

Ш. Р. Галлямов, К. В. Стариков, В. А. Целищев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОПРИВОДА FESTO С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РАСХОДА

Представлен экспериментальный стенд компании FESTO для исследования характеристик пневмопривода. Рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния силы трения и статической нагрузки на характеристики пневмоцилиндра. Представлена методика обработки экспериментальных данных. *Пневмопривод с точным позиционированием; быстроедействие; время регулирования; зона нечувствительности*

Пневматика получила чрезвычайно широкое распространение в промышленности. Пневмооборудование, как правило, экономично при относительно низких давлениях (до 7–10 бар), а его рабочая среда (сжатый воздух) доступна и относительно недорога в производстве. К основным достоинствам пневмопривода можно отнести простоту конструкции и техническое обслуживание, большой срок службы, пожаро- и взрывобезопасность, высокое быстродействие, возможность передачи энергии на большие расстояния с минимальными потерями.

Пневмоприводы и гидроприводы традиционно оценивались хорошо проверенными и удобными методами теории автоматического управления. При исследовании влияния различных факторов на характеристики пневмоприводов не учитывались особенности течения воздуха в каналах и дросселирующих устройствах пневмоприводов. Свойства рабочей среды газа в пневмоприводах отличаются от свойств рабочей среды жидкости в гидроприводе. Течение газа по трубопроводу идет с более высокой скоростью, чем течение жидкости, что позволяет обеспечивать скорость поступательного движения штока до 15 м/с и более, а частота вращения выходного вала некоторых пневмомоторов (пневмотурбин) до 100000 об./мин [1, 3].

При течении газа, как и жидкостей, вследствие перепада давлений (дроссель) имеют место различные режимы течений: ламинарный и турбулентный режимы течения, установившийся и неустановившийся характер течения, равномерное и неравномерное течение из-за переменного сечения трубопровода и другие характеристики потоков. В пневмоприводе это явление возникает при заполнении напорной и опорожненной полостей, течения воздуха через различные пневмоэлементы, что осложняет расчет

переходных процессов. На сегодняшний день существует целый ряд задач, которые необходимо решить для улучшения характеристик пневмоприводов с пропорциональным регулированием расхода. Такие свойства газа, как сжимаемость и отсутствие смазочных свойств, могут привести к заеданию и толчкам при движении исполнительного механизма, что снижает точность позиционирования. Отсутствие смазочных свойств воздуха приводит к увеличению контактного трения, что тоже влияет на время срабатывания рабочего органа. Системы с точным позиционированием широко используются в современных установках машиностроения, на конвейерных линиях пищевой промышленности, в медицинской технике и др. [3]. Увеличение быстродействия пневмоприводов с точным позиционированием с пропорциональным регулированием по расходу является актуальной задачей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Для исследования характеристик пневмопривода был задействован экспериментальный стенд фирмы *FESTO*, который был приобретен УГАТУ в рамках инновационного проекта 2009 г. для лаборатории Учебно-научного инновационного центра «Гидропневмоавтоматика» (рис. 1).

Данный экспериментальный стенд включает в себя следующие подсистемы (см. рис. 2):

- силовая система (компрессор поршневой с блоком подготовки воздуха);
- распределительная система (пропорциональный распределитель *MPYE*);
- исполнительная система (пневмоцилиндр с датчиком перемещения *DNCM*);
- система управления (контроллер *SPC200*, ЭВМ);
- система нагружения (статическая нагрузка и сила контактного трения).



Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования характеристик пневмопривода с пропорциональным регулированием расхода

Блок подготовки воздуха включает в себя поршневой компрессор, фильтр грубой очистки (тонкость фильтрации 40 мкм), фильтр тонкой очистки (тонкость фильтрации 5 мкм), редукционный клапан с ручным управлением.

Пропорциональное регулирование расхода осуществляется с помощью пропорционального распределителя Р1 (рис. 2 и рис. 3).

