

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СЛЕДЯЩЕГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА С УЧЕТОМ МОДЕЛИ ТРЕНИЯ С ЭФФЕКТОМ ШТРИБЕКА

Киреева В.А., д.т.н. Труханов К.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

valyavalenti97@yandex.ru

Целью работы является выбор оптимальных значений параметров цифрового ПИД-регулятора для устранения в системах автоколебаний, а также оптимизация вида переходных процессов следящего пневматического привода. Причиной исследования послужила проблема возникновения автоколебаний в пневматических системах при применении моделей трения наиболее приближенных к реальности. Научная новизна статьи состоит в создании компьютерной модели и применении методов оптимизации для улучшения качества переходных процессов пневматического следящего привода с учетом модели трения Штрибека.

Авторами статьи выполнена оптимизация переходных процессов следящего пневматического привода с учетом выбранной модели трения. В ходе работы при помощи компьютерного моделирования подобраны оптимальные параметры ПИД-регулятора, устранена неустойчивость системы. Для оптимизации работы системы был выбран метод градиентного спуска. Произведена оценка показателей качества переходных процессов до и после оптимизации. По результатам моделирования системы следящего пневматического привода можно сделать вывод о возможности применения метода градиентного спуска для определения параметров ПИД-регулятора.

Произведен переход от аналоговой (непрерывной) системы к цифровой (дискретной), для осуществления которого необходимо определить период дискретизации. В статье указаны основные методы определения периода дискретизации и приведены недостатки этих методов. Анализ результатов показывает, что методы, описанные в статье, следует применять лишь для первого приближения, а значение указанной величины должно выбираться из расчета минимальной погрешности между аналоговой (непрерывной) и цифровой (дискретной) системой. Погрешность менее 1 % позволяет осуществить выбор программируемого логического контроллера. Тема статьи является актуальной для научного исследования и включает предоставление практических рекомендаций по определению параметров цифрового ПИД-регулятора и подбору контроллера специалистам, кто занимается проектированием систем, в состав которых включен следящий пневматический привод.

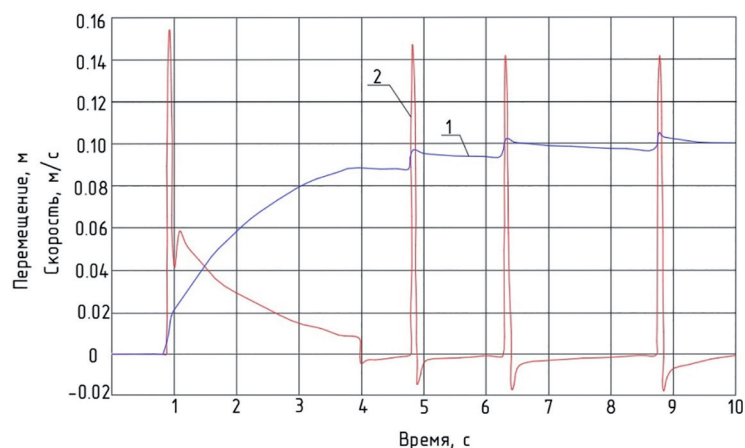
**Ключевые слова:** ПИД-регулятор, период дискретизации, качество переходного процесса, контроллер, оптимизация, привод пневматический следящий.

**Для цитирования:** Киреева В.А., Труханов К.А. Оптимизация переходных процессов следящего пневматического привода с учетом модели трения с эффектом Штрибека // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 2 (48). С. 71–80. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-71-80.

## Введение

Для исследования воздействия на систему силы трения разработаны различные математические модели трения. Среди таких моделей трения можно выделить: модель вязкого трения, Кулонова трения, модель трения с эффектом Штрибека, а также динамические модели трения, такие как модель Даля или ЛуГре. При рассмотрении влияния таких моделей на устойчивость системы пневматических устройств было выявлено, что модели трения более приближенные к реальности, т.е. учитывающие как можно

больше свойств трения, могут оказывать действие на устойчивость системы, т.е. способность системы сохранять текущее состояние при влиянии внешних воздействий [1]. Наиболее широкое распространение получила модель трения, учитывающая эффект Штрибека, так как она обладает наиболее полным описанием процесса трения и относительной простотой. Анализ результатов показывает, что применение модели трения Штрибека для следящего пневматического привода приводит к неустойчивости системы (рис. 1) и возникновению в ней колебаний.



