрали и запорной арматуры. Характеристика насоса приведена на рис. 3. Нагреватель – это тэн мощностью ~700 Вт в кожухе с протоком теплоносителя (рис. 4).

Алгоритм управление стендом осуществляется с компьютера по линии *rs485* с использованием ЦАП для управления цифровым регулятором мощности и АЦП, считывающим температуру с датчиков.

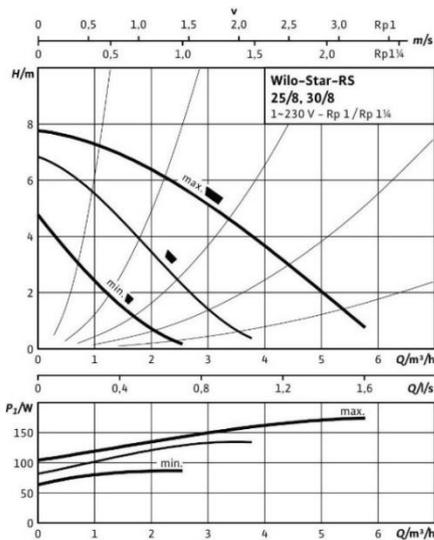


Рис. 3. Кривая производительности насоса «Wilo «Star 25/8».

Здесь *Rp* – внутренняя резьба трубная с углом 550 цилиндрическая

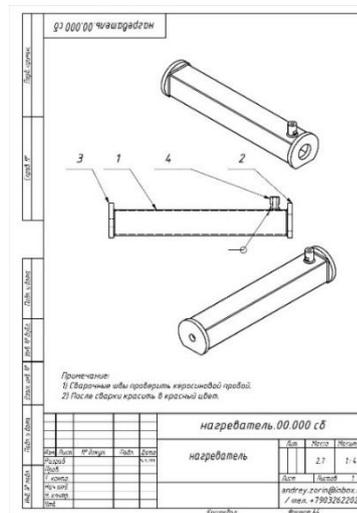


Рис. 4. Кожух нагревательного элемента

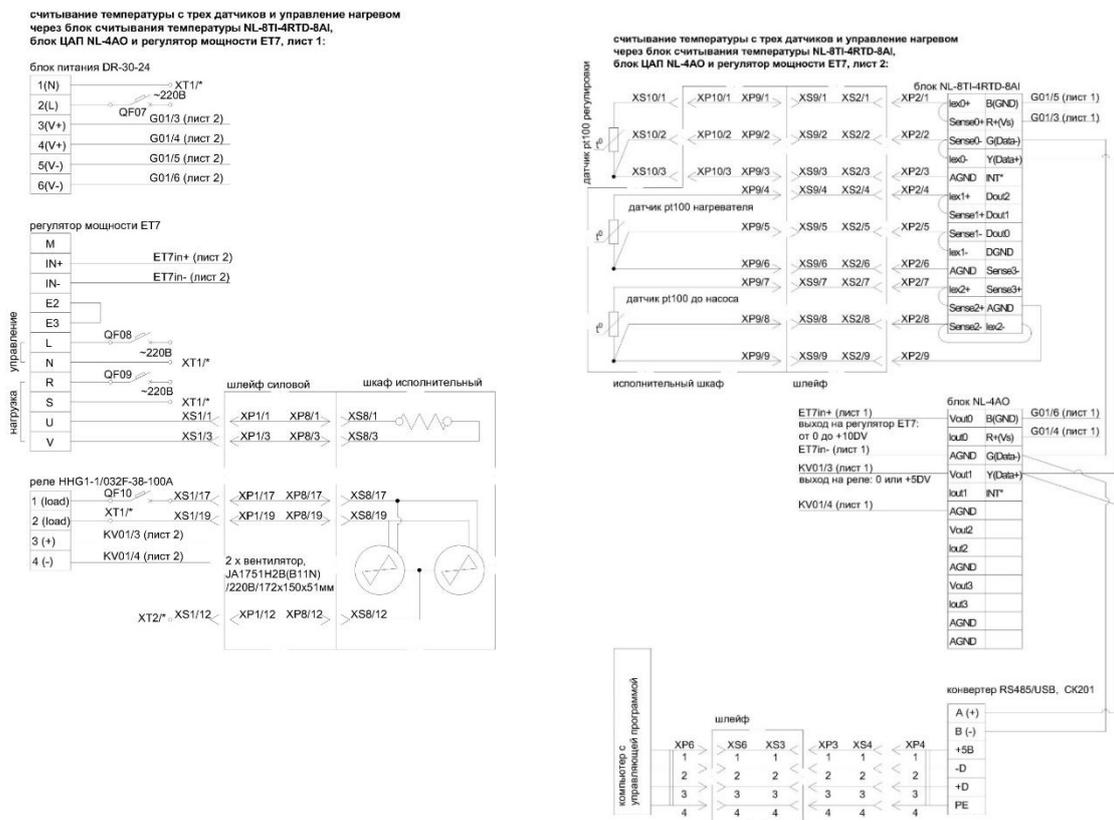


Рис. 5. Основные подключения исполнительных устройств и устройств управления

## Управление регулированием

Управляющая программа была специально разработана для стенда. Основные функции программы – это считывание и обработка данных, управление устройствами посредством шины RS485. Сама программа была написана на языке C#. Вообще, для написания программы может использоваться любой язык программирования, в котором присутствуют или в котором можно набрать библиотеки обмена данными с портом rs485 и базами данных.

При разнице в 5 градусов между входной температурой T3 и температурой уставки T0 (см. рис. 1) необходимо использовать два режима: прогрев системы и рабочий режим поддержания температуры.

Программа управления с периодичностью 1с опрашивает три датчика температуры. Вычисляется отклонение от уставки  $\Delta T$ , считается интегральная сумма отклонений  $\sum_0^t \Delta T \Delta t$  и скорость изменения температуры  $\Delta T / \Delta t$ . Все это нужно, чтобы подсчитать мощность в относительных единицах, которая нормируется в зависимости от мощности нагревателя и которая ограничена в зависимости от разницы между температурой в контрольной точке T1 и температурой нагревателя T2, рисунок 1.