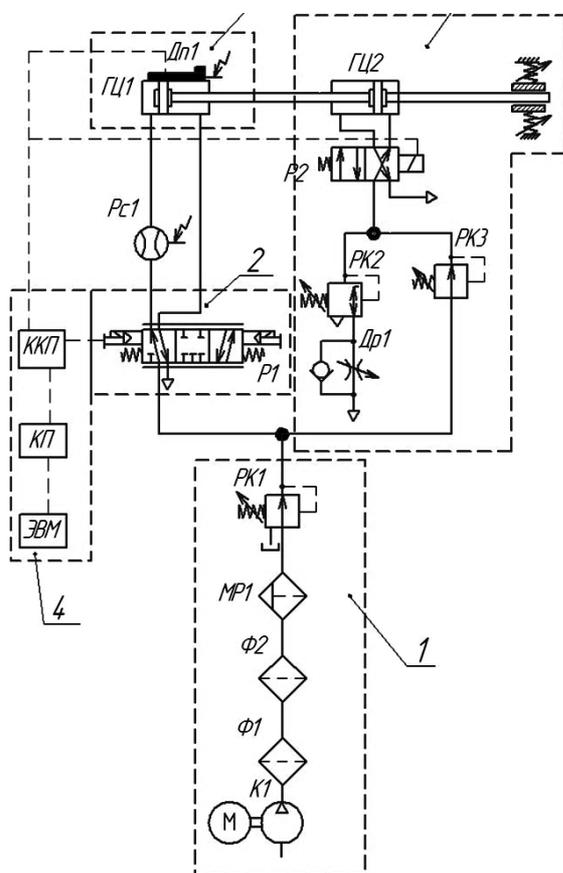


Рис. 2. Принципиальная схема стенда

Распределитель с пропорциональным управлением модели МРУЕ с функцией регулировки расхода для изменения скорости цилиндра, пятилинейный многопозиционный золотниковый с электромагнитным управлением для изменения направления движения с фиксацией по крайним положениям. Сигнал управления распределителя по напряжению 0..10 В поступает от контроллера на электромеханический преобразователь.

В табл. 1 представлен полный перечень оборудования. Система нагружения позволяет имитировать как статическую нагрузку, так и нагрузку, которая возникает при сухом контактом трении.

Для имитации статической нагрузки, которая действует на пневмопривод в процессе эксплуатации, используется пневмоцилиндр ПЦ2, двухпозиционный распределитель Р2 с электромагнитным управлением, два редукционных клапана РК2 и РК3 и регулируемый дроссель с обратным клапаном Др1.

Таблица 1

Обозн.	Наименование	Кол.
ПЦ1	Пневмоцилиндр с внешним датчиком	1
ПЦ2	Пневмоцилиндр с двухсторонним штоком	1
Р1	Распределитель с пропорциональным управлением	1
Р2	Распределитель	1
КПП	Контроллер конечного положения	1
КП	Контроллер позиционирования	1
К1	Компрессор	1
Дп1	Датчик перемещения поршня	1
Рс	Датчик расхода	1
Ф1	Фильтр грубой очистки	1
Ф2	Фильтр тонкой очистки	1
РК1, РК2, РК3	Редукционный клапан	3
Др1	Регулируемый дроссель	1
1	Силовая система с блоком подготовки воздуха	1
2	Распределительная система	1
3	Исполнительная система	1
4	Система управления	1
5	Система нагружения	1

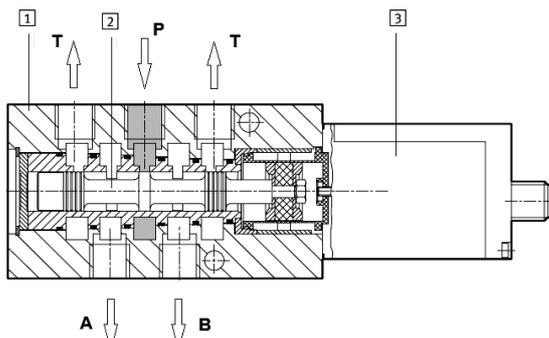


Рис. 3. Распределитель с пропорциональным управлением [4]: 1 – корпус, 2 – золотник, 3 – электромеханический преобразователь, P – давление питания, A, B – линии нагнетания, T – линия слива

