

# ЦИФРОВОЙ ПИД-РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ПНЕВМО- И ГИДРОСИСТЕМ

к.т.н. Труханов К.А.  
СКТБ ПР, Москва, Россия  
trukhanov@mail.ru

При разработке технологических систем с пневмо- или гидроприводом требуется применение автоматизированных средств для их управления. В настоящее время широкое распространение получают автоматизированные средства управления, построенные при помощи логических контроллеров, поскольку логический контроллер позволяет решить самые разнообразные задачи с минимальными издержками как по стоимости, так и по затратам времени на разработку системы. Так логический контроллер обеспечивает быстрое действие систем с пневмо- или гидроприводом до 1 мс и менее. С применением цифровых автоматизированных средств управления появляются вопросы, связанные с синтезом ПИД-регуляторов и устойчивости систем с пневмо/гидроприводом во временной области. Целью данной работы стало создание и практическая реализация цифрового ПИД-регулятора для управления пневмо/гидросистемой для предоставления практических рекомендаций при его использовании в технике.

В статье приведена блок-схема аналоговой и цифровой систем управления с пропорциональным пневмораспределителем. Представлена реализация аналогового и цифрового ПИД-регулятора и оптимизация его параметров по интегральному критерию. Выполнено сравнение аналоговой и цифровой систем с введенным в их состав ПИД-регулятором. Качество данных систем предложено оценивать во временной области по времени переходного процесса и максимальной динамической ошибки. Даны практические рекомендации по определению времени дискретизации цифровых систем с ПИД-регулятором. Показан пример разработанной цифровой автоматической системы управления следящим пневмоприводом, ее структурная схема, общий вид шкафа управления с логическим контроллером и графического интерфейса оператора, позволяющий легко проводить настройку автоматизированного средства управления и контролировать его состояние.

Научной новизной представленных в статье результатов стало то, что решена задача исследования динамики пневмо/гидрораспределителя с электроуправлением во временной области при помощи математической модели, в состав которой был включен цифровой ПИД-регулятор, а также, сделано сопоставление результатов моделирования цифровой системы с аналоговой, и даны практические рекомендации по определению времени дискретизации.

**Ключевые слова:** ПИД-регулятор цифровой, пневмо/гидросистема, модель математическая, пневмопривод следящий, блок-схема, оптимизация, система аналоговая, система цифровая.

## Введение

В настоящее время любой технический объект или технологический процесс требует наличия автоматизированной системы управления (далее АСУ), позволяющей контролировать и прогнозировать его состояние в реальном времени. С развитием техники и технологий создавать такие системы становится гораздо проще, они становятся доступнее и дешевле.

На сегодняшний день широко применяются два вида систем управления, построенных на базе:

- релейно-контактной логики (далее РКЛ);
- логического контроллера (далее ЛК).

Если рассматривать релейно-контактные схемы, на базе чего, как правило, реализуется РКЛ, то они состоят из преобразователей двух типов: электромеханических и механико-элек-

трических [1–3] (в последние годы находят применение специальные программируемые реле). Электромеханическое реле с его контактами преобразует входные электрические сигналы в механическое перемещение его контактов. В свою очередь электрическая сеть, содержащая контакты и обмотки реле, преобразует механические перемещения контактов в выходные для этого преобразователя электрические сигналы (токи в обмотках реле). Объединение выходов преобразователей одного типа со входами преобразователя другого типа позволяет создавать различные релейно-контактные схемы [1]. Недостатком систем с РКЛ является то, что элементы управления таких схем имеют движущиеся части и подвижные замыкающие и/или размыкающие контакты, которые изнашиваются, что приводит к нарушению электри-

ческого соединения между контактами и последующему выходу из строя аппаратов и всей системы управления. В таких условиях работоспособность системы становится ненадежной и непредсказуемой. Также, к числу недостатков относятся сложность реализации систем визуального контроля, хранения и обработки информации, получаемой от АСУ в режиме реального времени, точность выполнения динамических режимов работы. К достоинствам систем с РКЛ относится простота реализации, обслуживания при наличии схем, ремонта и стоимость реализации данных систем.

Применение систем, в состав которых входит логический контроллер, позволяет отказаться от использования менее надежных релейно-контактных схем и РКЛ, а, следовательно, и избавиться от их недостатков. Однако, стоит отметить, что для управления движением, пуском или торможением силовыми электродвигателями, промышленность продолжает поставлять модули, построенные на РКЛ, но заменяя релейно-контактные схемы на полупроводниковые усилители и регуляторы, управляемые от ЛК.

При помощи логического контроллера решаются самые разнообразные задачи с минимальными издержками как по стоимости, так и по затратам времени на разработку системы. Системы, выполненные с применением ЛК обладают большой гибкостью и возможностью быстрого изменения своей структуры. Работа динамических систем зависит от быстродействия контроллера и точности каналов ввода/вывода сигналов управления. У современных серийно выпускаемых ЛК быстродействие может достигать до 1 мс, а в специальном исполнении и меньше. При использовании цифровой системы управления необходимость в частотном анализе отпадает [4], а на первое

место выходят вопросы, связанные с синтезом регуляторов (ПИД-регуляторов), применяемых для управления исполнительными механизмами [5]. Тогда основным аппаратом исследования цифровых систем является анализ переходных процессов во временной области.

В связи с этим, полученные результаты работы носят прикладной характер для тех, кто занимается вопросами управления и синтеза систем управления, в состав которых входят пневмо/гидроаппараты.

### Пример применения цифрового ПИД-регулятора для управления следящим пневмоприводом

При разработке систем с пневмоприводом требуется произвести оптимизацию математической модели и выбора оптимальных параметров, влияющих на устойчивость всей системы, одного из ее компонентов. Зачастую к таким компонентам относятся либо распределитель, либо исполнительный механизм [6].