**Рис. 1. Графики переходных процессов исполнительного звена пневматического следящего привода при использовании модели трения Штрибека:**

1 – график изменения перемещения; 2 – график изменения скорости

*Fig. 1. Transient graphs of the actuator of the pneumatic servo drive when using the Striebeck friction model: 1 – graph of displacement change; 2 – graph of speed change*

Одним из способов получения желаемой точности и качества переходного процесса является применение регуляторов. Очевидно, что для данной системы с целью устранения колебаний необходимо ввести в состав ее структуры ПИД-регулятор и определить оптимальные его параметры.

Широкое распространение в области регулирования получили ПИД-регуляторы. Популярность таких регуляторов связана с простотой использования, возможностью применения в различных системах и низкой стоимостью. ПИД-регуляторы применяют в системах управления тогда, когда требуется улучшить как вид переходного процесса, так и точность установившегося значения. Под синтезом такого регулятора понимают расчет параметров настройки регулятора.

Можно выделить следующие методы синтеза ПИД-регуляторов: эмпирическая настройка, методы Зиглера-Никольса и производственные методы, алгебраические методы, методы модального синтеза, методы синтеза в частной области, методы оптимального синтеза, метод оптимальной передаточной функции замкнутой системы [2].

Несмотря на то, что к настоящему времени существует большое число рекомендаций по настройке, расчету и оптимизации параметров типовых регуляторов, универсальной методики их синтеза пока не предложено. При разработке программных алгоритмов определения оптимальных параметров ПИД-регулятора выбор

используемого математического алгоритма представляет собой компромисс между точностью приближения к точке оптимума, временными затратами электронной вычислительной машины и простотой реализации [3].

Для технического воплощения ПИД-регулятора необходимо перейти от аналоговой (непрерывной) системы к цифровой (дискретной). Это напрямую связано с тем, что основой всех систем управления является микропроцессор, который оперирует с переменными, полученными из аналоговых сигналов после их дискретизации по времени и квантования по уровню. Для этого необходимо правильно выбрать шаг дискретизации. Кроме того, переход к цифровой системе и правильный выбор шага дискретизации дает возможность подобрать для системы программируемый логический контроллер. Такой контроллер позволит автоматизировать систему, а значит повысить эффективность и безопасность производственного процесса.

#### **Подбор параметров ПИД-регулятора**

ПИД-регулятор измеряет отклонение стабилизируемой величины от заданного значения и выдает управляющий сигнал, являющийся суммой трех слагаемых, первое из которых пропорционально этому отклонению, второе пропорционально интегралу отклонения и третье пропорционально производной отклонения [4]. Такой регулятор описывается выражением:

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

где  $t$  – время;  $P$  – коэффициент пропорциональности;  $T_i$  – постоянная интегрирования;  $T_d$  – постоянная дифференцирования;  $e(t)$  – сигнал рассогласования (ошибка) [5].

Тогда передаточная функция регулятора имеет вид:

$$W(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}, \quad (2)$$

где  $s$  – оператор Лапласа;  $I = \frac{1}{T_i}$  – коэффициент

интегрирующего звена;  $D = T_d$  – коэффициент дифференцирующего звена;  $N$  – коэффициент фильтра.

Фильтр используется для ослабления помех, усиленных дифференциатором.

Блок-схема регулятора представлена на рисунке 2.

Задачей оптимизации называется задача поиска минимума скалярной функции на множестве значений ее аргумента, удовлетворяющих некоторым ограничениям [6]. В отношении ПИД-регулятора задача оптимизации – определение оптимальных коэффициентов (параметров) регулятора, удовлетворяющих критериям качества переходных процессов системы.

В настоящее время существует большое разнообразие алгоритмов и методов поиска

оптимума, основанных на различных математических методах. Их можно разделить на два типа: методы локальной оптимизации и глобальной. Преимуществами методов локальной оптимизации является уменьшение временных затрат на поиск решения по сравнению с глобальными, однако возможно попадание решения в локальный минимум.

Одним из таких методов локальной оптимизации является метод градиентного спуска. Основная идея метода градиентного спуска состоит в нахождении локального минимума или максимума функции, двигаясь в направлении ее наиболее быстрого убывания, которое определяется антиградиентом:

$$\begin{aligned} P[j+1] &= P[j] - H \cdot \nabla F(P[j]), \\ T_i[j+1] &= T_i[j] - H \cdot \nabla F(T_i[j]), \\ T_d[j+1] &= T_d[j] - H \cdot \nabla F(T_d[j]), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $j$  – номер итерации определения оптимального параметра;  $\nabla F$  – градиент функции;  $H$  – шаг, с которым осуществляется градиентный спуск (на практике шаг может выбираться постоянным, дробным, переменным).

