

Управление объектом с запаздыванием

В.В. Курганов, А.В. Цавнин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Аннотация: Рассматривается проблема регулирования в системах автоматического регулирования, содержащих протяженные транспортные линии, вызывающие запаздывание. В качестве исследуемого объекта используется самостоятельно созданная система автоматического регулирования уровня жидкости в емкости, содержащая длинный трубопровод, представляющий собой звено чистого запаздывания. В данном материале приведен пример идентификации данного объекта с запаздыванием для последующей настройки типового промышленного регулятора с использованием методом Циглера – Никольса. Результатом данного исследования является получение сравнительных характеристик, а не абсолютных значений и оценка качества регулирования процесса с использованием данного метода и представленных типов промышленных регуляторов.

Ключевые слова: регулирование, запаздывание, идентификация объекта, настройка регулятора

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к системам управления с запаздыванием всегда был и остаётся на достаточно высоком уровне. Этот факт объясняется рядом причин. Большинство производственных процессов обладают запаздыванием, влияние которого на динамические свойства системы весьма велико. Ряд объектов обладают скрытым запаздыванием, которое в сравнении с быстрым действием процессов на объекте не велико. Таким запаздыванием чаще всего пренебрегают. Но в ряде случаев запаздывание является принципиальным свойством объекта, что требует его учета при анализе динамических свойств объекта. К таким объектам относятся всевозможные транспортёры или объекты, построенные по аналогичному принципу. В таких объектах запаздывание может проявляться в двух видах: а) запаздывание по входу – запаздывание информации о состоянии объекта, запаздывание по измерению; б) запаздывание по выходу – запаздывание управляющего воздействия на объект, запаздывание по управлению. Чем больше отношение величины запаздывания к наибольшей постоянной времени объекта, тем сложнее добиться требуемого качества регулирования.

Способы повышения качества регулирования

могут быть основаны на следующем:

- уменьшение отношения величины запаздывания к наибольшей постоянной времени объекта путем внесения конструктивных или других изменений;

- применением более сложной структуры регуляторов, позволяющей уменьшить негативное влияние запаздывания.

Настройка контура регулирования состоит из трёх важных этапов: а) идентификация объекта, б) расчет параметров регулятора и в) подстройка регулятора¹. Третий этап обычно связан с ручной подстройкой параметров регулятора для улучшения качества регулирования.

2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА

Исследуемый объект представлен на *Рис. 1*. Объект состоит из двух емкостей, основной 1 и вспомогательной 2. Основная ёмкость представляет собой вертикальную цилиндрическую ёмкость со встроенным датчиком уровня 3. Вспомогательная ёмкость расположена горизонтально ниже основной, что обеспечивает свободный слив жидкости из основной ёмкости во вспомогательную через ручной вентиль 5. Для того чтобы контур регулирования был замкнут, жидкость из вспомогательной ёмкости насосом 8 подается в основную ёмкость по трубопроводу 4. Насос располагается в самой нижней точке объекта, что обеспечивает постоянную наполненность его всасывающей линии. Трубопровод 4 представляет собой незаполненный трубопровод, в котором уравнение неразрывности струи [1] не выполняется, что гарантирует отсутствие мгновенной реакции уровня в основной ёмкости на изменение производительности насоса. В исследуемом объекте трубопровод 4 играет роль звена чистого запаздывания. Предельные значения производительности насоса и длины трубопровода подобраны таким образом, что время чистого запаздывания может достигать 40 с.

Для измерения уровня используется гидростатический способ.

Объёмы основной и вспомогательной емкостей при различии физических форм выбраны одинаковыми, тем самым обеспечивается защита от перелива при любом соотношении жидкости в емкостях.

¹ Может иметь место и иное, а именно: а) идентификация объекта; б) расчет регулятора; в) реализация регулятора (без подстройки), или: а) реализация регулятора; б) настройка регулятора эмпирическим путем (*Примечание редакции*).