Аналоговая (непрерывная) математическая модель пропорционального распределителя рассмотрена в работах [7–10]. Здесь лишь приведена блок-схема уравнений, описывающих его динамику. В состав блок-схемы модели распределителя включен ПИД-регулятор (рис. 1) [5–7].

ПИД-регулятором принято называть регулятор, описываемый выражением [5]:

$$y(t) = P \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt},$$

где  $t$  – время,  $P$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  – коэффициент пропорциональности, постоянная интегрирования и постоянная дифференцирования,  $e(t)$  – сигнал рассогласования (ошибка).

Блок-схема ПИД-регулятора приведена на рис. 2.

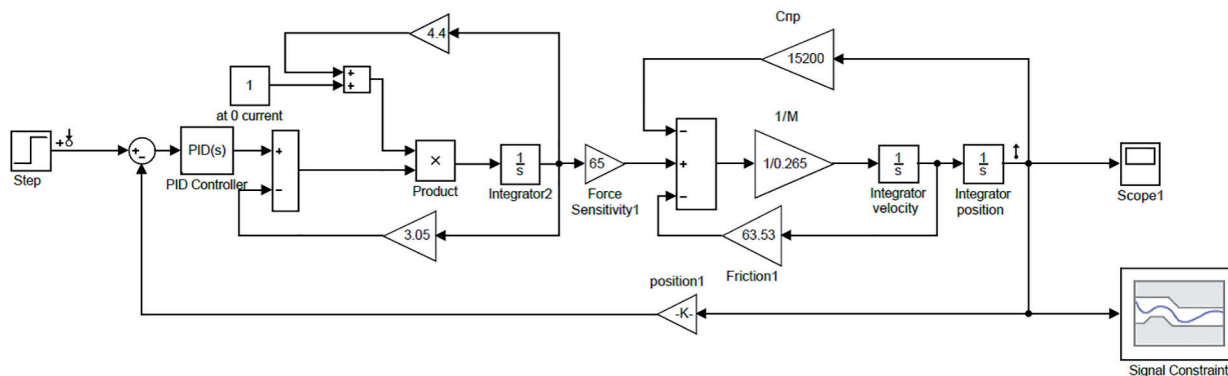


Рис. 1. Блок-схема аналоговой (непрерывной) системы, описывающая динамику пропорционального распределителя, в состав которой включена структура ПИД-регулятора

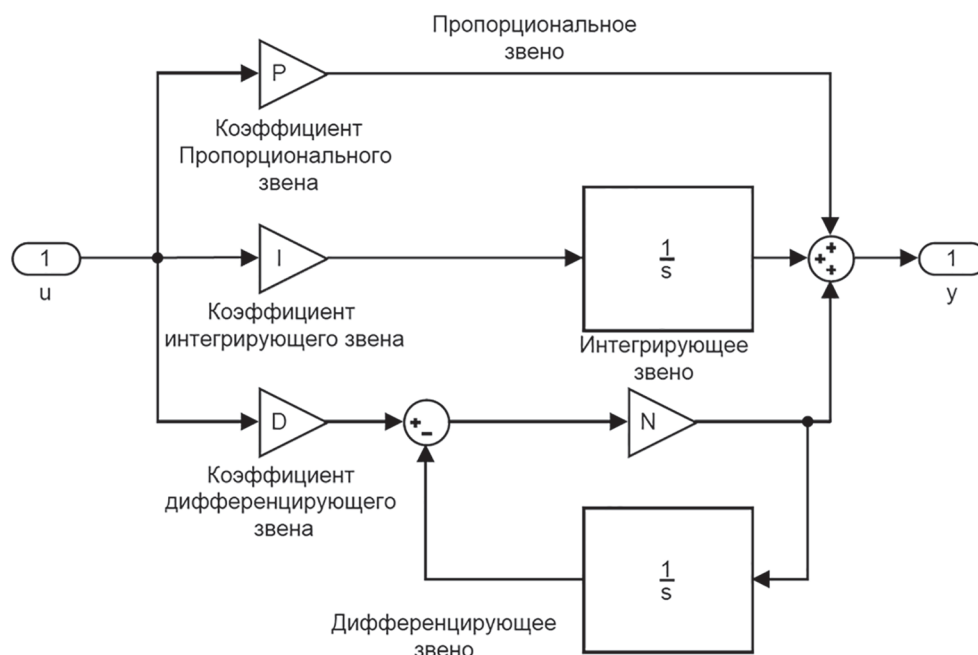


Рис. 2. Блок-схема ПИД-регулятора

Переходный процесс по перемещению золотника пропорционального распределителя без учета ПИД-регулятора представлен на рис. 3.

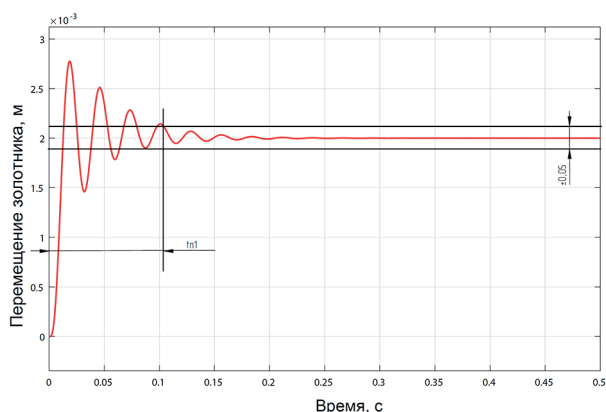


Рис. 3. Переходный процесс аналоговой (непрерывной) системы, описывающей динамику пропорционального распределителя без ПИД-регулятора

В качестве критерия оптимизации был использован интегральный критерий, реализующий математическую зависимость [5, 11]:

$$I(t) = \sqrt{\frac{1}{t} \cdot \int_0^t u^2(\tau) d\tau}, \text{ при } t > 0, \quad (1)$$

где  $u(t)$  – входной сигнал (в данном случае – ошибка по перемещению золотника, рис. 5), подаваемый в блок оптимизации.