При включении компрессора в системе возникает рабочее давление, которое поступает в блок подготовки воздуха 1. При подаче управляющего сигнала с ЭВМ на контроллер SPC200 золотник пропорционального распределителя P1 плавно смещается в левое рабочее положение (рис. 2) с заданной скоростью (в программе управления задается скорость движения исполнительного механизма). Сигнал обратной связи поступает с датчика перемещения Дп1 и идет в контроллер SPC200 (см. рис. 5). Электрический сигнал поступает на пропорциональный распределитель P1. Одновременно на распределитель P2 поступает дискретный электрический сигнал, в результате чего распределитель P2 переключается в крайнее правое положение (распределитель P2 работает в противофазе с P1, см. рис. 2). При этом в полостях пневмоцилиндра ПЦ2 возникает перепад давлений, который действует против движения пневмоцилиндра ПЦ1. Величина статического давления в пневмоцилиндре ПЦ2 задается с помощью редукционного клапана РК3, давление в РК3 поступает из общей магистрали после блока подготовки воздуха. Пневмоцилиндр ПЦ1 связан с пневмоцилиндром ПЦ2 через жесткие металлические тяги, суммарный люфт которых не превышает 1 мм.

При смещении пневмоцилиндров (например, на рис. 2 показано движение вправо) в системе нагружения образуется избыточный объем воздуха, который стравливается с помощью редукционного клапана РК2. Регулируемый дроссель Др1 предназначен для плавного стравливания воздуха.

Для имитации силы сухого трения используются две пластины А и Б (материал – полистирол), которые прижимаются к выходному валу В с определенным усилием, сила затяжки которых задается с помощью пружин Г,

пружины сжимаются при скручивании болтов Д (см. рис. 2 и рис. 4). Шероховатость выходного вала, который соединен со штоком пневмоцилиндра ПЦ2, составляет Ra 6.3, полистирола Ra 2.5. Такой класс обработки поверхности позволяет реализовывать силу контактного трения до 400 Н.

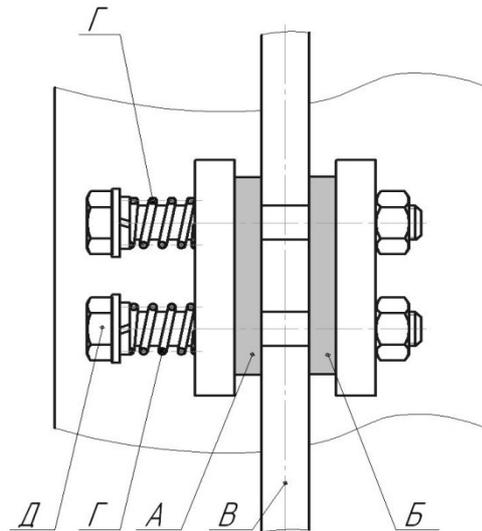


Рис. 4. Схема нагружения контактным трением

Контроллер SPC200 обладает функциями как контроллера положения (замкнутый контур), так и управления позиционированием (открытый контур).

В сочетании с приводом, датчиком перемещения и распределителем с пропорциональным управлением контроллер образует замкнутый контур управления (см. рис. 2 и рис. 5).

Измерения данного стенда осуществляются через контроллеры SPC и SPC200, которые программируются пакетом WinPISA на ЭВМ. Система измерения представлена на рис. 6.

