

УДК 681.536

**Ли́ра Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы сбора и обработки информации», Казанских национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, [lira.a.v@yandex.ru](mailto:lira.a.v@yandex.ru)

**Герке Андрей Романович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы сбора и обработки информации», Казанских национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, [gerke@kstu.ru](mailto:gerke@kstu.ru)

**Гайнуллин Рустем Нусратуллович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы сбора и обработки информации», Казанских национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, [gainullin@kstu.ru](mailto:gainullin@kstu.ru)

**Хабиров Анвар** – магистрант кафедры «Автоматизированные системы сбора и обработки информации», Казанских национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, [khabirov@yandex.ru](mailto:khabirov@yandex.ru)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД НА БАЗЕ ПЛК ДЛЯ  
ИЗУЧЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИД  
РЕГУЛИРОВАНИЯ С ШИМ-УПРАВЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ В  
ОБЪЕКТЕ**

**Аннотация:** Рассмотрен экспериментальный стенд, созданный на базе микроконтроллерной техники, позволяющий исследовать переходные характеристики реального объекта и находить оптимальные настроечные коэффициенты ПИД регулятора, реализованного программно для ПЛК. На стенде

рассмотрены три уровня системы автоматического управления технологическим процессом, выполненных на базе программируемого логического контроллера ОВЕН-73. Рассмотрено взаимодействие между уровнями АСУ ТП. Рассмотрены характеристики рабочего места оператора с использованием инструмента визуализации среды разработки Codesys 2.3.9. Представлены варианты изменения переходной характеристики регулирования для выбранного объекта при различных настройках коэффициентов ПИД – регулятора. Показано их влияние на качество регулирования. Таким образом, стенд, позволяет находить оптимальные настройки ПИД-регулятора для рассматриваемого объекта регулирования с одновременной визуализацией переходных характеристик на экране рабочего места оператора.

**Ключевые слова:** программируемый логический контроллер, регулятор, закон регулирования, система автоматического регулирования.

*Currently, chemical technological processes require the mandatory use of automatic control systems. The modern trend is the use of microprocessor technology for these purposes, implemented on the basis of programmable logic controllers (PLC). This approach provides flexibility in implementing software for a wide range of production management tasks. An important problem to be solved in this case is finding optimal parameters that meet the strict requirements of regulation quality criteria. The implementation of this task is possible only with the use of experimental data obtained during a real experiment at a technological facility. An experimental stand created on the basis of industrial microcontroller technology is considered, which allows one to study the transient characteristics of a real object (reactor) and find the optimal tuning coefficients of a PID controller implemented in software for a PLC. The stand examined three levels of the automatic control system for the technological process of maintaining the temperature in the reactor, under conditions of external disturbance. The practical task is implemented on the basis of a programmable logic controller OWEN-73. The interaction between the levels of automated process control systems is considered. The characteristics of the operator's workplace are considered using the Codesys 2.3.9 development environment visualization tool. Options for changing the transient control*

*response for a selected object are presented with different settings of the PID controller coefficients. Their influence on the quality of regulation is shown. Thus, the stand allows you to find the optimal settings of the PID controller for the control object under consideration with simultaneous visualization of transient characteristics on the screen of the operator's workplace.*

## **Введение**

В настоящее время в системах управления широко применяются ПИД-регуляторы, которые используются в цепях обратной связи. Обычно они устанавливаются в системах с автоматическим управлением и поддерживают на определенном уровне значения параметров технологического процесса.

В качестве примера можно рассмотреть объекты управления в Ямал СПГ - проект по добыче, сжижению и поставкам природного газа на полуострове Ямал, который предусматривает, в частности, строительство завода по производству сжиженного природного газа (СПГ) мощностью около 16,5 млн тонн в год, где широко применяется ПИД регулирование на разных этапах сжижения природного газа.