При введении в состав структуры математической модели ПИД-регулятора и выполнении оптимизации был получен переходный процесс по перемещению золотника, приведенный на рис. 4.

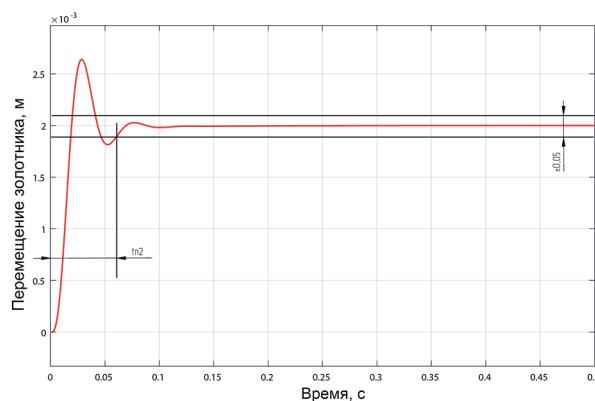


Рис. 4. Переходный процесс аналоговой (непрерывной) системы, описывающей динамику пропорционального распределителя с ПИД-регулятором

Оценку качества получившихся переходных процессов (рис. 3 и 4) выполнили по следующим показателям:

– время переходного процесса  $t_p$ , по истечении которого переходный процесс попадает в «канал» допустимых отклонений. Величину отклонения регулируемой величины назна-

чали равной  $\pm 0,05$  от установившегося значения [7];

– максимальная динамическая ошибка, определяемая соотношением:

$$\sigma_{\max} = \frac{|y_{\max} - y_{\infty}|}{y_{\infty}} 100 \%,$$

где  $y_{\max}$  – максимальное значение регулируемой величины,  $y_{\infty}$  – установившееся значение регулируемой величины при  $t \rightarrow \infty$ .

Результаты моделирования аналоговой (непрерывной) системы с ПИД-регулятором и без него приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Сравнение качества аналоговой (непрерывной) системы с ПИД-регулятором и без него в составе ее структуры**

Состав структуры системы	Параметры качества системы	
Без ПИД-регулятора	$t_{п1}$ , с	0,106
	$\sigma_{\max1}$ , %	38,71
С ПИД-регулятором	$t_{п2}$ , с	0,058
	$\sigma_{\max2}$ , %	32,33

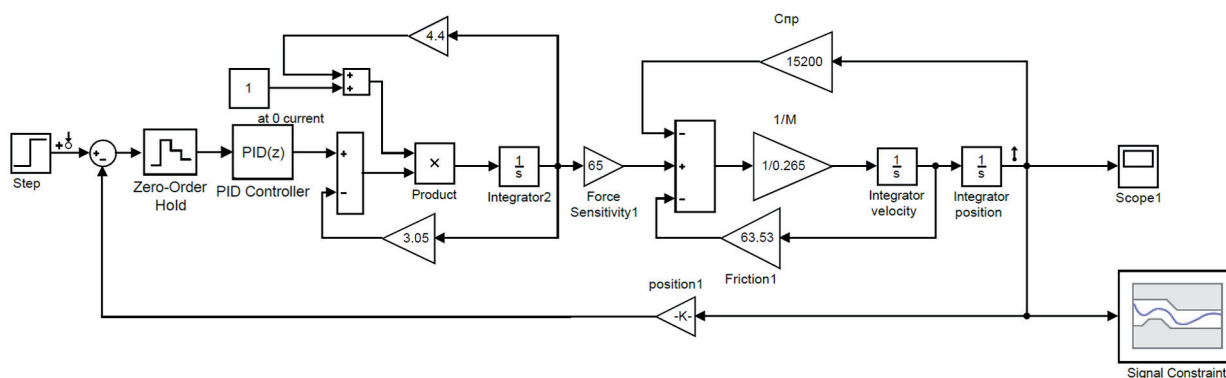
Из графиков (рис. 3, 4) и таблицы 1 следует, что введение в состав системы ПИД-регулятора позволяет повысить качество работы системы. Введение и выбор оптимальных параметров ПИД-регулятора позволило сократить время переходного процесса в 1,83 раза, т.е. увеличило быстродействие системы с сохранением ее устойчивости, а также уменьшило максимальное перерегулирование, что сказывается на ресурсе системы, ее точности и надежности, как самой, так и в составе всего пневмопривода.

Стоит отметить, что в качестве оптимизируемых параметров могут выступать любые

параметры системы пневмо/гидроприва, которые необходимо определять на этапе его разработки, такие как: жесткость пружин, величина диаметра золотника, окон гильзы, ход золотника и/или любые другие параметры.

Если переходить к цифровой (дискретной) системе управления пневмоприводом, то главным отличием будет наличие в контуре управления ПИД-регулятора, представленного в дискретном виде. Также для соединения цифровой (дискретной) части математической модели и ее аналоговой (непрерывной) части необходимо использовать экстраполятор нулевого порядка [11, 12]. Экстраполятор применяется для связывания квантованных данных с непрерывными. Полученная таким образом блок-схема системы пропорционального распределителя с цифровым управлением приведена на рис. 5.