WinPISA – программный пакет для программирования, пуска и диагностики пневматических осей и осей на базе приводов с шаговыми моторами, работающими с контроллером позиционирования SPC200. Программа WinPISA позволяет запрограммировать контроллер и управлять пневмоприводом с высоким быстродействием и точностью. Данная программа позволяет задавать различные координаты движения исполнительного привода и скорость работы системы. При этом рассчитывается и задается точность позиционирования пневмопривода с учетом таких сил как: сила трения, инерционная нагрузка, статическая нагрузка.

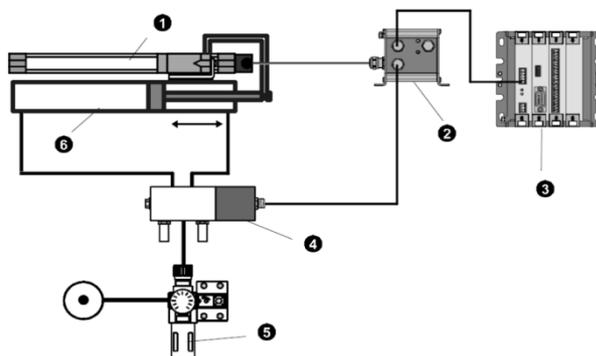


Рис. 5. Система с замкнутым контуром [4]:
1 – датчик перемещения, 2 – контроллер-сумматор, 3 – контроллер SPC-200, 4 – пропорциональный распределитель, 5 – фильтр 5 мкм, 6 – пневмоцилиндр

Особенности программы *WinPISA*:

- архивирование проектов;
- создание программ пользователя;
- ввод в эксплуатацию и программное тестирование с графической поддержкой.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 7–11. На рис. 7–9 представлены результаты экспериментального исследования при ненагруженном поршне пневмопривода. Для определения стохастического разброса измеряемых величин проводились многократные измерения. По рис. 7 видно, что стохастический разброс наблюдается при

определении зоны нечувствительности поршня пневмоцилиндра ПЦ1.

При ненагруженном режиме зона нечувствительности пневматического привода при давлении питания 6 бар составляет 0,05..0,25 с. (рис. 7). При этом время регулирования привода составляет $t_p = 0,2$ с (при зоне нечувствительности 0,05 с) и $t_p = 0,5$ с (при зоне нечувствительности 0,25 с, соответственно) (рис. 8 и рис. 9).

Программа *WinPISA* позволяет получать характеристику – фазовый портрет (рис. 10). Фазовый портрет представляет зависимость скорости исполнительного механизма от его перемещения с течением времени. График на рис. 10 имеет вид замкнутой фигуры. Из теории автоматического управления известно, что для данного случая система находится в зоне устойчивости.

С ростом статической нагрузки быстродействие пневмопривода падает, что следует из рис. 11. Максимальная статическая нагрузка при исследовании пневмопривода при давлении питания 6 бар составляла 400 Н. При нагрузке в 400 Н время регулирования пневмопривода составляет $t_b = 0,9$ с (рис. 11), что характерно для системы с пропорциональным регулированием расхода с контроллером *SPC200*, при этом максимальная скорость поршня составила 0,15 м/с (рис. 12).