Применение постоянного или дробного шага может привести к расходимости метода. Поэтому целесообразно выбирать шаг градиентного спуска переменным, что позволяет сократить количество итераций и увеличить вероятность сходимости. Такой метод требует определение шага  $H$  при помощи одномерной оптимизации. При использовании

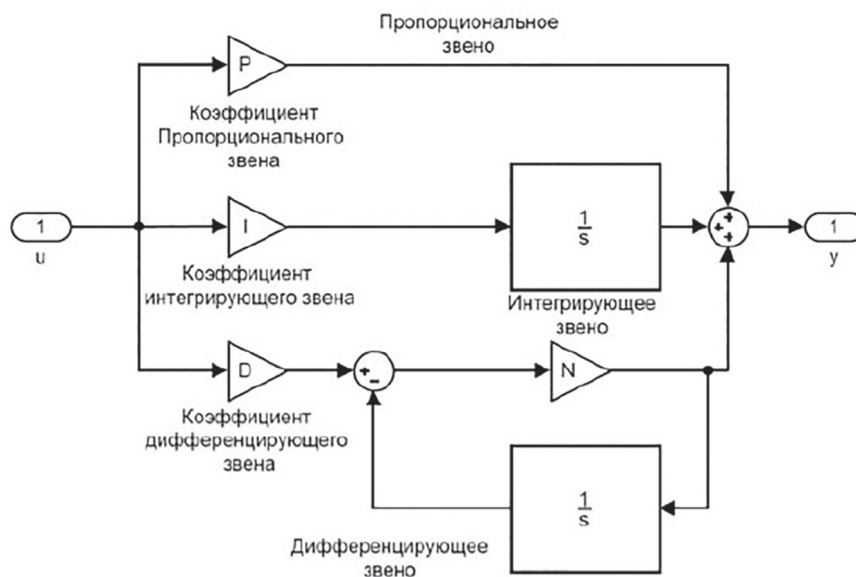


Рис 2. Блок-схема ПИД-регулятора [5]

Fig. 2. PID controller block diagram [5]

дифференцируемого по каждому параметру ПИД-регулятора шага градиентного спуска сходимость метода улучшается, а количество итераций поиска оптимума уменьшается [3]. Формулы при использовании дифференцированного шага преобразуются:

$$\begin{aligned} P[j+1] &= P[j] - H[P] \cdot \nabla F(P[j]), \\ T_i[j+1] &= T_i[j] - H[T_i] \cdot \nabla F(T_i[j]), \\ T_d[j+1] &= T_d[j] - H[T_d] \cdot \nabla F(T_d[j]). \end{aligned} \quad (4)$$

Шаг по каждому параметру ПИД-регулятора определяется исходя из следующих условий [3]:

$$\begin{aligned} F(P[j] - H[P] \cdot \nabla F(P[j])) &\rightarrow \min, \\ F(T_i[j] - H[T_i] \cdot \nabla F(T_i[j])) &\rightarrow \min, \\ F(T_d[j] - H[T_d] \cdot \nabla F(T_d[j])) &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (5)$$

Как известно, основным недостатком методов локальной оптимизации является то, что если функция помимо глобального экстремума имеет несколько локальных минимумов, то решение может сойтись к одному из них. Для устранения этой проблемы следует разбивать всю область поиска оптимальных параметров регулятора на части и для каждой части определять свой минимум. Тогда глобальный экстремум можно определить при анализе локального минимума каждой части.

В качестве критерия оптимизации используется интегральный критерий, реализующий математическую зависимость:

$$I(t) = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t u^2(\tau) d\tau}, \quad (6)$$

где  $u(\tau)$  – входной сигнал, подаваемый в блок оптимизации [5].

Если выполнен критерий останова, т.е. найдены оптимальные значения коэффициентов ПИД-регулятора, удовлетворяющие заданным условиям, то возвращается текущее значение  $P[j+1]$ ,  $T_i[j+1]$ ,  $T_d[j+1]$ .

### **Переход от аналоговой (непрерывной) системы к цифровой (дискретной)**

Развитие вычислительной техники привело к распространению цифровой обработки

информации. Это связано с тем, что логика в современных компьютерах построена на дискретных системах. Дискретной называется система, в состав которой помимо непрерывных динамических звеньев входит хотя бы один элемент, производящий квантование непрерывного сигнала в дискретный [7]. Такой переход имеет несколько положительных сторон.

Во-первых, переход от аналоговой системы к цифровой существенно уменьшает количество поступающих данных. Иными словами, можно использовать данные, взятые через определенные промежутки времени, и извлекать и передавать информацию для обработки цифровыми устройствами. Таким образом, при рациональном выборе шага дискретизации можно снизить затраты на хранение и обработку полученной информации.