Команды управления формируются программой и отправляются по rs485 в ASCII кодах, например:

- #041+05.000\r – (включить вентиляторы);
- #041+00.000\r – (выключить вентиляторы);
- #040+"05.000"\r – (половина мощности нагревателя);
- #040+"00.000"\r – (нагреватель выключен).

Для первоначальной настройки АЦП и ЦАП «realLab NL-8TI-4RTD-8AI», NL-4AO» [7] использовалась утилита «NLconfig». Сами блоки настраиваются гибко и показали стабильную работу во время многочасовых испытаний.

## Алгоритм

Из-за инерционности системы известные алгоритмы автоматической подстройки и регулирования с одним датчиком температуры не подошли. Для регулировки используется три датчика  $pt100$  с трехпроводным подключением, расположенные после нагревателя, в контрольной точке и после охладителя: Алгоритм программы представлен на рис. 6.

Мощность вычисляется по классической формуле ПИД-регулирования. Коэффициенты подбираются на основе алгоритма Зиглер-Никольса [8, 3]. При приближении температуры в контрольной точке  $T1$  к температуре уставки  $T0$  мощность пропорционально уменьшается. Ввиду того, что система инерциальна и чтобы не допустить перегрева, когда температура после нагревателя  $T2$  становится больше на полградуса, нагрев прекращается.

Во избежание перегрева при разнице температур после нагревателя  $T2$  и в конце контура  $T3$  перед насосом в 3.5 градуса включаются вентиляторы.

Приведенный алгоритм сильно зависит от температуры на входе  $T3$ : чем она более стабильна, тем меньше колебаний в контрольной точке  $T1$ .