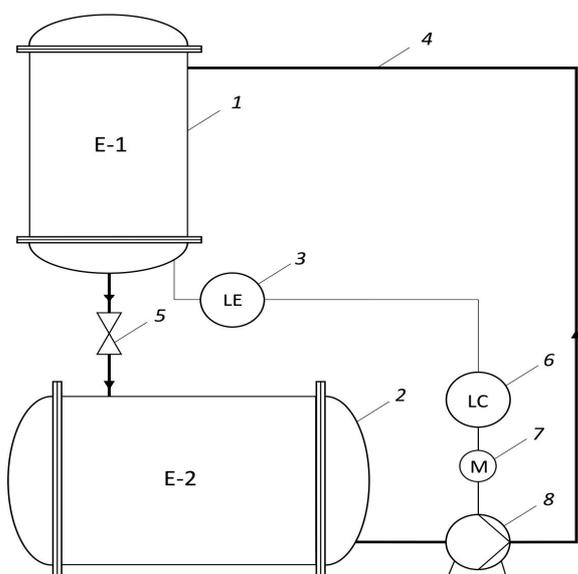


Рис. 1. Функциональная схема объекта управления: 1 – основная емкость; 2 – вспомогательная ёмкость; 3 – датчик уровня; 4 – линия запаздывания (незаполненный трубопровод); 5 – ручной вентиль, 6 – регулятор уровня, 7 – асинхронный двигатель (привод насоса); 8 – насос

3. РАБОТА ОБЪЕКТА

Из вспомогательной емкости 2 насосом 8 жидкость перекачивается в основную ёмкость 1 по трубопроводу 4 и сливается через вентиль 5. Уровень в основной ёмкости измеряется датчиком 3. Принцип работы датчика основан на измерении давления, создаваемого столбом жидкости. Результат измерений поступает в регулятор 6, который на основании реализуемого закона регулирования формирует аналоговый выходной сигнал 4...20 мА. Выходной сигнал поступает на частотный преобразователь, который управляет производительностью насоса.

Возмущающими воздействиями для объекта являются степень открытия ручного вентиля 5 и величина задания регулируемой величины, задаваемой в регуляторе 6.

4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.

Определение динамических характеристик объекта выполняется по характеристике разгона. Кривая разгона представляет собой реакцию системы на входное ступенчатое воздействие – переходную характеристику системы $h(t)$.

Принимая во внимание, что реакцией системы является уровень, можно заранее предположить, что при постоянном входном воздействии уровень жидкости в баке будет линейно изменяться (идеальный интегрирующий элемент). Иными словами, объект не обладает самовыравниванием. Действительно, в идеальном случае при наличии безразмерной емкости и неограниченного количества жидкости объект можно представить идеальным интегрирующим звеном. Однако реальный объект обладает рядом

ограничений. Первое – конечные размеры используемых емкостей, и второе, самое важное ограничение, ограниченный объём жидкости, перемещаемой в системе.

Для снятия кривой разгона (т. е. графика изменения уровня во времени после скачкообразного изменения входного сигнала) жидкость из основной ёмкости сливается во вспомогательную ёмкость до минимально возможного уровня. Регулятор переводится в ручной режим. Фиксируется время подачи входного ступенчатого воздействия. Ступенчатое воздействие представляет собой изменение частоты питающего напряжения насоса от 0 до 50 Гц, что эквивалентно изменению производительности насоса от 0 до 10 л/мин.

На Рис. 2 представлена кривая разгона системы.

5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА.

Передаточные функции объектов управления, имеющих аperiodическую кривую разгона, как на Рис. 2, представляются в виде последовательного соединения аperiodического и запаздывающего звеньев.

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} \cdot e^{-\tau s}, \quad (2)$$

где k – коэффициент передачи;

τ – время запаздывания;

T – постоянная времени.