Как известно, одной из важных задач, стоящих перед операторами кустов газовых скважин (КГС) является поддержание, в соответствии с технологическим режимом, определенного соотношения между расходом и давлением газа на каждой из скважин. На данном этапе решается задача максимально увеличить объем добываемого газа, но при этом не допустить превышение допустимой депрессии. Депрессия газового пласта — разность между пластовым давлением в районе скважины и её забойным давлением, вызывающая движение газа из пласта к забою скважины. С увеличением депрессии возрастает дебит эксплуатационной скважины [1]. При превышении допустимой депрессии становится невозможна дальнейшая разработка скважины. Для решения данной задачи используются два ПИД-регулятора на каждую скважину и вычислительный блок выбора по наименьшему управляющему сигналу.

При увеличении уставки на регуляторе расхода, регулирующая арматура начинает постепенно открываться, увеличивая расход, при этом давление в трубопроводе начинает падать. В результате расход увеличивается до тех пор, пока управляющий сигнал, подаваемый с ПИД-регулятора по расходу не превысит управляющий сигнал ПИД-регулятора по давлению, тогда вычислительный блок переключает управление на первый регулятор. Так достигается оптимальный максимум расхода для каждой скважины, исключая риски превышения значения допустимой депрессии. Такой подход к решению данной задачи позволяет всего двум операторам следить за работой более чем двухсот скважин.

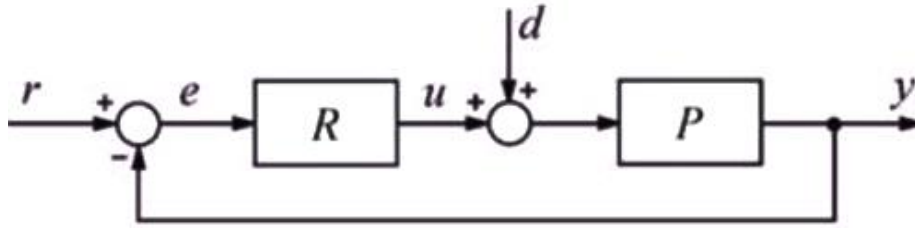
В связи с этим, в современных условиях актуальной проблемой является выбор оптимальных режимов настройки для регулирующих устройств.

Одним из перспективных направлений решения подобной задачи является использование программируемых контроллеров (ПЛК) с возможностью взаимодействия с рабочей станцией оператора на базе персонального компьютера (ПК).

В связи с этим целью данной работы является разработка и создание экспериментального стенда на базе ПЛК для определения оптимальных настроек ПИД-регулятора для объекта регулирования (реактора) с одновременной визуализацией переходных характеристик на экране рабочего места оператора.

Разработанный стенд является универсальным и позволяет решать задачи по оптимальным настройкам ПИД-регуляторов используемых в широком спектре технологических процессов.

В качестве тестовой платформы был исследован процесс обработки сырья в определенном температурном режиме. Моделируемый процесс состоит из объекта регулирования, датчика температуры, электронагревательного элемента, контроллера, работающего по закону ПИД регулирования. Поддержание заданного температурного режима осуществляется с помощью сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ), формируемого контроллером ОВЕН 73L.



**Рис. 1 - Система автоматического регулирования**

**Fig. 1 - Automatic control system**

На рисунке 1 представлена классическая система автоматического регулирования с обратной связью [2]. Блок R - регулирующий контроллер, P - объект регулирования,  $r$  – уставка регулирования,  $e$  – сигнал рассогласования,  $u$  – управляющий сигнал регулятора,  $y$  – регулируемый параметр,  $d$  – возмущающие воздействия.

Экспериментальный стенд представляет собой 3 уровневую систему автоматического управления технологическим процессом, выполненную на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) ОВЕН 73 (**Error! Reference source not found.**):

- к нижнему уровню системы относится датчик температуры ТСМ 50М, и нагревательный элемент резистивного типа;
- средний уровень реализован на базе ПЛК ОВЕН 73;
- верхний уровень представляет собой рабочее место оператора, реализованное в среде разработки Codesys 2.3.9 и использующее интерфейс управления системой ПИД регулирования с выводом всей текущей информации на монитор.