Во-вторых, аналоговая система управления не может обеспечить таких же высоких показателей точности позиционирования, как дискретная, из-за дрейфа нуля операционных усилителей (самопроизвольного отклонения напряжения или тока на выходе усилителя от начального значения), на которых, как правило, реализуются устройства управления. Дискретные системы обладают более высокой помехозащищенностью и устойчивостью к возмущениям, имеют меньшие габариты и вес [7].

Для перехода из аналоговой системы к цифровой необходимо представить ПИД-регулятор в дискретном виде. Также для соединения цифровой части математической модели и ее аналоговой части необходимо использовать экстраполятор нулевого порядка. Экстраполятор применяется для связывания квантованных данных с непрерывными [5].

Тогда передаточная функция цифрового ПИД-регулятора имеет вид:

$$W(z) = P + I \cdot T \frac{1}{z-1} + D \frac{N}{1 + N \cdot T \frac{1}{z-1}}, \quad (7)$$

где  $z$  – дискретный преобразователь;  $T$  – период дискретизации.

Дискретизация по времени является первым этапом преобразования аналогового сигнала в последовательность цифровых отсчетов. Так как в процессе дискретизации аналоговый сигнал заменяется отсчетами, взятыми через интервал дискретизации  $T$ , то весьма важным является правильный выбор значения этого интервала. При увеличении  $T$  может



оказаться, что в паузах между последовательными отсчетами аналоговый сигнал заметно меняется, и это может привести к потере информации. При уменьшении  $T$  дискретный сигнал точнее соответствует исходному аналоговому, так как при уменьшении длительности паузы между последовательными отсчетами разница между значениями отсчетов также уменьшается. Оптимальным значением периода дискретизации принято считать такое значение  $T$ , при котором обеспечивается восстановление исходного аналогового сигнала по совокупности его дискретных отсчетов. Для определения этого значения существует несколько подходов.

Первый метод определения периода дискретизации на основании теоремы Котельникова (теоремы отсчетов). Минимальное значение частоты дискретизации должно удовлетворять равенству:

$$f_d = 2f_B, \quad (8)$$

где  $f_d = \frac{1}{T}$  – частота дискретизации сигнала;  $f_B$  – частота спектра сигнала.

Различные радиотехнические устройства (фильтры, усилители и другие) имеют ограниченную полосу пропускания, что приводит к ограничению спектра сигнала некоторой граничной частотой  $f_B$ , которая определяется свойствами получателя. Частота спектра определяется при разложении в ряд Фурье с заданной точностью.

Стоит заметить, что при увеличении частоты дискретизации более чем в 2 раза по сравнению с верхней частотой спектра возмущающих сигналов (по теореме Котельникова), дальнейшего улучшения качества регулирования не происходит. При выборе времени дискретизации необходимо учитывать также то, что время переходного процесса должно превышать период дискретизации  $T$ .

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, или выбирается так, чтобы сделать влияние дискретизации незначительным, рекомендуют скорость квантования выбрать в 5–10 раз больше, чем полоса пропускания замкнутого контура [5].

### Анализ результатов

Для получения качественного управления ПИД-регулятор необходимо настроить по заданным критериям качества. В данной задаче критерием качества было выбрано качество переходного процесса, так как основной задачей работы была настройка ПИД-регулятора для получения наилучшего переходного процесса, что подразумевает минимальную колебательность, максимальную точность и устойчивость системы. Как известно, основными показателями для оценки качества переходного процесса являются: время переходного процесса (время, по истечению которого переходный процесс попадает в канал допустимых отклонений ( $\pm 0,5x_\infty$ ) [1]), статическая ошибка и динамическая ошибка. А значит, необходимо подбирать параметры ПИД-регулятора так, чтобы эти показатели были минимальными.

Критериями качества для оптимизации переходного процесса данной системы были заданы: начальное значение – 0 м, время роста – 5 секунд, время регулирования (время переходного процесса) – 7 секунд, перерегулирование – 10 %, установившееся значение – 0,1 м, рост – 80 %, зона установления (канал допустимых отклонений) – 5 %, спад – 1 % (рис. 3).

Как видно из рис. 4, график переходного процесса скорости описывает астатическую систему. Система регулирования называется астатической по отношению к возмущающему воздействию, если при воздействии, стремящемся с течением времени к некоторому установившемуся постоянному значению, отклонение регулируемой величины стремится к нулю вне зависимости от величины воздействия [9]. В астатических САУ конечное и исходное состояния равновесия совпадают, поэтому у них динамическая ошибка принимается равной максимальному отклонению параметра в процессе регулирования [10]. Тогда канал заданных отклонений определяется исходя из значения динамической ошибки ( $\pm 0,5\sigma_{\text{дин}}$ ).