Коэффициент передачи k есть отношение установившегося значения выходной величины к величине ступенчатого входного сигнала, вызвавшего это изменение. В связи с тем, что физический объект является замкнутым контуром, а характеристика разгона – процесс перемещения жидкости из емкости E-2 в емкость E-1², то коэффициент передачи k равен единице.

Время запаздывания τ – это интервал времени от момента подачи входного сигнала до момента начала «движения» системы под воздействием этого сигнала. В течение этого интервала времени входной сигнал $U(t) \neq 0$, а выходной сигнал равен нулю $y(t) = 0$, при условии, что до момента действия входного сигнала, объект находился в равновесном состоянии и в нем отсутствовала запасённая энергия.

По характеристике разгона определяется время запаздывания³ $\tau = 55$ с.

² Видимо, корректно добавить «... как отклик на единичное ступенчатое изменение угла поворота вентиля» (Прим. редакции).

³ В данном случае авторы воспользовались гипотезой о том, что порядок полинома в знаменателе соотношения (3), равен единице. По результатам аппроксимации должна была бы быть получена постоянная времени, равная 75 с, что видно из графика по точке пересечения аппроксимирующей кривой с осью абсцисс. Если же считать постоянную времени равной 55 с, то указанную кривую следует сместить влево на 20 с, из чего будет видно, что она сильно не совпадает с экспериментальной кривой, и тогда следует принять в соотношении (3) модель не менее второго порядка (Прим. редакции).

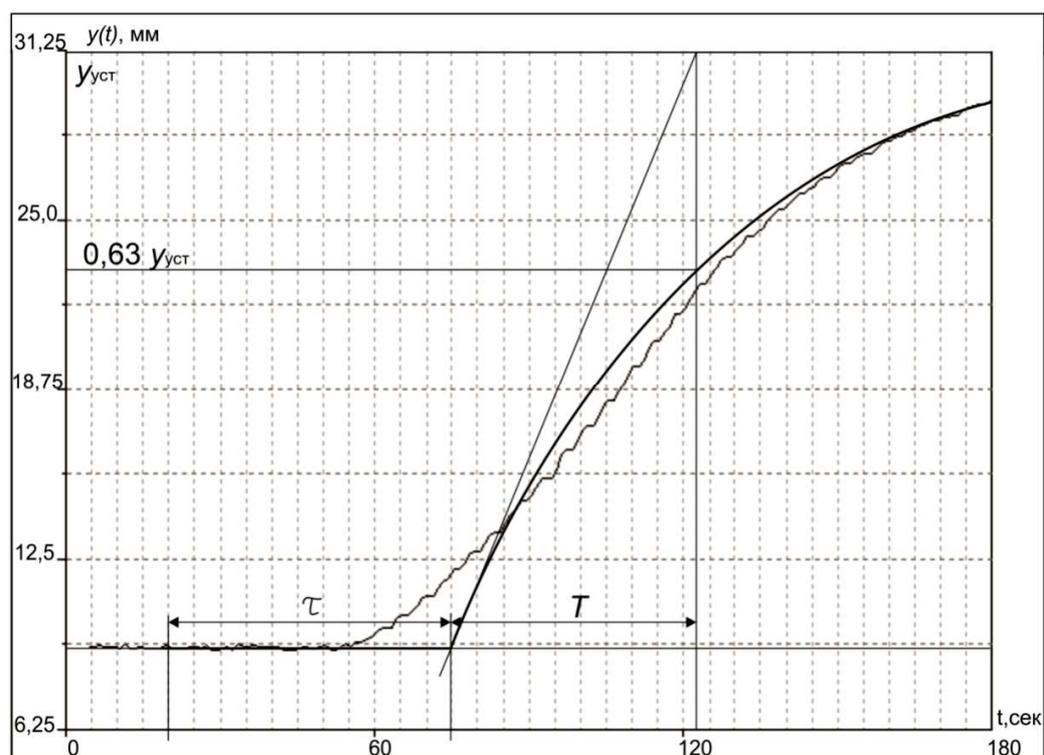


Рис. 2. Характеристика разгона при ступенчатом входном воздействии

Постоянная времени объекта определяется графически по характеристике разгона (см. Рис. 2) $T = 47$ с.