**Рис. 2 - Схема взаимодействия между уровнями АСУТП**

**Fig.2 - Scheme of interaction between levels of automated process control systems**

Взаимодействие между уровнями системы реализовано следующим образом. Рабочее место оператора (верхний уровень системы) через интерфейс RS-232 соединяется с контроллером посредством программы, созданной в среде разработки Codesys 2.3.9. В данной среде при помощи инструмента визуализации реализован человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) с использованием индикации параметров системы, трендов и переключателей для управления контроллером. ПЛК с загруженной в него разработанной программой регулирования температуры по ПИД закону представляет собой средний уровень системы. В программе регулирования температуры формируется величина управляющего сигнала от 0 до 100 % которая рассчитывается исходя из рассогласования между переменной, считанной с канала подключенному к датчику температуры и уставкой, а также установленных коэффициентов ПИД регулирования. Величина управляющего сигнала поступает в канал исполнительного устройства (нагревательного элемента) и реализуется в управлении выходным реле по принципу широтно-импульсной модуляции. Стоит отметить, что программа управления контроллером написана таким образом, что ПЛК может работать автономно, без верхнего уровня. Вся необходимая информация (уставка регулирования, коэффициенты ПИД, температура с датчика, статус работы

нагревательного элемента) выводится на ЖК дисплей ПЛК, также есть возможность с помощью кнопок управления расположенных на лицевой панели ПЛК управлять процессом регулирования. Управление нижним уровнем выполняется через входные выходные каналы ПЛК.

Верхний уровень автоматизированной системы, реализованный в виде рабочего места оператора на базе персонального компьютера, позволяет наблюдать процесс управления и вносить изменения в величину уставки и коэффициентов ПИД регулирования.

Классическое представление ПИД-регулятора выглядит следующим образом [3]:

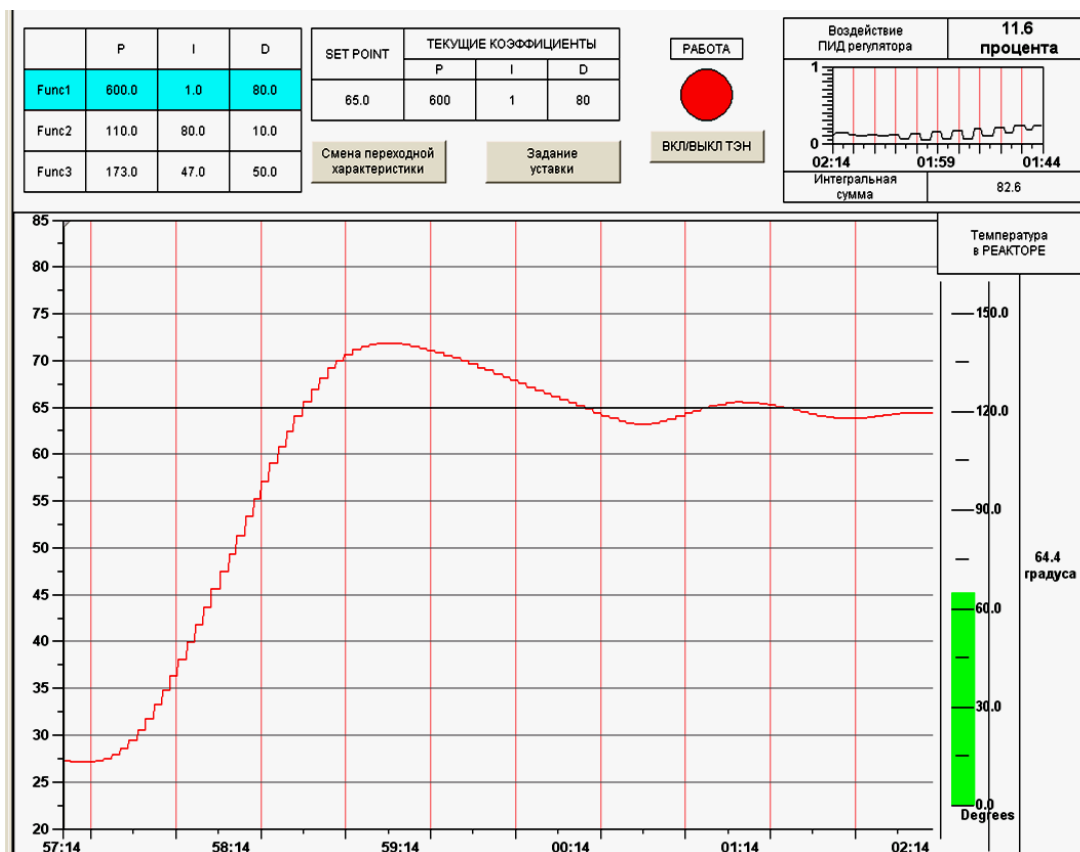
$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