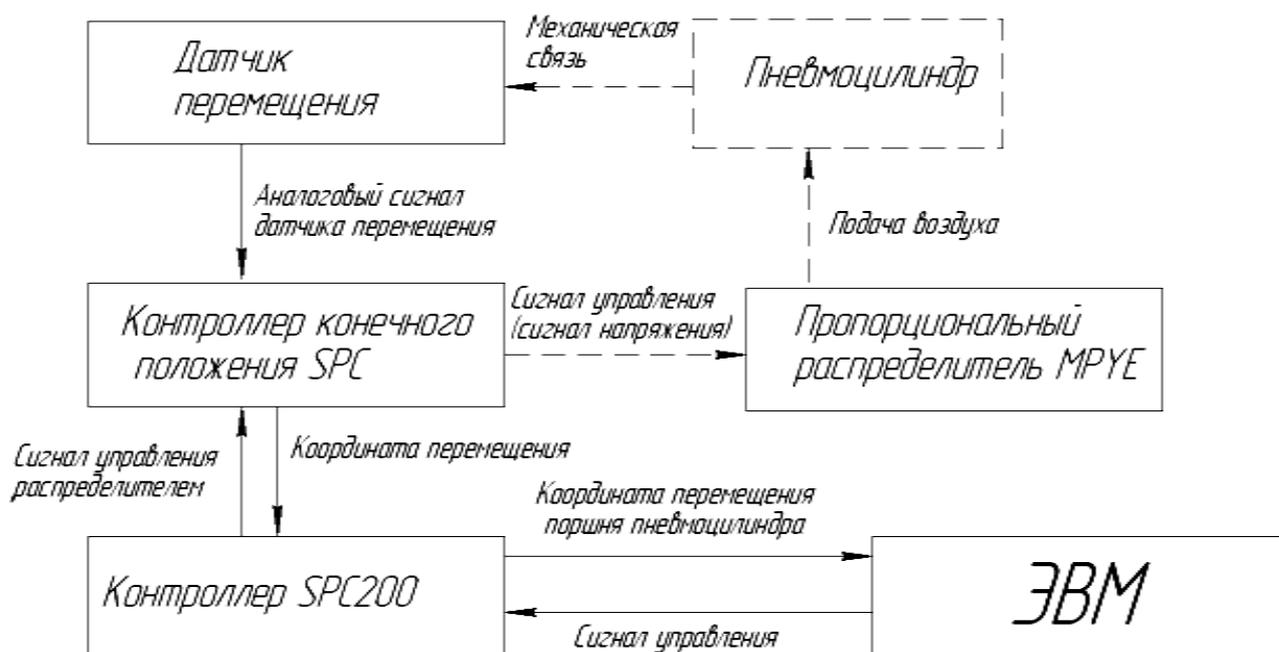


Рис. 6. Система измерения

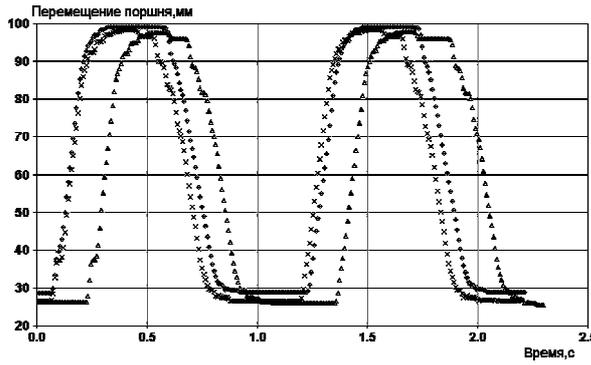


Рис. 7. Зависимость перемещения поршня от времени

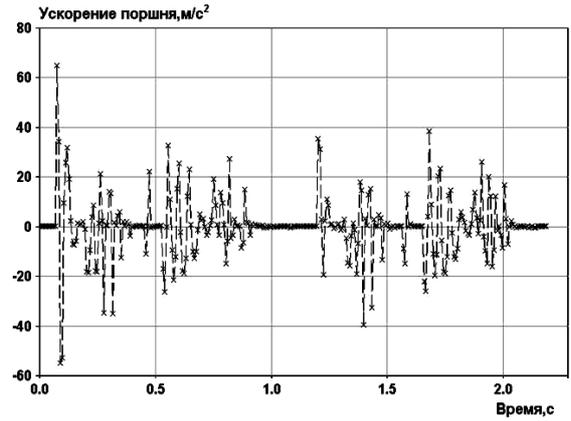


Рис. 9. Зависимость ускорения поршня от времени

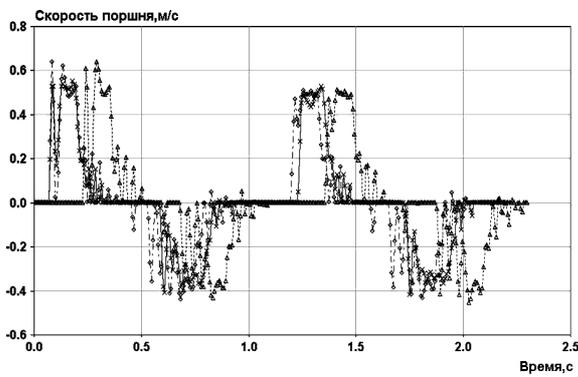