С учетом полученных значений выражение (2) запишем в следующем виде:

$$W(s) = \frac{1}{47s + 1} \cdot e^{-55s} \quad (3)$$

Из соотношения $\tau/T > 1$ можно предположить о возможных трудностях настройки регулятора традиционными способами.

6. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

В классической теории автоматического управления структура регулятора выбирается, исходя из модели объекта управления. При этом сложные объекты управления требуют применения сложных регуляторов. Однако на практике, в подавляющем большинстве случаев, регулирование сводится к использованию ПИД-регуляторов. ПИД-регуляторы не всегда обеспечивают требуемое качество регулирования, но, благодаря простоте своей структуры и большому количеству теоретических и практических методов их настройки, ПИД-регуляторы являются основными в практическом применении.

Структурная схема замкнутой системы с ПИД-регулятором приведена на Рис. 3.

На Рис. 3 введены следующие обозначения: $e(t) = y_{зад} - k_{ny}y(t)$ – ошибка регулирования; k_n , T_i , T_d – коэффициент передачи, постоянная интегрирования и постоянная

дифференцирования регулятора. Для настройки коэффициентов регулятора применяется эмпирический метод Циглера-Никольса [4]. В одном из вариантов настройки коэффициентов регулятора этим методом используются коэффициенты передаточной функции объекта k , T и τ , определённые по характеристике разгона. Формулы для расчета параметров регулятора представлены в Таблице 1 [5].

Таблица 1

Параметры настройки типовых регуляторов

	k_n	k_i	k_d
ПИ	$0,9 T / k \tau$	$0,3 T / k \tau^2$	
ПИД	$1,2 T / k \tau$	$0,6 T / k \tau^2$	$0,6 T / k$

Результаты вычислений коэффициентов приведены в Таблице 2. Введены следующие новые обозначения $k_i = 1 / T_i$, $k_d = T_d$.

Таблица 2

Параметры настройки типовых регуляторов

	k_n	k_i	k_d
ПИ	0,77	0,00466	
ПИД	1,02	0,00932	28,2

На Рис. 4 а-г и Рис. 5 представлены полученные экспериментально переходные процессы при различных настройках регулятора. Для анализа переходных процессов и оценки качества регулирования используется время переходного процесса и перерегулирование. При этом целью экспериментов является получение качественных оценок, а не их абсолютных значений.