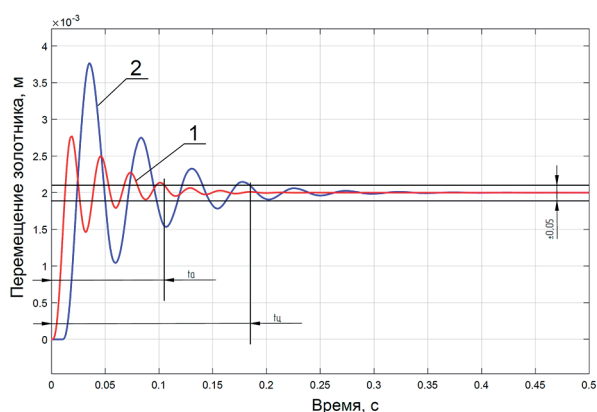
Величина дискретизации выбирается одним из следующих способов. Первый способ основан на применении теоремы Котельникова, частота дискретизации должна превышать двойную максимальную частоту спектра сигнала. Однако теорема Котельникова рассматривает идеальный случай. На практике используют второй способ, основанный на анализе вида переходного процесса: для выполнения требуемого качества регулирования шаг дискретизации не должен быть больше чем  $1/15 \dots 1/6$  от времени переходного процесса [12], или выбирается так, чтобы сделать влияние дискретизации незначительным, рекомендуют скорость квантования выбрать в 5–10 раз больше, чем полоса пропускания замкнутого контура [5]. Но при проектировании реальных систем с ПИД-регулятором целесообразно спроектировать регулятор в непрерывном времени (это было показано выше), а указанные ранее реко-



**Рис. 5. Блок-схема цифровой (дискретной) системы, описывающая динамику пропорционального распределителя, в состав которой включена структура цифрового ПИД-регулятора**

мендации по выбору времени дискретизации использовать в качестве первого приближения.

После получения вида переходного процесса для аналоговой (непрерывной) системы подбирать скорость квантования таким образом, чтобы ошибка переходных процессов аналоговой системы и цифровой была в интервале 2 % от установившегося значения регулируемой величины. Согласно сказанному, назначили время дискретизации (далее  $t_d$ ) равное 0,01 с и провели моделирование цифровой системы (рис. 5). Результаты данного моделирования приведены на рис. 6.



**Рис. 6.** Результаты математического моделирования аналоговой (непрерывной) – кривая 1 и цифровой (дискретной) – кривая 2 систем, описывающие динамику пропорционального распределителя, в состав которой не включена структура цифрового ПИД-регулятора при  $t_d = 0,01$  с

Результаты моделирования цифровой и аналоговой систем без ПИД-регулятора приведены в таблице 2.

Таблица 2

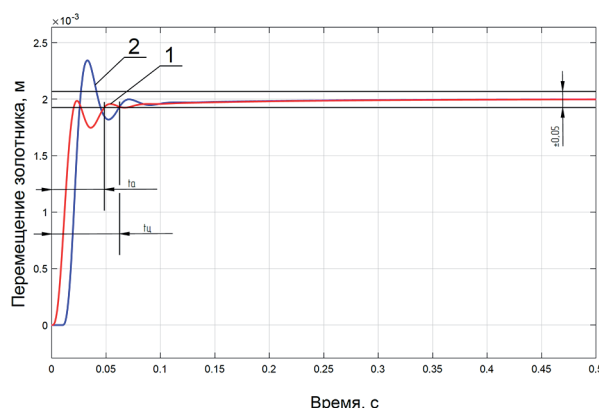
**Сравнение качества аналоговой (непрерывной) и цифровой системы без ПИД-регулятора при  $t_d = 0,01$  с**

Тип системы	Параметры качества системы	
Аналоговая (непрерывная)	$t_a, c$	0,106
	$\sigma_{max}, \%$	38,71
Цифровая (дискретная)	$t_{ц}, c$	0,185
	$\sigma_{maxц}, \%$	88,30

Также стоит отметить, что появилась ошибка по времени нарастания сигнала, равная времени дискретизации.

При введении в состав структуры системы цифрового ПИД-регулятора и оптимизации его параметров получили переходные процес-

сы, описывающие динамику пропорционального распределителя – перемещения его золотника, представленные на рис. 7.



**Рис. 7.** Результаты математического моделирования аналоговой (непрерывной) – кривая 1 и цифровой (дискретной) – кривая 2 систем, описывающие динамику пропорционального распределителя, в состав которой включена структура цифрового ПИД-регулятора при  $t_d = 0,01$  с

Результаты моделирования цифровой и аналоговой системы с ПИД-регулятором приведены в таблице 3.

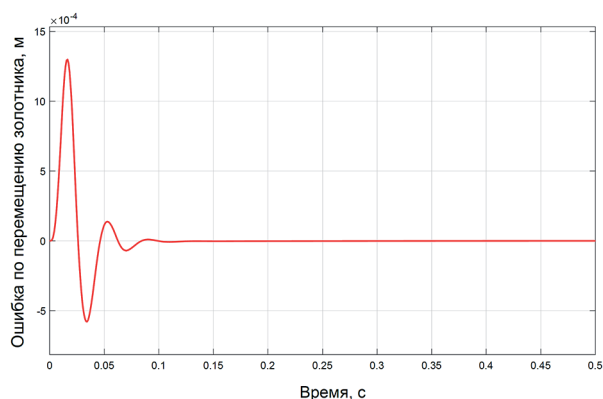
Таблица 3

**Сравнение качества аналоговой (непрерывной) и цифровой системы с ПИД-регулятором**

Тип системы	Параметры качества системы	
Аналоговая (непрерывная)	$t_a, c$	0,048
	$\sigma_{max}, \%$	12,50
Цифровая (дискретная)	$t_{ц}, c$	0,063
	$\sigma_{maxц}, \%$	35,31

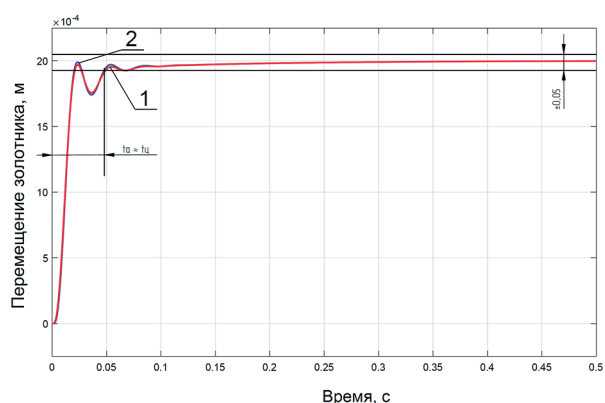
Из сравнения переходных процессов видно, что ошибка, связанная с временем дискретизации, вносит значительную погрешность в результаты расчетов. Точное значение ошибки во временной области получили, вычитая значения переходного процесса, полученные для аналоговой системы, из значений, полученных для цифровой системы. Результат приведен на рис. 8, откуда максимальное значение ошибки по перемещению золотника, если не учитывать смещения переходных процессов, связанных с временем дискретизации (запаздывание цифровой системы относительно аналоговой), составляет 0,6 мм.