Для неустойчивой системы (рис. 4) с целью анализа и сравнения результатов приведены значения максимальной амплитуды и периода колебаний. Оценка качества переходных процессов перемещения и скорости исполнительного звена пневматического следящего привода – пневматического цилиндра (далее ПЦ) представлена в таблице 1.



Рис. 3. Показатели качества переходного процесса [8]

Fig. 3. Transient quality indicators [8]

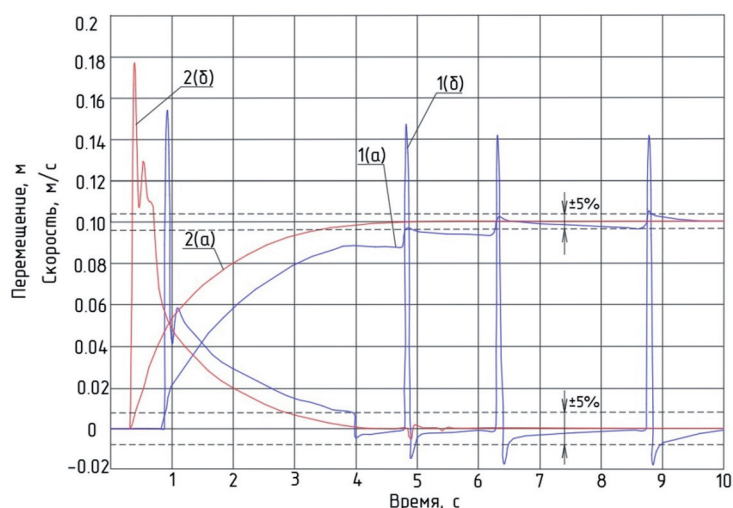


Рис. 4. Графики переходных процессов исполнительного звена пневматического следящего привода при использовании модели трения с эффектом Штрибека аналоговой системы:

1(а) – график переходного процесса перемещения без ПИД-регулятора; 1(б) – график переходного процесса скорости без ПИД-регулятора; 2(а) – график переходного процесса перемещения при использовании ПИД-регулятора; 2(б) – график переходного процесса скорости при использовании ПИД-регулятора

Fig. 4. Transient graphs of the actuator of the pneumatic servo drive when using the friction model with the Striebeck effect of the analog system: 1(a) – graph of the transient process of movement without a PID controller; 1(b) – speed transient graph without PID controller; 2(a) – PID displacement transient graph; 2(b) – speed transient graph when using a PID controller

Для перехода к дискретной системе необходимо определить период дискретизации. В соответствии с вышеописанным методом период дискретизации исследуемой системы принимаем равным 0,2 с. Графики переходных процес-

сов аналоговой и цифровой системы и оценка их качества представлены на рис. 5 и в таблице 2.

Определим значения погрешностей между критериями качества переходных процессов

Таблица 1

**Оценка качества переходных процессов ПЦ аналоговой системы с ПИД-регулятором и без него**

Table 1. Evaluation of the quality of transient processes of analog system with and without PID controller

|  | Без ПИД-регулятора                |                                | При использовании ПИД-регулятора  |                                |
|--|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
|  | Переходный процесс перемещения ПЦ | Переходный процесс скорости ПЦ | Переходный процесс перемещения ПЦ | Переходный процесс скорости ПЦ |
| Время переходного процесса (период колебаний), с | 8,9                               | 9                              | 3,4                               | 2,9                            |
| Динамическая ошибка (максимальная амплитуда), м  | 0,16                              | 0,157                          | 0                                 | 0,176                          |
| Статическая ошибка, %                            | 0                                 | 0                              | 0                                 | 0                              |

аналоговой и цифровой системы (табл. 3) по формуле:

$$\Delta = \frac{|x_a - x_{ц}|}{x_a} \cdot 100 \% , \quad (9)$$

где  $x_a$  – значение параметра аналоговой системы;  $x_{ц}$  – значение параметра цифровой системы.

Можно заметить, что ошибка переходных процессов аналоговой и цифровой системы достаточно велика, а значит, требуется уточнить параметр  $T$ . Рекомендуется выбирать время дискретизации так, чтобы погрешности между критериями качества аналоговой и цифровой систем были менее одного процента, тогда можно говорить о корректности работы дискретной системы и правильности выбора контроллера. Поэтому метод на основе анализа вида переходного процесса подходит лишь для выбора начального приближения времени дискретизации.

Для достижения поставленной задачи необходимо уменьшить время дискретизации до  $T = 0,001$ . Результаты расчетов представлены на рис. 4–6.