Рис. 8. Зависимость скорости перемещения поршня от времени

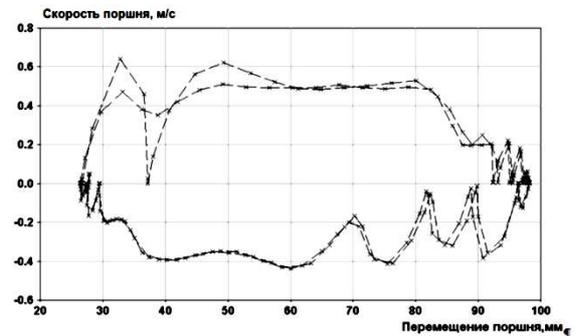


Рис 10. Фазовый портрет

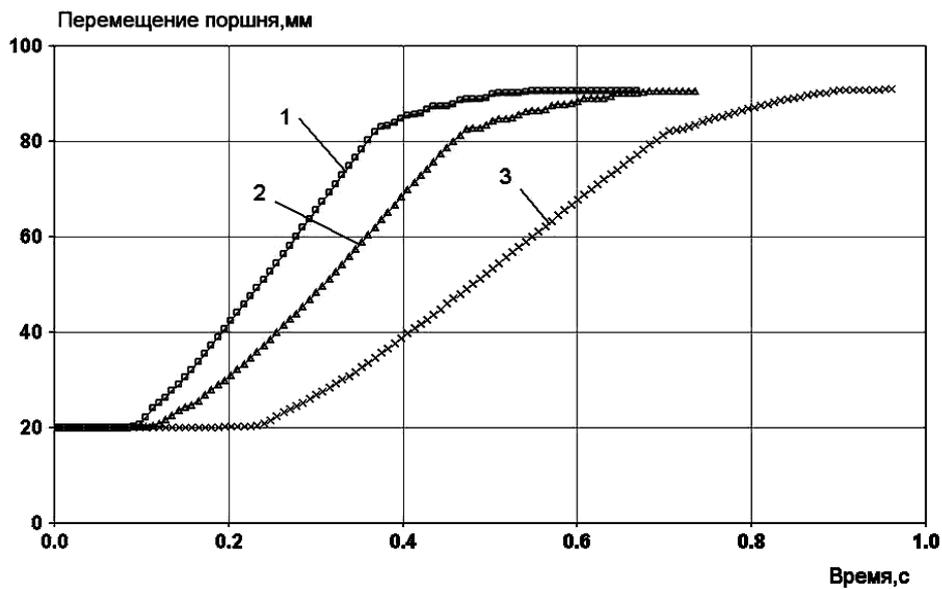


Рис. 11. Зависимость перемещения поршня от времени при постоянной нагрузке:
1 – 250 Н, 2 – 300 Н, 3 – 400 Н