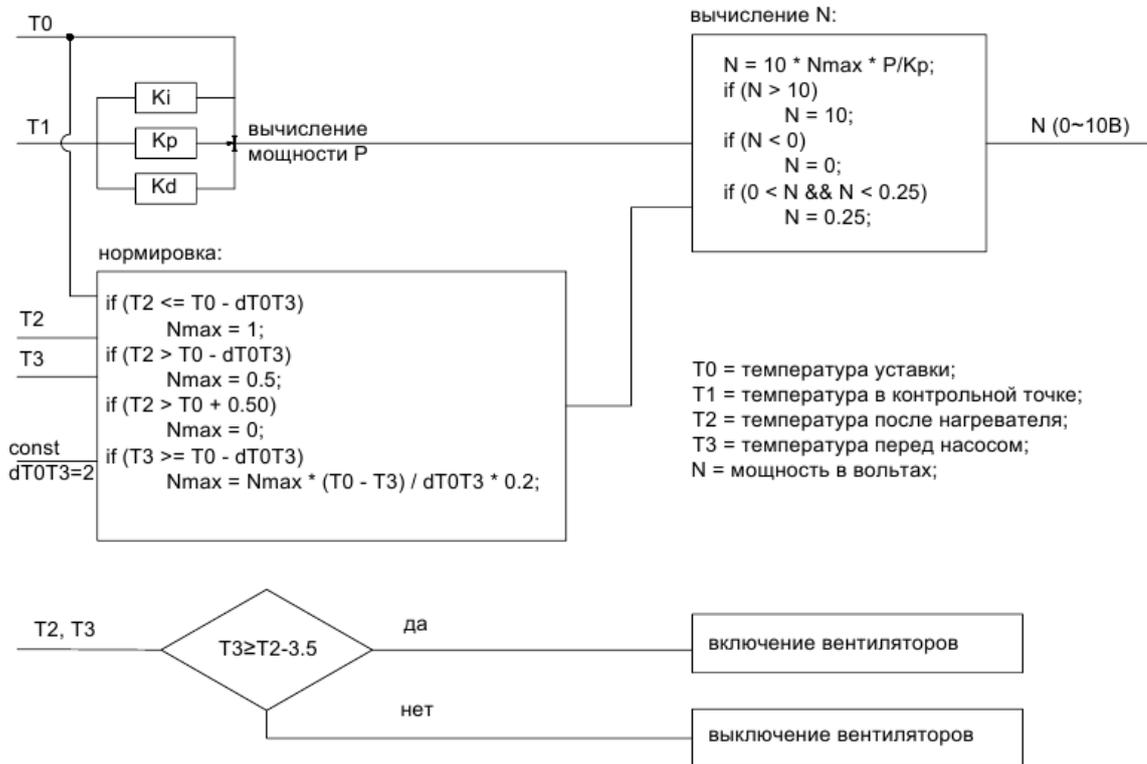


Рис. 6. Алгоритм программы

## Возможные способы подбора коэффициентов регулирования

В литературе встречается не так много алгоритмов автоматического подбора коэффициентов ПИД-регулирования, и все они относятся к малым или «слабоинерционным» системам, четкого определения которых в литературе нет.

В приведенной системе автоматические алгоритмы подбора коэффициентов работали тогда, когда время реакции системы на ПИД-регулятор была меньше двух с половиной минут. Это короткий круг циркуляции меньше 20 м. И чем быстрее была реакция воздействия на ПИД-регулятор, то есть чем меньше был круг циркуляции, тем точнее был подбор коэффициентов регулирования. Таким образом, удавалось поддерживать температуру уставки в коридоре от 4 градусов до 0.5 градуса.

Для более точного поддержания температуры в пределах 0.1 градуса коэффициенты подбирались на основе классического алгоритма Зиглер-Никольса. И после каждого изменения в системе и изменения температуры окружающей среды на 5 градусов коэффициенты приходилось уточнять снова.

Процедуру определения коэффициентов регулирования в формуле (1) для регулирования сильно-инерциальных систем с точностью до 0.2°C можно разделить на три блока: основная настройка, корректировка 1, корректировка 2.