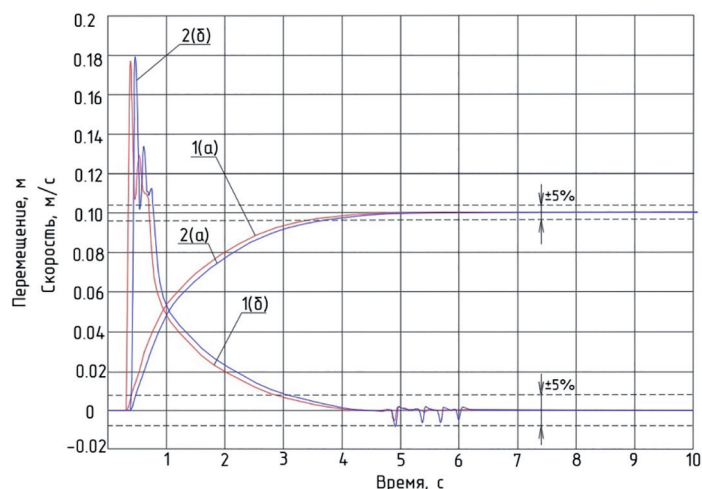
Из рис. 6 видно, что при  $T = 0,001$  с графики переходных процессов практически полностью совпадают. Погрешность критериев качества таких графиков составляет менее 1 %, а значит время дискретизации выбрано верно.

С целью автоматизации системы рекомендуется установить программируемый логический контроллер. Контроллер позволяет осуществлять длительное автономное управление системой, зачастую в неблагоприятных условиях окружающей среды, без серьезного

обслуживания и практически без вмешательства человека. Выбор программируемого контроллера является важной и сложной задачей при создании систем автоматического управления технологическими процессами.

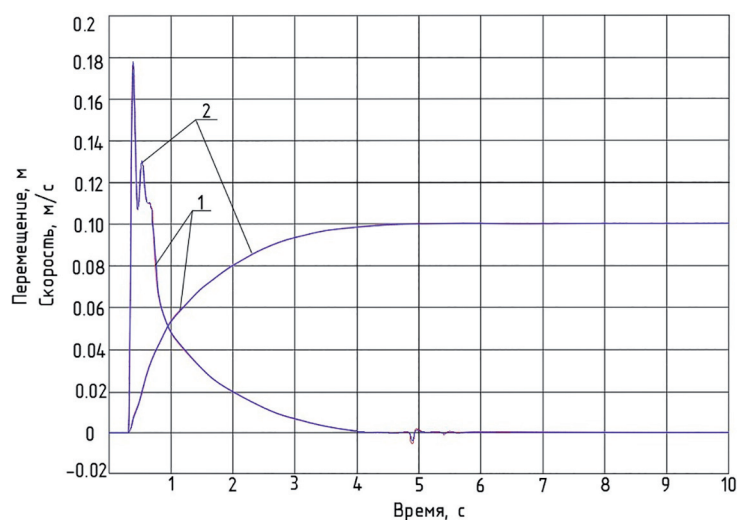
Основным решающим фактором при выборе контроллера является его быстродействие. Реакция контроллера напрямую зависит от числа и частоты опрашивания входов/выходов контроллера, а также от мощности самого процессора. Таким образом, чем большую частоту дискретизации и меньший период дискретизации имеет контроллер, тем выше его быстродействие. Если контроллер используется не только для регулирования, но и для аварийной сигнализации, то такт дискретизации не может быть меньше, чем допустимая задержка срабатывания сигнала аварии.

Пневматические следящие системы требуют большей надежности и точности позиционирования, аналогичные требования предъявляются и к устройствам автоматизации таких систем. Стандартные промышленные контроллеры с частотой 50 Гц (при  $T = 0,1$ ) не могут обеспечить необходимой точности регулирования. Поэтому для управления исследуемой системой пневматического следящего привода стоит применять контроллеры с частотой порядка 1 кГц (при  $T = 0,001$ ). Данное время дискретизации позволяет реализовать современные промышленные контроллеры специального назначения, выпускаемые серийно [11]. Производителями таких устройств являются компании: *Advantech*, *VIPA*, *Schneider Electric*, *Siemens* и др.