где  $u(t)$  – функция сигнала регулирования,  $e(t)$  – функция сигнала рассогласования (разница между регулируемой переменной и уставкой),  $K$  – пропорциональный коэффициент,  $T_i$  – постоянная интегрирования,  $T_d$  – постоянная дифференцирования. Как видно из формулы (1) в формировании управляющего сигнала ПИД регулятора участвуют три составляющие: пропорциональная, интегральная и дифференциальная. Соответственно настроечными коэффициентами являются  $K$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ . Программа управления разработанная для ПЛК предусматривает изменение этих коэффициентов, а так же величины уставки.

Основным минусом данной модели является сложность определения коэффициентов ПИД регулирования и зачастую на производстве содержится отдельный специалист по настройке ПИД регуляторов. Несмотря на долгое развитие ПИД-регуляторов и большое количество публикаций, остаются вопросы в проблеме устранения интегрального насыщения, регулировании объектов с гистерезисом и нелинейностями, автоматической настройкой и адаптации. [1], [5], [6]. Разработанный стенд позволяет проводить исследования переходных процессов регулирования и формировать оптимальный подход к решению этой сложной задачи. Так же проследить конкретное влияние отдельных

составляющих полного закона регулирования, что существенно отличает рассматриваемый стенд от подобных разработок, например, ГалСен, [2], ПО Зарница [3], НТП «Центр» [4].

На рисунках 3-5 показаны три варианта изменения переходной характеристики регулирования для выбранного объекта, а так же представлен интерфейс оператора.