Из анализа полученных результатов (рис. 7 и 8) сделали вывод о том, что необходимо уменьшить время дискретизации. Установи-



**Рис. 8.** Ошибка рассогласования аналоговой (непрерывной) и цифровой (дискретной) систем, описывающая динамику пропорционального распределителя, в состав которой включена структура цифрового ПИД-регулятора при  $t_d = 0,01$  с

ли новое время дискретизации равно  $0,001$  с и провели моделирование цифровой системы (рис. 9). Результаты данного моделирования приведены на рис. 9, 10 и в таблице 4.



**Рис. 9.** Результаты математического моделирования аналоговой (непрерывной) – кривая 1 и цифровой (дискретной) – кривая 2 систем, описывающие динамику пропорционального распределителя, в состав которой включена структура цифрового ПИД-регулятора при  $t_d = 0,001$  с

Таблица 4

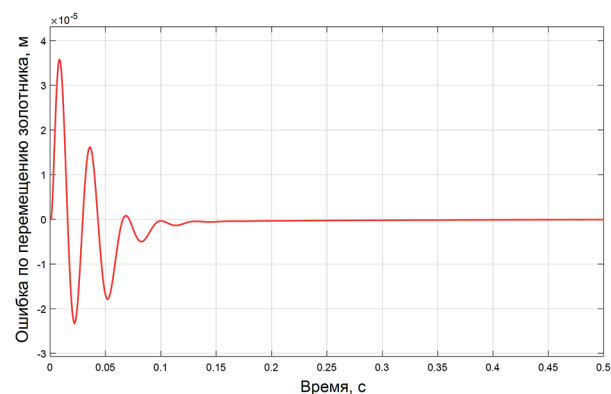
Сравнение качества аналоговой (непрерывной) и цифровой систем с ПИД-регулятором при  $t_d = 0,001$  с

Тип системы	Параметры качества системы	
Аналоговая (непрерывная)	$t_a, c$	0,048
	$\sigma_{\max}, \%$	12,50
Цифровая (дискретная)	$t_{ц}, c$	0,048
	$\sigma_{\maxц}, \%$	12,75

Из анализа рис. 9 следует, что максимальное значение ошибки по перемещению золотника, если не учитывать смещения переходных процессов, связанных с временем дискретизации (запаздывание цифровой системы относительно аналоговой), составляет  $0,04$  мм, что удовлетворяет интервалу допустимых отклонений –  $2\%$ .

### Пример реализация цифровой автоматической системы управления следящим пневмоприводом

На рис. 11 в качестве примера приведена часть структурной схемы АСУ [13], в состав которой включен следящий пневмопривод, состоящий из пропорционального пневмораспределителя с электромагнитной катушкой У8 и пневмоцилиндра с датчиком обратной связи положения штока S8. Рабочее место оператора подключается к главному модулю по одному из известных протоколов передачи данных, например, RS-232, RS-485, Ethernet или др. ЛК имеет аналоговые входы/выходы для подключения следящего пневмопривода. Датчик обратной связи имеет аналоговый выход, подключаемый к аналоговому входу модуля ЛК. К аналоговому выходу ЛК подключается электрическая катушка пропорционального пневмораспределителя У8. Для возможности управления следящим пневмоцилиндром в ручном режиме и/или при пуско-наладочных работах в структуре системы предусмотрен ручной задатчик R8, представляющие переменный резистор. Компрессор обеспечивает



**Рис. 10.** Ошибка рассогласования аналоговой (непрерывной) и цифровой (дискретной) систем, описывающая динамику пропорционального распределителя, в состав которой включена структура цифрового ПИД-регулятора при  $t_d = 0,001$  с