**Рис. 5. Графики переходных процессов исполнительного звена пневматического следящего привода при использовании модели трения с эффектом Штрибека и ПИД-регулятора:**  
 1(а) – аналоговая система; 2 – дискретная система ( $T = 0,2$  с)

*Fig.5. Transient graphs of the actuator of the pneumatic servo drive when using the friction model with the Striebeck effect and the PID controller: 1(a) – analog system; 2 – discrete system ( $T = 0,2$  s)*



**Рис. 6. Графики переходных процессов исполнительного звена пневматического следящего привода при использовании модели трения с эффектом Штрибека и ПИД-регулятора:**  
 1 – аналоговая система; 2 – дискретная система ( $T = 0,001$  с)

*Fig. 6. Transient graphs of the actuator of the pneumatic servo drive when using the friction model with the Striebeck effect and the PID controller: 1 – analog system; 2 – discrete system ( $T = 0,001$  s)*

Таблица 2

**Оценка качества переходных процессов ПЦ аналоговой и дискретной системы**

*Table 2. Evaluation of the quality of transient processes of analog and discrete systems*

|                               | Аналоговая система                |                                | Дискретная система                |                                |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
|                               | Переходный процесс перемещения ПЦ | Переходный процесс скорости ПЦ | Переходный процесс перемещения ПЦ | Переходный процесс скорости ПЦ |
| Время переходного процесса, с | 3,4                               | 2,9                            | 3,7                               | 4,9                            |
| Динамическая ошибка, %        | 0                                 | 0,176                          | 0                                 | 0,18                           |
| Статическая ошибка, %         | 0                                 | 0                              | 0                                 | 0                              |



Оценка погрешностей аналоговой и дискретной системы

Table 3. Error estimation for analog and discrete systems

|   | Переходный процесс перемещения ПЦ | Переходный процесс скорости ПЦ |
|---|-----------------------------------|--------------------------------|
| Погрешность времени переходного процесса, % | 8                                 | 68                             |
| Погрешность динамическая ошибки, %          | 0                                 | 2                              |
| Погрешность статическая ошибки, %           | 0                                 | 0                              |

### Выводы

1. Использование ПИД-регулятора для следящего пневматического привода позволяет устранить колебания (автоколебания) и вывести систему в устойчивое состояние, а применение метода градиентного спуска для определения параметров такого регулятора добиться высокого качества переходных процессов.

2. Метод определения периода дискретизации, основанный на анализе переходного процесса, имеет относительную погрешность более 1 %, поэтому рекомендуется использовать его как начальное приближение. Для достижения точности с ошибкой менее 1 % рекомендуется уменьшить период дискретизации.

3. Уменьшение периода дискретизации позволяет добиться минимальной погрешности между аналоговой и цифровой системой. Отклонения параметров переходных процессов непрерывных и дискретных систем должны составлять не более 1 %. Для автоматизации таких цифровых систем, при частоте порядка 1 кГц, стоит применять контроллеры специального назначения.

### Литература

1. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 464 с.
2. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Р.Т. Емельянов Р.Т. Методика синтеза регуляторов для объектов 2 порядка // Сибирский журнал науки и технологий, 2016.
3. Вотинов М.В., Маслов А.А. Моделирование и оптимизация цифровых пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов на базе программного обеспечения PID OPTIMIZE VIEWER // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии, 2011.

4. Грицкевич В.Н. Особенности реализации алгоритма системы управления в среде CODESYS // Студенческая наука – будущее государства: материалы II международной студенческой научно-практической конференции, УО «Полесский государственный университет», Пинск: ПолесГУ, 2008. С. 68–69.
5. Труханов К.А. Методы проектирования оптимальных следящих пневматических устройств для управления системами с жидкими рабочими средами: дис., 2019. 297 с.
6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
7. Лукьянец С.В., Доманов А.Т., Кузнецов В.П., Крупская М.А. Теория автоматического управления. Часть 2. Дискретные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. Учебное пособие. МГИЭМ. М., 2005, 63 с.
8. Давыдов В. Автоматическая оптимизация Simulink моделей и регуляторов // Портал научно-практических публикаций [Электронный ресурс]. URL: <https://portalnp.snauka.ru/2013/10/1194>
9. Липатников Г.А., Гузев М.С. Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики. Учебное пособие // ДВПИ им. В.В. Куйбышева. Владивосток, 2007.
10. Шишмарев В.Ю. Основы автоматического управления: учебное пособие для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2020. 350 с.
11. Труханов К.А. Цифровой ПИД-регулятор для пневмо/гидросистем // Известия МГТУ «МАМИ». 2018. № 3 (37). С. 65–75.

### References

1. Popov D.N. Dinamika i regulirovaniye gidro- i pnevmosistem [Dynamics and regulation of hydraulic and pneumatic systems]: Uchebnik dlya vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1987. 464 p.