## I. Основная настройка

1. Рассчитать время движения воды от нагревателя до контрольной точки, основываясь на показаниях расходомера в исполнительном шкафу и длине линии между нагревателем и контрольной точкой. Нагреватель оставить выключенным или включить на минимальную мощность, чтобы избежать перегрева системы. Время движения можно вычислить по следующей формуле:

$$t = \frac{V_{\text{воды}}}{Q_{\text{воды}}},$$

где  $V_{\text{воды}}$  – объем жидкости в линии от нагревателя до контрольной точки в литрах,  $Q_{\text{воды}}$  – расход воды в литрах/с.

2. Далее производим нагрев системы по формуле:

$$N = \frac{100}{K_p}.$$

Плавно уменьшаем пропорциональный коэффициент  $K_p$  с 200 с учетом времени движения воды до контрольной точки.

3. Подождем, когда температура достигнет установившегося значения или установившихся колебаний.

4. Если в установившемся режиме отсутствуют колебания температуры (температура в этом случае всегда будет меньше температуры регулирования), можно уменьшить коэффициент  $K_p$  до тех пор, пока не начнутся заметные температурные колебания обязательно с превышением температурной уставки.

5. Если в установившемся режиме уже наблюдаются колебания температуры, надо увеличить коэффициент  $K_p$  до тех пор, пока колебания температуры не прекратятся.

6. Необходимо найти критическое значение коэффициента  $K_{p, \text{критическое}}$ , при котором появляются температурные колебания (пункт 4) или прекращаются (пункт 5).

7. Измеряется период температурных колебаний  $\tau$  после их появления (пункт 4) или перед их прекращением (пункт 5).

8. Значения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  вычисляются в соответствии с формулами:

$$K_p = 1,7K_{p, \text{критическое}}$$

$$K_i = 0,5 \tau,$$

$$K_d = 0,12 \tau.$$

## II. Корректировка 1

9. Назначить уставку  $T_{\text{уставки}}$  равной  $T_{\text{регулирования}}$  или меньшей

$$0,7T_{\text{регулирование}} < T_{\text{уставки}} < T_{\text{регулирования}}$$

чтобы избежать перегрева.

10. Включить позиционный режим регулирования:  $K_p$ , то есть регулирование по формуле:

$$N = \frac{100}{K_p}.$$

11. В установившемся режиме колебаний температуры измерить еще раз период  $\tau$  колебаний температуры (время между соседними максимальными или минимальными значениями температуры). Измерить также полный размах колебаний температуры  $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ .

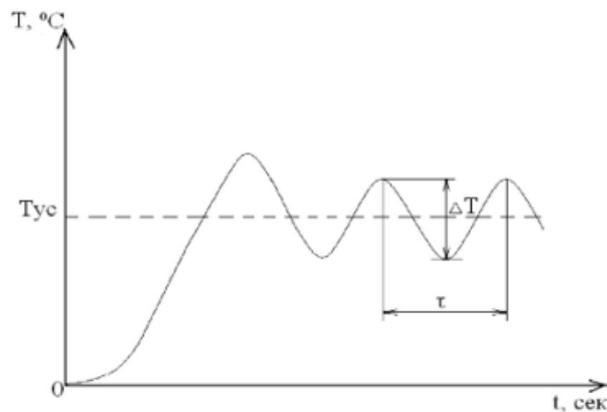


Рис. 7. Пояснение к алгоритму определения коэффициентов регулирования

12. Установите значения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  в соответствии с формулами:

$$K_p = 1,2\Delta T,$$

$$K_i = 1,5 \tau,$$

$$K_d = 0,2 \tau.$$

### III. Корректировка 2

13. В процессе работы надо будет уточнить дифференциальный коэффициент  $K_d$ , который определяет скорость реакции ПИД-регулятора на внешнее воздействие или просто изменение температуры в контрольной точке. Собственно, дифференциальная часть определяет размах колебаний температуры. Пропорциональная и интегральная части подстраивают температуру грубо к требуемому значению.

В руководстве [9] можно ознакомиться с тонкой настройкой или заменить формулу (1) на формулу с экспонентной из предложенных в статьях [10, 11, 12, 13].