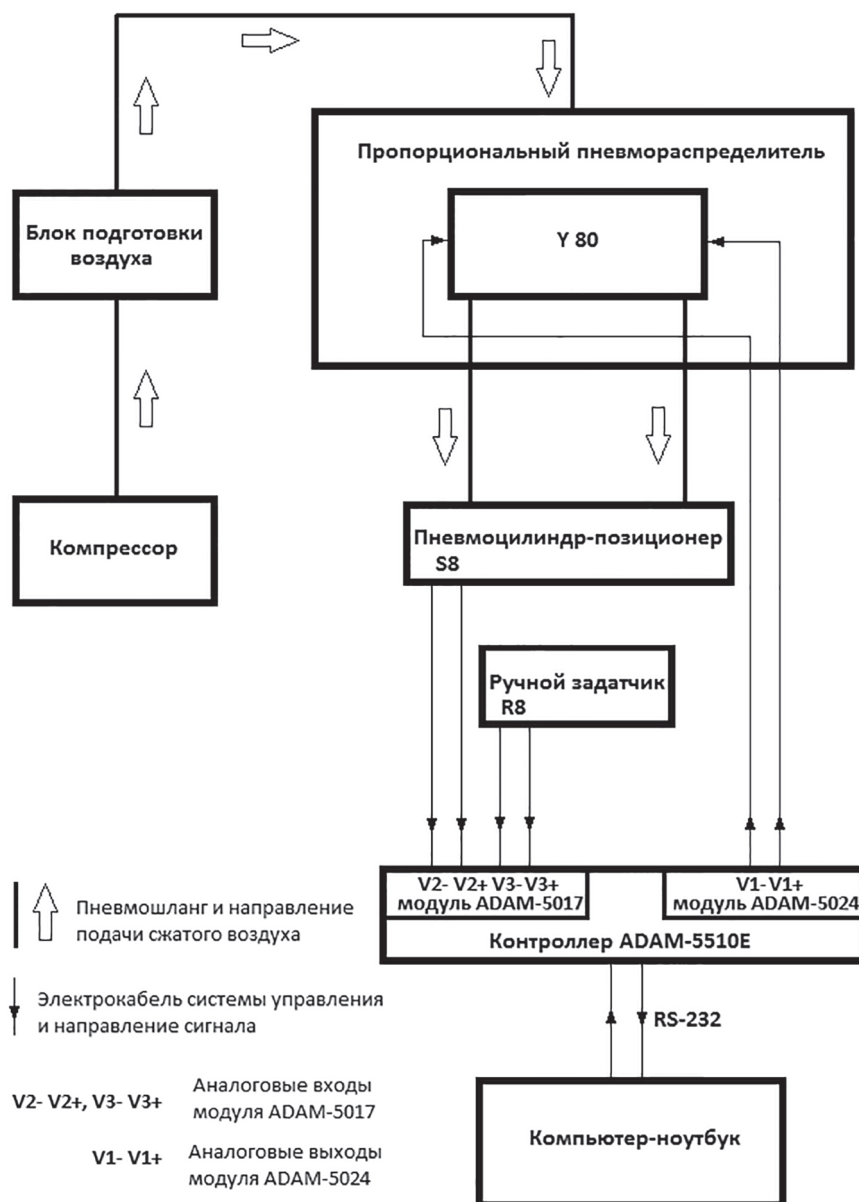


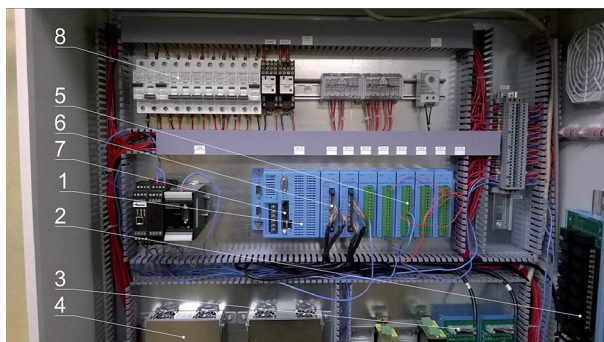
Рис. 11. Структурная схема части системы АСУ с пневмоцилиндром точного позиционирования

систему повышенным давлением сжатого воздуха. Блок подготовки воздуха обеспечивает требуемые параметры системы. ЛК выполняет алгоритм управления в ручном или автоматическом режиме, для этого в составе системы управления предусмотрен переключатель, позволяющий устанавливать требуемый режим работы АСУ.

На рис. 12 представлена реализация АСУ следящим пневмоприводом. Система управления собрана в шкафу управления (далее ШУ). На монтажной панели ШУ установлен логический контроллер – главный модуль 1, в состав которого входят различные модули расширения: аналоговые модули входа/выхода, на вход которых подаются аналоговые сигналы с

различных датчиков или других логических устройств, входящих в состав АСУ, а на выходах которых, контроллер формирует аналоговые сигналы управления устройствами и аппаратами (в том числе исполнительными механизмами), входящими в структуру системы, реализуя любой желаемый вид движения исполнительного механизма; дискретные модули входа/выхода, реализующие принципы РКЛ; модули хранения информации – модули памяти и др.

На рис. 13 приведен вид графического интерфейса – рабочего окна оператора. В появившемся окне программы необходимо задавать и настраивать все необходимые параметры перед работой. В разделе программы «Управле-



**Рис. 12. Общий вид шкафа управления с ЛК:**

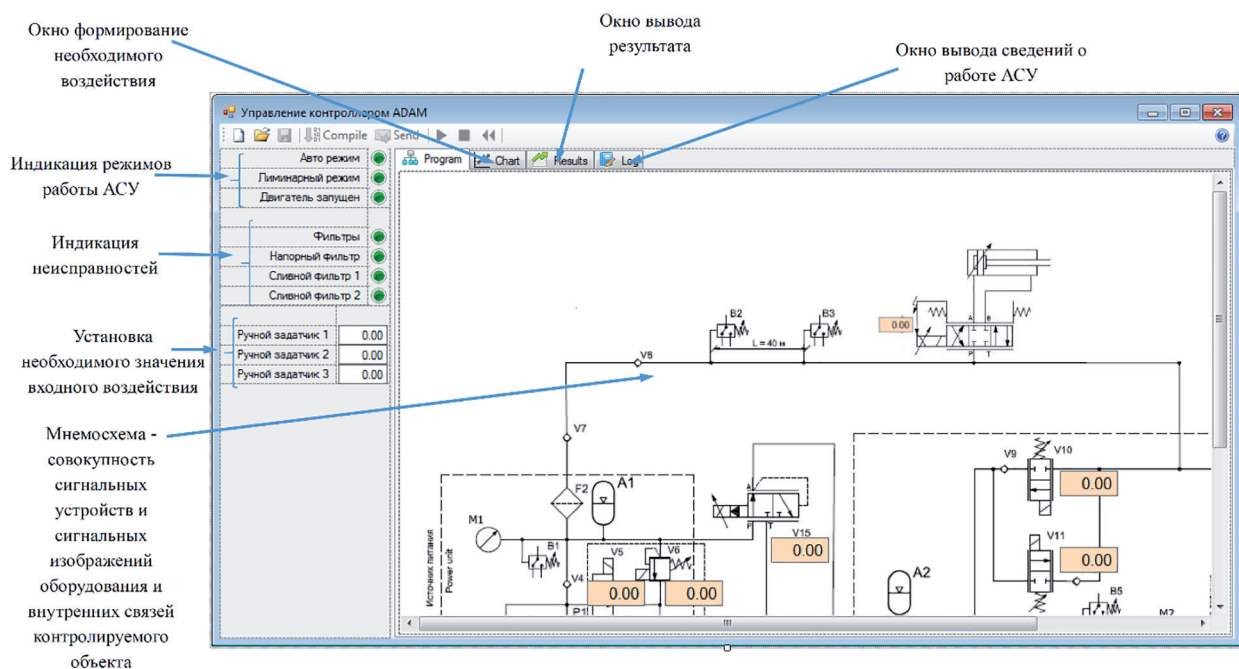
1 – логический контроллер (ЛК) – главный модуль; 2 – удаленный модуль дискретных выходов, подключенный к главному модулю 1; 3 – удаленный модуль дискретных входов, подключенный к главному модулю 1; 4 – блок питания; 5 – модуль аналоговых выходов; 6 – модуль дискретных входов, к которому подключается удаленный модуль 3; 7 – разъем для подключения персонального компьютера оператора; 8 – набор автоматов защиты элементов системы управления