2. Prokop'yev A.P., Ivanchura V.I., R.T. Yemel'yanov R.T. Metodika sinteza regulyatorov dlya ob'yektov 2 por'yadka [Technique for the synthesis of regulators for second order objects]. Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii Publ., 2016.
3. Votinov M.V., Maslov A.A. Modeling and optimization of digital proportional-integral-derivative controllers based on PID OPTIMIZE VIEWER software. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionn-yye tekhnologii, 2011 (in Russ.).
4. Gritskevich V.N. Features of the implementation of the control system algorithm in the CODESYS software: Materialy II mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy kon-ferentsii [Student science is the future of the state: materials of the II international student scientific and practical conference], UO «Poleskiy gosudarstvennyy universiteteT», Pinsk: PoleSGU, 2008, pp. 68–69 (in Russ.).
5. Trukhanov K.A. Metody proyektirovaniya optimal'nykh sledyashchikh pnevmaticheskikh ustroystv dlya upravleniya sistemami s zhidkimi rabochimi sredami: dis. [Design methods for optimal pneumatic follower devices for controlling systems with liquid working media], 2019. 297 p.
6. Gill F., Myurrey U., Rayt M. Prakticheskaya optimizatsiya [Practical optimization]. Moscow: Mir Publ., 1985. 509 p.
7. Luk'yanets S.V., Domanov A.T., Kuznetsov V.P., Krupskaya M.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Chast' 2. Diskretn-yye, nelineyn-yye, optimal'n-yye i adaptivn-yye sistemy [Automatic control theory. Part 2. Discrete, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Uchebnoye posobiye. MGIEP Publ. Moscow, 2005, 63 p.
8. Davydov V. Avtomaticheskaya optimizatsiya Simulink modeley i regulyatorov. Portal nauchno-prakticheskikh publikatsiy [Elektronnyy resurs]. URL: <https://portalnp.snauka.ru/2013/10/1194>
9. Lipatnikov G.A, Guzeyev M.S. Avtomaticheskoye regulirovaniye ob'yektov teploenergetiki. Uchebnoye posobiye. DVPI im. V.V. Kuybysheva Publ. Vladivostok, 2007.
10. Shishmarev V.YU. Osnovy avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Fundamentals of automatic control: Textbook for universities]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt Publ., 2020. 350 p.
11. Trukhanov K.A. Digital PID controller for pneumatic / hydraulic systems. Izvestiya MGTU «MAMI». 2018. No 3 (37), pp. 65–75 (in Russ.).

## OPTIMIZATION OF TRANSIENT PROCESSES OF THE PNEUMATIC SERVO DRIVE TAKING INTO ACCOUNT THE FRICTION MODEL WITH THE STRIBECK EFFECT

V.A. Kireyeva, DSc in Engineering K.A. Trukhanov  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
valyavalenti97@yandex.ru

*The aim of the work is to select the optimal values of the parameters of the digital PID controller to eliminate self-oscillations in systems, as well as to optimize the type of transient processes of the servo pneumatic drive. The reason for the study was the problem of the occurrence of self-oscillations in pneumatic systems when using friction models that are closest to reality. The scientific novelty of the article consists in the creation of a computer model and the application of optimization methods to improve the quality of transient processes of the pneumatic servo drive, taking into account the Striebeck friction model.*

*The authors of the article optimized the transient processes of the pneumatic servo drive taking into account the selected friction model. The optimal parameters of the PID controller were selected using computer simulation. And the instability of the system was eliminated as well. To optimize the system performance, the gradient descent method was chosen. An assessment of the quality indicators of transient processes before and after optimization was made. Based on the simulation results of the pneumatic servo drive system, it can be concluded that the gradient descent method can be used to determine the parameters of the PID controller.*

*The transition from an analog (continuous) system to a digital (discrete) system has been made. It is necessary to determine the sampling period for its implementation. The article indicates the main methods for determining the sampling period and shows the disadvantages of these methods. Analysis of the results shows that the methods described in the article should be used only for the first approximation, and the value of the indicated quantity should be selected from the calculation of the minimum error between an analog (continuous) and digital (discrete) system. An error of less than 1% allows the selection of a programmable logic controller. The topic of the article is relevant for scientific research and includes the provision of practical recommendations for determining the parameters of a digital PID controller and selecting a controller for specialists who are involved in the design of systems that include a pneumatic servo drive.*

**Keywords:** PID controller, sampling period, transient quality, controller, optimization, pneumatic servo drive.

**Cite as:** Kireyeva V.A., Trukhanov K.A. Optimization of transient processes of the pneumatic servo drive taking into account the friction model with the Striebeck effect. Izvestiya MGTU «MAMI». 2021. No 2 (48), pp. 71–80 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-71-80.