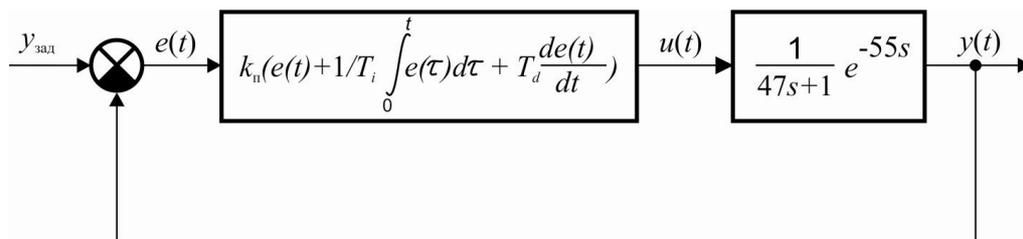


Рис. 3. Структурная схема замкнутой системы с ПИД-регулятором

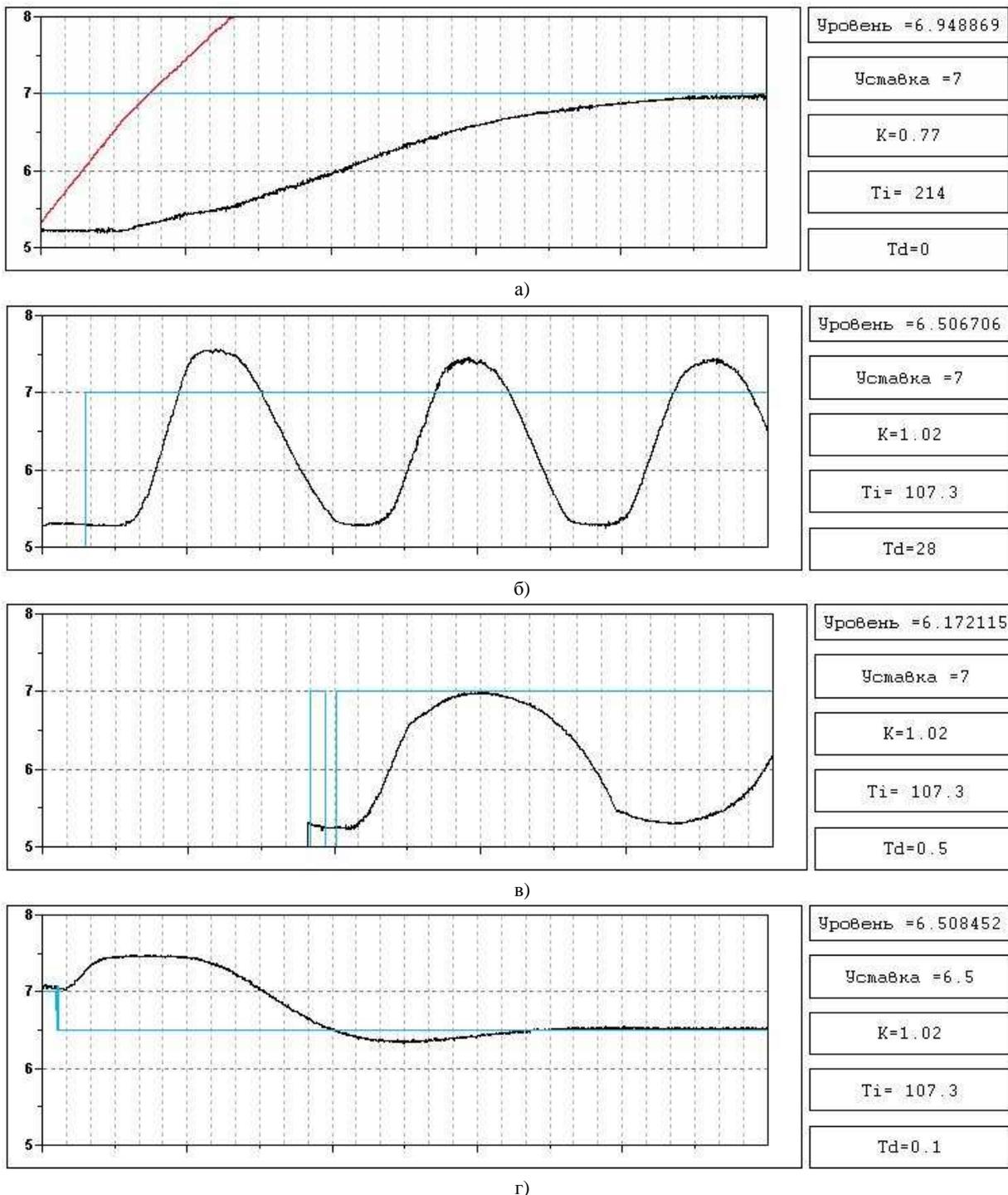


Рис. 4. Реакция объекта управления на входное ступенчатое воздействие при различных настройках коэффициентов регулятора