ние» в главном меню левой части интерфейса можно увидеть активность параметров индикации режимов работы (первые 3 индикатора) и индикации неисправностей (последующие 4 индикатора), где красный сигнал означает неисправную работу стенда и подключение компонентов в целом, а зеленый говорит об обратном. В центре раздела есть четыре активных окна – четыре вкладки. С помощью

мыши можно свободно по ним перемещаться. В первой вкладке Program формируется схема, являющаяся совокупностью всех сигнальных устройств и изображений оборудования и внутренних связей контролируемого объекта. Во второй Chart происходит формирование необходимого воздействия. Третье окно Results просмотра результата расчета. Последнее окно Log вывода сведений о работе системы управления. В полях, подсвеченных желтым цветом, задаются значения напряжений, подаваемых на соответствующие электрические катушки распределителей и/или других устройств системы.

Достоинства выбранного метода построения системы управления заключаются в следующем:

- простота изменения алгоритма работы: необходимо изменить программный код для ЛК;
- простота модернизации системы управления: добавление/удаление любых компонентов системы приводит к изменению кода программы для ЛК;
- точность и надежность работы системы управления, возможность контроля выполнения технологических операций в режиме реального времени;
- сохранность данных о всех режимах работы и всей истории событий технологических операций.



**Рис. 13. Общий вид графического интерфейса (рабочего окна) оператора**



### Заключение

Результаты работы состоят в следующем:

Получена математическая модель аналоговой (непрерывной) и цифровой (дискретной) систем пневмо/гидрораспределителя и приведены их блок-схемы, в состав их структуры введен ПИДрегулятор. Проведен расчет и анализ полученных переходных процессов по перемещению золотника пропорционального распределителя.

Установлены показатели качества цифровой системы для ее исследования во временной области.

Выбран и приведен критерий оптимизации для определения параметров ПИДрегулятора для управления пневмо/гидросистем.

Даны рекомендации и способ нахождения времени дискретизации цифровых систем управления пневмо/гидроприводом с ПИДрегулятором.

Приведены структурная схема и пример реализации системы с цифровым управлением пневмо/гидроприводом.

На основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы:

Введение и выбор оптимальных параметров ПИД-регулятора в состав структуры системы управления пневмо/гидроприводом привело к сокращению времени переходного процесса в 1,83 раза, т.е. увеличило быстродействие системы с сохранением ее устойчивости, а также уменьшило максимальное перерегулирование в 2,85 раза. Это сказывается на ресурсе системы пневмо/гидропривода, ее точности и надежности. В качестве оптимизируемых параметров могут выступать любые параметры системы пневмо/гидропривода, которые необходимо определять на этапе его разработки, такие как: жесткость пружин, величина диаметра золотника, окон гильзы, ход золотника и/или любые другие параметры.

Установлено, что для цифровых систем точного управления с ПИДрегулятором пневмо/гидроприводом, время дискретизации равно 0,01 с, что эквивалентно 50 Гц (стандартные промышленные контроллеры), не обеспечивает точности регулирования физических величин. В данном случае необходимо выбирать время дискретизации на порядок меньше равное 0,001 с. Тогда максимальное значение ошибки по изменению контролируемой физической величины, удовлетворяет введенному интервалу допустимых отклонений – 2 %.

Данное время дискретизации позволяют реализовать современные промышленные контроллеры специального назначения, выпускаемые серийно.

Научная новизна работы заключается в создании способа выбора оптимальных параметров цифровых систем управления пневмо/гидроприводом с ПИД-регулятором и представлению практических рекомендаций по определению времени дискретизации.

В связи с этим полученные результаты работы носят прикладной характер для лиц, занимающихся проектированием и оптимизацией цифровых систем управления с пневмо/гидроприводом.

### Литература

1. Айзерман М.А., Гусев Л.А., Розоноэр Л.И. Логика, автоматы, алгоритмы. М.: 1963. – 530 с.
2. Рогинский В.Н. Построение релейных схем управления. М.-Л.: Издательство «Энергия», 1964. – 424 с.
3. Брауэр В. Введение в теорию конечных автоматов: Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.
4. Труханов К.А., Попов Д.Н., Ефремова К.Д. Влияние электродинамических свойств пневмо/гидрораспределителей на расчет систем при математическом моделировании // Справочник. Инженерный журнал. Журн. 2018. № 10.
5. Гудвин, Грэм К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо; пер. с англ. А.М. Епанешникова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004 (Вологда: ПФ Полиграфист). 911 с.: ил., табл.; 24 см.; ISBN 5-94774-128-8 (в пер.)
6. Труханов К.А. Синтез гидропривода с дискретно управляемым движением выходного звена: дис. ... канд. техн. наук. Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 2013.
7. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: Учебник для вузов. 2е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
8. Труханов К.А. Математическое моделирование гидропривода вентилятора для системы охлаждения автомобильного двигателя // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. № 1 (13). С. 84–96.
9. Andersen B.W. The analysis and design of pneumatic systems, New York, USA, John Wiley&Sons, 2001.
10. Труханов К.А., Ефремова К.Д., Макаров И.В. Методика идентификации передаточной функции пневмо/гидроаппаратов. // Известия МГТУ «МАМИ». 2016. № 4 (30). С. 74–81