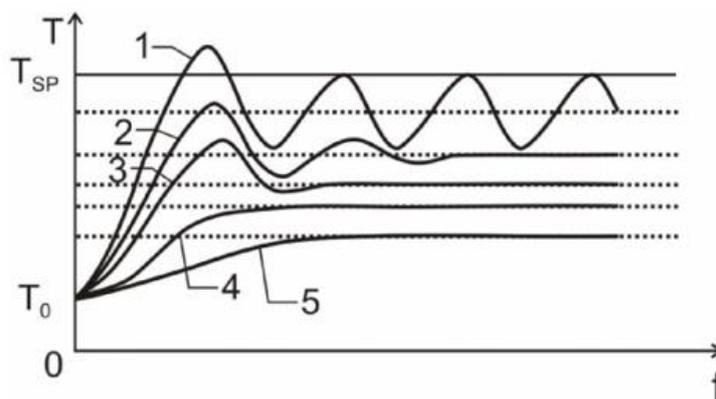


Рис. 8. Настройка коэффициентов [9]

## Некоторые результаты

Нахождение параметров передаточной функции:

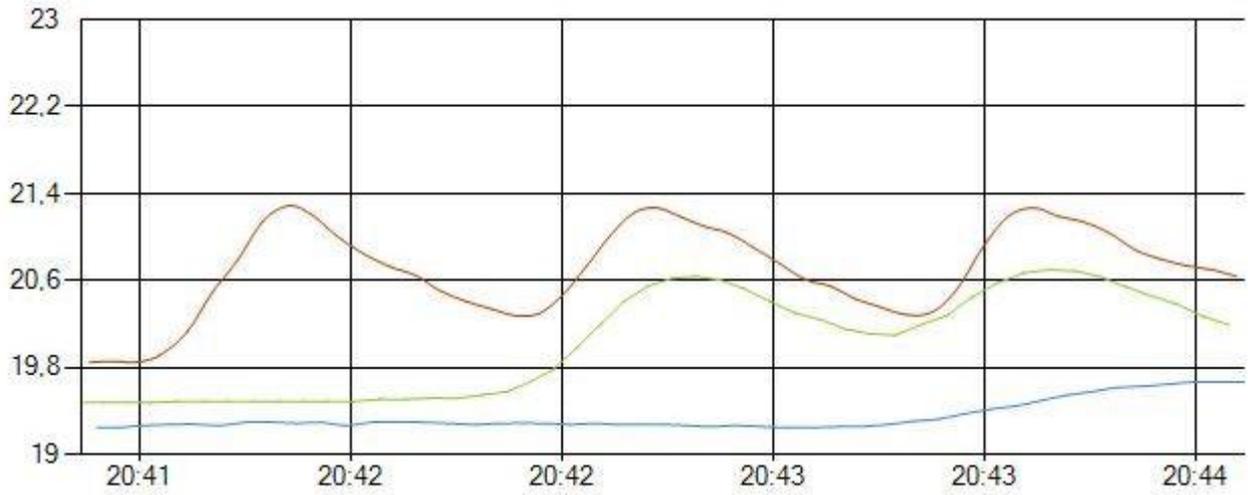


Рис. 9. Красная линия – температура нагревателя  $T_2$ , зеленая – температура в контрольной точке  $T_1$ , синяя – температура после холодильника  $T_3$ , на входе