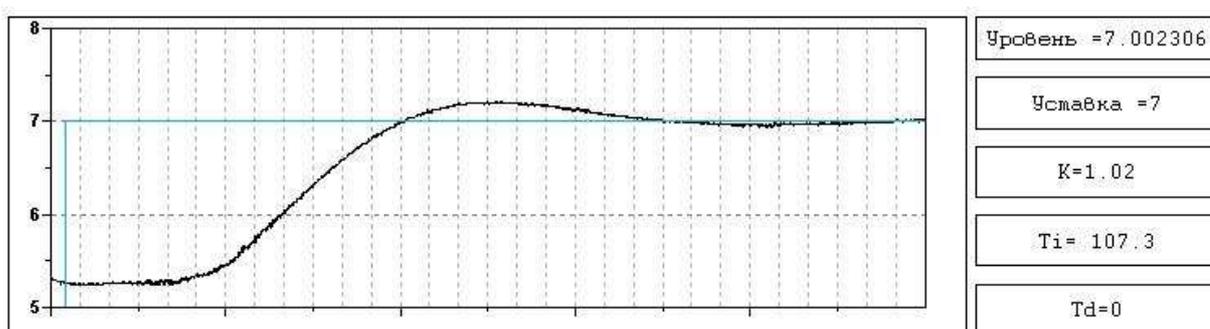


Рис. 5. Продолжение Рис. 4: реакция объекта управления на входное ступенчатое воздействие при различных настройках коэффициентов регулятора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Несмотря на то, что метод Циглера-Николяса дает удовлетворительные результаты для $0,15 < \tau/T < 0,6$, можно говорить о положительном эффекте и для случаев, выходящих за данное ограничение.

2. Можно констатировать негативное влияние большой дифференциальной составляющей на качество переходного процесса. Возникновение незатухающих автоколебаний (Рис. 3б) можно трактовать как неустойчивость системы.

3. Полученные по методу Циглера-Николяса коэффициенты настройки регулятора являются лишь ориентиром и требуют дальнейшей коррекции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод: учебник. – М.: МГИУ, 2003. – 352 с.
- [2] Системы автоматического управления с запаздыванием: учеб. пособие / Ю.Ю. Громов, Н.А. Земской, А.В. Лагутин, О.Г. Иванова, В.М. Тютюнник. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 76 с.
- [3] Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии. Справочник. Климовицкий М.Д., Копелович А.П. Изд-во «Металлургия», 1967.
- [4] Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759-768.
- [5] V. Denisenko. PID Controllers: Implementation issues // STA 1/2008. P. 86-99.



Курганов Василий Васильевич – доцент кафедры Автоматики и Компьютерных систем ТПУ, к.т.н., e-mail: kurganov@tpu.ru



Цавнин Алексей Владимирович – студент кафедры Автоматики и Компьютерных Систем ТПУ, e-mail: tsavnin@gmail.com

Control of Object with Time-Delay Link

Vasily Kurganov, Alexey Tsavnin

Abstract. Task of a control in regulation systems with long-length transport lines, which are cause of time-delay, is considered. Self-created system of level control with delay unit is used as a test object. In this paper, there is example of object identification for PID-regulator tuning using Zigler-Nichols method. The main result of this research is getting of a comparative characteristics and estimation of a control quality using presented method and regulator.

Keywords: regulation, time-delay, object identification, regulator tuning.

REFERENCES

- [1] Lepeshkin A.V., Mihaylin A.A. Hydraulics and air-oil circuit: textbook. – М.: MSIU, 2003. – 352 p.
- [2] Control system with time delay: study guide/ Y.Y. Gromov, N.A. Zemskoy, A.V. Lagutin, O.G. Ivanova, V.M. Tyutyunnik – Tambov: Publishing house of Tambov State Technical University. 2007 – 76 p.
- [3] Automatic control and regulation in ferrous metallurgy. Reference book. Klimovitsky M.D., Kopetovich A.P. publishing house “Metallurgia”, 1967.
- [4] Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759-768.
- [5] V. Denisenko. PID Controllers: Implementation issues // STA 1/2008. P. 86-99.