11. Настройка ПИД-регулятора – легко и просто [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/videos/pidcontrolmadeeasy92818.html> (дата обращения 22.05.2018)
12. Дискретная форма регулятора [Электронный ресурс] URL: [http://www.bookasutp.ru/Chapter5\\_4\\_6.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter5_4_6.aspx) (дата обращения 22.05.2018)
13. Гамазов Н.И. Экспериментальное исследование работы пневмопривода. Часть 2 // Современные технологии автоматизации. 2014. № 4.

### References

1. Ajzerman M.A., Gusev L.A., Rozonoehr L.I., i dr. *Logika, avtomaty, algoritmy* [Logics, automatic devices, algorithms]. Moscow: 1963. 530 p.
2. Roginskij V.N. *Postroenie relejnyh skhem upravleniya* [Construction of relay control circuits]. Moscow-Leningrad: Izdatel'stvo «EHnergiya» Publ., 1964. 424 p.
3. Brauchr V. *Vvedenie v teoriyu konechnyh avtomatov* [Introduction to the theory of finite automatic devices]: Per. s nem. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1987. 392 p.
4. Truhanov K.A., Popov D.N., Efremova K.D. Influence of electrodynamic properties of pneumatic / hydraulic distributors on the calculation of systems in mathematical modeling. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. ZHurn.* 2018. No 10. (in Russ.).
5. Gudvin G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.EH. *Proektirovanie sistem upravleniya* [Designing of control systems]. Per. s angl. A.M. Epaneshnikova. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004 (Vologda: PF Poligrafist). 911 p. ISBN 5-94774-128-8.
6. Truhanov K.A. *Sintez gidroprivoda s diskretno upravlyaemym dvizheniem vyhodnogo zvena*: dis. ... kand. tekhn. Nauk [Synthesis of a hydrodrive with discretely controlled movement of the output link: dissertation for degree of Candidate of Technical Sciences]. Moskovskij Gosudarstvennyj Tekhnicheskij Universitet im. N.EH. Bauman, Moscow, 2013.
7. Popov D.N. *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem: Uchebnik dlya vuzov* [Dynamics and regulation of hydro- and pneumatic systems: Textbook for universities]. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 464 p.
8. Truhanov K.A. Mathematical modeling of the hydraulic drive of a fan for the cooling system of an automobile engine. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2012. No 1(13), pp. 84–96 (in Russ.).
9. Andersen B.W. *The analysis and design of pneumatic systems*, New York, USA, John Wiley & Sons, 2001.
10. Truhanov K.A., Efremova K.D., Makarov I.V. Technique of identification of the transfer function of pneumatic / hydraulic devices. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2016. No 4(30), pp. 74–81 (in Russ.).
11. Nastrojka PID-regulyatora – legko i prosto [EHlektronnyj resurs] URL: <https://www.mathworks.com/videos/pidcontrolmadeeasy92818.html> (accessed 22.05.2018).
12. Diskretnaya forma regulyatora [EHlektronnyj resurs] URL: [http://www.bookasutp.ru/Chapter5\\_4\\_6.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter5_4_6.aspx) (accessed 22.05.2018).
13. Gamazov N.I. EHksperimental'noe issledovanie raboty pnevmoprivoda [Experimental study of pneumatic actuator operation]. CHast' 2. *Sovremennye tekhnologii avtomatizacii*. 2014. No 4. (in Russ.).

## DIGITAL PID CONTROLLER FOR PNEUMATIC AND HYDRAULIC SYSTEMS

Ph.D. K.A. Truhanov

Special Design Bureau of Applied Robotics, Moscow, Russia  
trukhanov@mail.ru

*In the development of technological systems with pneumatic or hydraulic drive, the use of automated means for their control is required. At present, automated control tools built with the help of logic controllers are widely used. The logical controller allows to solve a wide variety of tasks with minimal costs, both in terms of cost and time spent for developing the system. So the logic controller ensures the speed of systems with pneumatic or hydraulic drive up to 1 ms or less. With the use of digital automated controls, questions related to the synthesis of PID regulators and the stability of systems with pneumatic / hydraulic drive in the time domain arise. The purpose of this work was the creation and practical implementation of a digital PID controller for controlling the pneumatic / hydraulic system to provide practical recommendations for its use in engineering.*

*The article presents a block diagram of analog and digital control systems with a proportional pneumatic distributor. The implementation of analog and digital PID-controller and optimization of its parameters by an integral criterion is presented. Comparison of analog and digital systems with the PID controller introduced into their composition is made. The quality of these systems is suggested to be estimated in the time domain by the time of the transient process and the maximum dynamic error. Practical recommendations for determining the sampling time of digital systems with a PID controller are given. An example of the developed digital automatic control system for tracking pneumatic drive is shown, its structural diagram, the general view of the control device with the logic controller and the graphic operator interface, which makes it easy to configure the automated control tool and monitor its state.*

*The scientific novelty of the results presented in the article was that the task of investigating the dynamics of a pneumatic / hydraulic distributor with an electric control in the time domain was solved using a mathematical model that included a digital PID controller and a comparison of the results of modeling a digital system with analogue was made, and practical recommendations for determining the sampling time were given.*

**Keywords:** digital PID regulator, pneumatic / hydraulic system, mathematical model, pneumatic actuator, block diagram, optimization, analogue system, digital system.