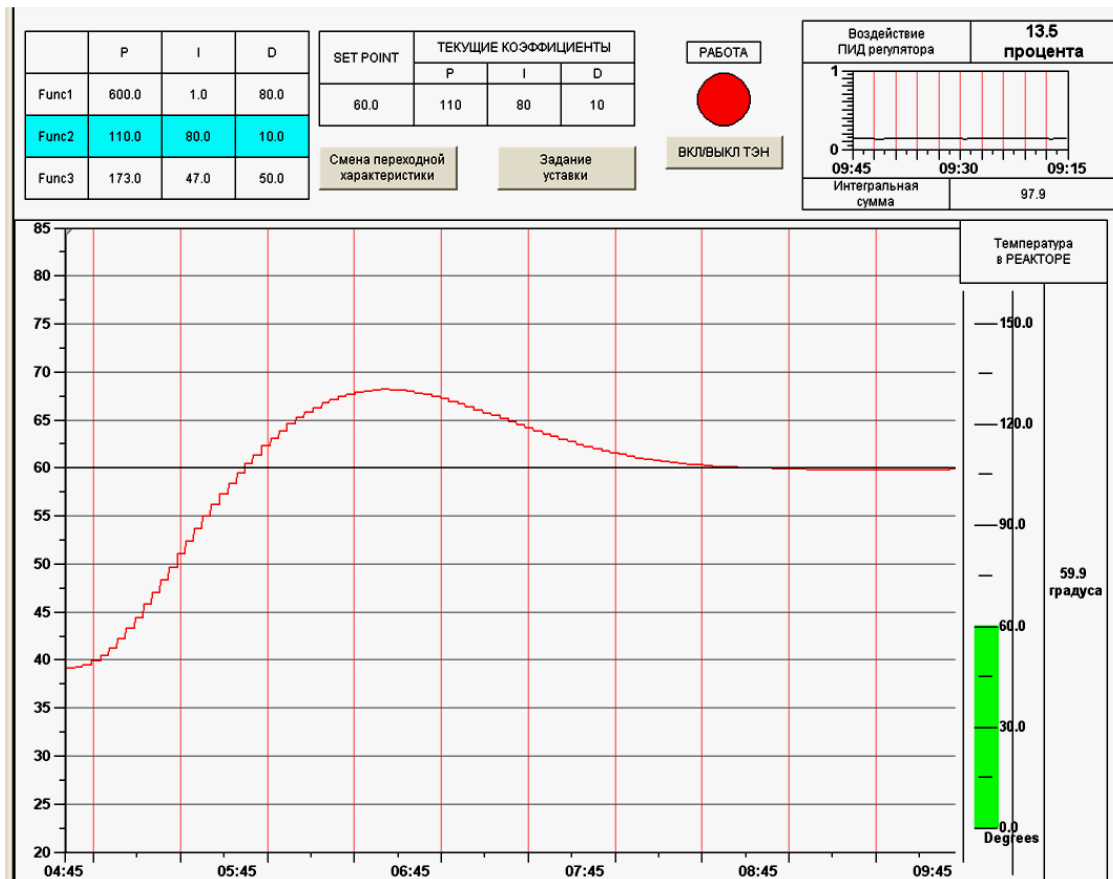


**Рис. 3 - Первый вариант настроек регулятора**

**Fig.3 - First option for regulator settings**

В первом варианте настроек, когда превалирует пропорциональная составляющая, а интегральная и дифференциальная достаточно малы (рис.3), переходная характеристика имеет большое время регулирования, присутствует перерегулирование, а на последнем участке - статическая ошибка. В целом качество регулирования невысокое.

При изменении настроек регулятора ПЛК: снижении пропорциональной составляющей, увеличение интегральной составляющей при одновременном уменьшении дифференциальной составляющей приводит к улучшению качества регулирования (рис.4).