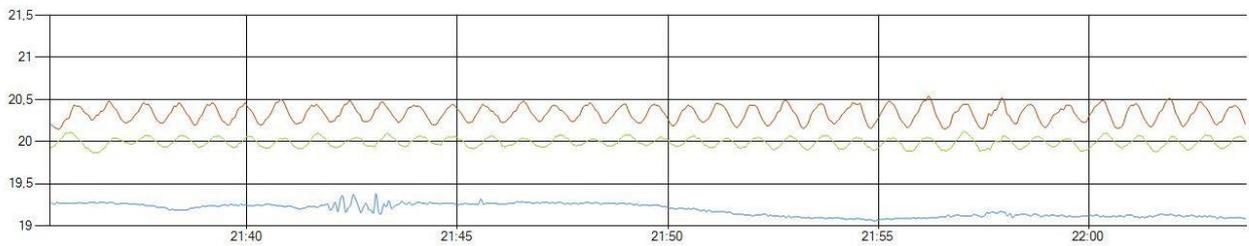


Рис. 10. Красная линия – температура нагревателя  $T_2$ , зеленая – температура в контрольной точке  $T_1$ , синяя – температура после холодильника  $T_3$ , на входе, температура уставки  $T_0 = 200\text{C}$ , длина 200м, до контрольной точки дистанция 100 м

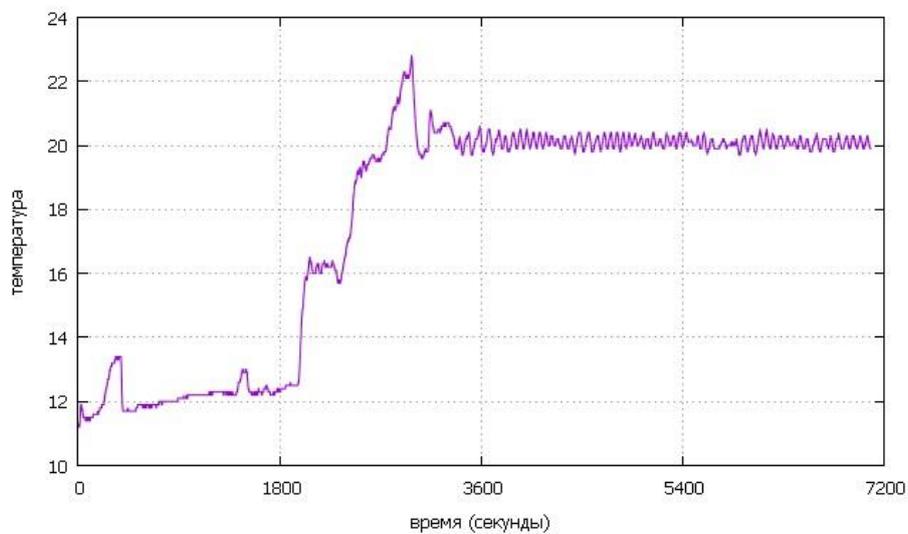


Рис. 12. Температура в контрольной точке  $T_1$ , уставка  $T_0 = 200\text{C}$ , длина 200 м, до контрольной точки дистанция 100 м

## Список литературы

1. Ziegler–Nichols method. – [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols_method).
2. Ботов А. Перевод статьи «Просто о ПИД-алгоритмах». – [Электронный ресурс]. URL: [http://roboforum.ru/wiki/Перевод\\_статьи\\_%22Просто\\_о\\_ПИД-алгоритмах%22](http://roboforum.ru/wiki/Перевод_статьи_%22Просто_о_ПИД-алгоритмах%22).
3. Глава 6.7 [Раздел книги] // Модули автоматике серии NL:NL-8TI, NL-4RTD, NL-8AI. – Таганрог : НИЛ АП, 2013.
4. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации, часть 1 // СТА. – 2007. – №4. – С. 86-97.
5. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации, часть 2 // СТА. – 2008. – №1. – С. 86-99.
6. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации, часть 1 // СТА. – 2006. – №4. – С. 66-74.
7. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации, часть 2 // СТА. – 2007. – №1. – С. 78-88.
8. Дорф Р. и Бишоп Р. Современные системы управления. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2002.
9. Зорин С. В. ПИД-закон регулирования. Методы нахождения ПИД коэффициентов. – Пермь : [б.н.], 2017.
10. Карпов В. Э. ПИД-управление в нестрогом изложении. – Москва : [б.н.], 2012.
11. Лукас В. А. Теория автоматического управления. – Москва : Недра, 1990.
12. Методика настройки цифрового пид-регулятора. – Санкт-Петербург : ООО «Автоматика», 2010.
13. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2008.