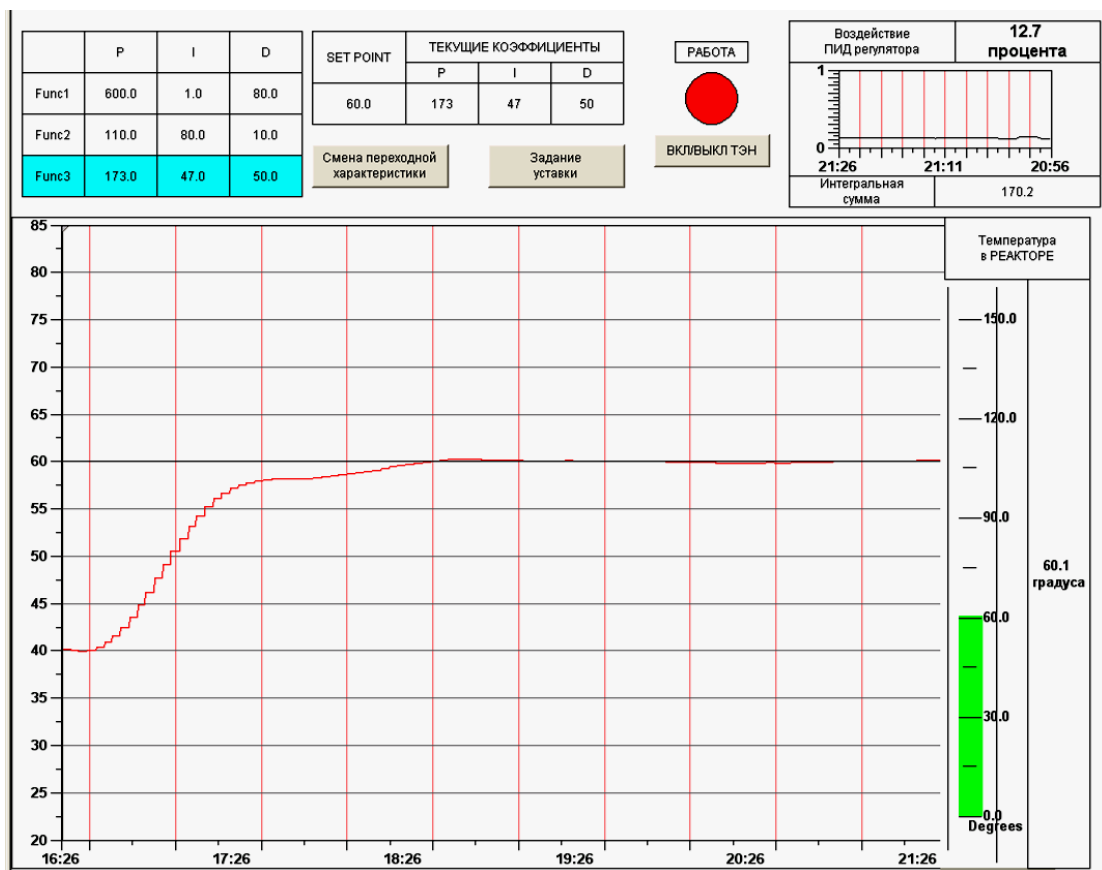


**Рис. 4 - Второй вариант настроек регулятора**

**Fig.4 - Second option for regulator settings**

На этом графике время регулирования несколько меньше, отсутствует статическая ошибка, но сохраняется перерегулирование.

Дальнейшая работа на экспериментальном стенде приводит к нахождению, близких к оптимальным, настроек ПИД регулятора для рассматриваемого объекта регулирования. В этом случае график переходной процесса выглядит следующим образом (рис.5):



**Рис. 5- Третий вариант настроек регулятора**

**Fig.4 - Third option for regulator settings**

### **Выводы:**

В соответствие с поставленной задачей разработан и создан экспериментальный стенд на базе ПЛК реализующий следующие функции:

- моделирование технологического процесса;
- поддержание технологических параметров процесса и оборудования в заданных рамках и обеспечение проведения технологического процесса как безопасного, надежного и прогнозируемого;
- управление процессом, как с автоматизированного рабочего места оператора, так и через человеко-машинный интерфейс ПЛК;

- отображение технологических событий и графических трендов на ПК рабочего места оператора;
- вывод информации на ЖК дисплей ПЛК;
- регулирование температуры объекта в соответствии с законом ПИД регулирования;

При этом в контроллере реализованы следующие функции:

- 1) выполнение двух программ работы контроллера, исполняемых независимо друг от друга (первая программа демонстрационный режим, вторая программа определения оптимальных настроек ПИД регулирования);
- 2) снятие измеренных значений со встроенных аналоговых и дискретных входов с последующей передачей их в пользовательскую программу;
- 3) управление встроенными коэффициентами ПИД регулятора средствами ПЛК;
- 4) обмен данными по интерфейсу RS-232 с рабочим местом оператора;
- 5) отображение символьных данных, формируемых в пользовательской программе, на ЖКИ;
- 6) изменение значений конфигурационных параметров контроллера на ЖКИ с помощью встроенной клавиатуры;
- 7) изменение значений параметров из среды программирования CoDeSys.

Таким образом, предлагаемый экспериментальный стенд позволяет находить близкие к оптимальным настройки различных ПИД регуляторов для обеспечения высоких значений параметров качества регулирования.

## Литература

1. Aidan O'Dwyer Учебное пособие по настройке ПИД регуляторов [Раздел книги] : Handbook of PI and PID controller tuning rules, 3rd Edition. - London: Imperial College Press, 2009.
2. <https://galsen.ru/catalog/avtomatika-robototekhnika/nastrojka-pid-regulyatora/npid1-n-k#components>
3. <https://zarnitza.ru/catalog/uchlab/elektrotehnika-i-energetika/preobrazovatel'naya-tekhnika/komplekt-uchebno-laboratornogo-oborudovaniya-nastrojka-pid-regulyatora/>
4. <https://ntpcentr.com/ru/catalog/avtomatizaciya/ntc-09-14-1-pid-regulyator-urovnya>
5. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации [Раздел книги] : СТА, №4, 2007, с. 86 - 97, №1, 2008, с.86-99.
6. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. [Электронный ресурс] : IFAC Professional Brief. - <http://www.ifac-control.org>.