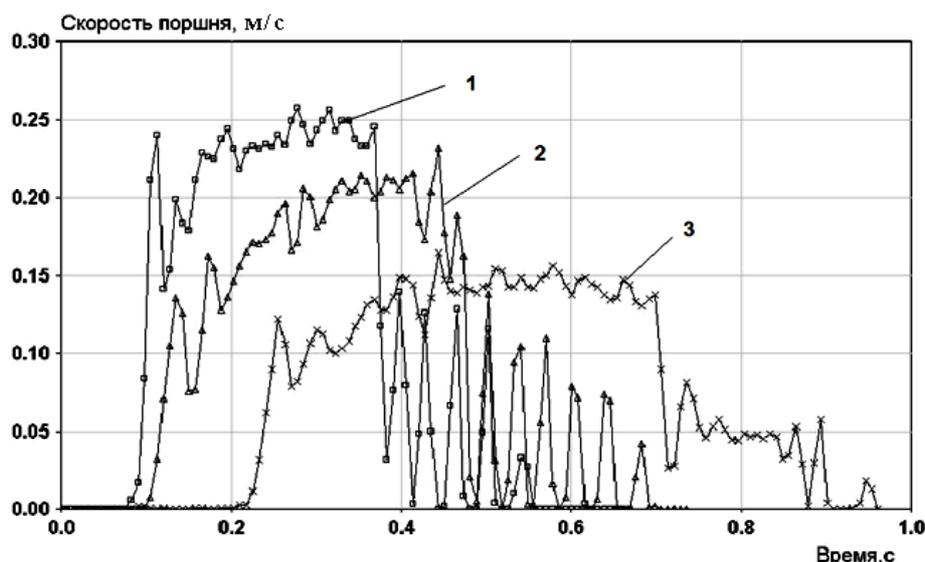


Рис. 12. Зависимость скорости поршня от времени при постоянной нагрузке:
1 – 250 Н, 2 – 300 Н, 3 – 400 Н

В случае нагружения силой трения равной 400 Н, зона торможения наблюдается на всем диапазоне регулирования. Стандартный пневмоцилиндр DNCM со встроенной системой измерения пути является приводом-компонентом в системе System Soft Stop с электронным управлением демпфирования в конечных положениях, а также управляемым цилиндром со штоком совместно с контроллером SPC200. На стандартном пневмоцилиндре с удлиненной резьбой на штоке устанавливается система измерения пути (на базе потенциометра с проводящим пластиком). Система измерения пути встраивается в отдельный корпус и полностью закрыта и герметична.

Линейное движение регистрируется измерительной системой через эластичные кольца, не имеющие люфтов в осевом направлении.

Используемые в системе Soft Stop позиционные контроллеры и координатный интерфейс SPC-AIF-POТ пригодны для совместного использования с цилиндром DNCM (см. рис. 5). Диаметр поршня пневмоцилиндра 32 мм, максимальный ход 250 мм. Ограничение по усилию (как при статической нагрузке, так и при контактом трении) составляет не более 400 Н – при давлении до 6 бар данный пневмоцилиндр способен развивать до 434 Н (с учетом потерь на трение в уплотнениях до 10%).

Экспериментальные данные, представленные на рис. 13 и рис. 14, позволяют получить расчетный диапазон нагрузки от силы контактного трения, при которой допускается применять систему Soft Stop с электронным управлением демпфирования.

Так, для данного пневмоцилиндра рывки, как следствие влияния силы контактного трения, которые можно наблюдать на рис. 13, начинаются в диапазоне от 300 Н до 400 Н.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Полученные в результате экспериментов данные по способу представления можно разделить на две группы:

- данные, представленные сплошным массивом точек (рис. 9 – 14);
- данные, представленные группами точек в некоторых сечениях по аргументу (рис. 7 и рис. 8).

Методики статистической обработки этих групп несколько различаются (см. табл 2) [5].

Первый этап обработки данных – проверка на соответствие нормальному закону – имеет большое значение. На этом этапе принимается решение, каким методом обрабатывать данные. Если подтверждается соответствие нормальному закону распределения, то используется классическая теория, основанная на гауссовском распределении. Если же ответ окажется отрицательным, то возможны три направления дальнейшей работы. Первое состоит в том, что проводятся дополнительные эксперименты с целью получения гауссовского распределения. Второе направление связано с использованием робастных методов обработки данных. Третье направление – применение непараметрических методов обработки, которые не используют какое-либо семейство параметров распределения.

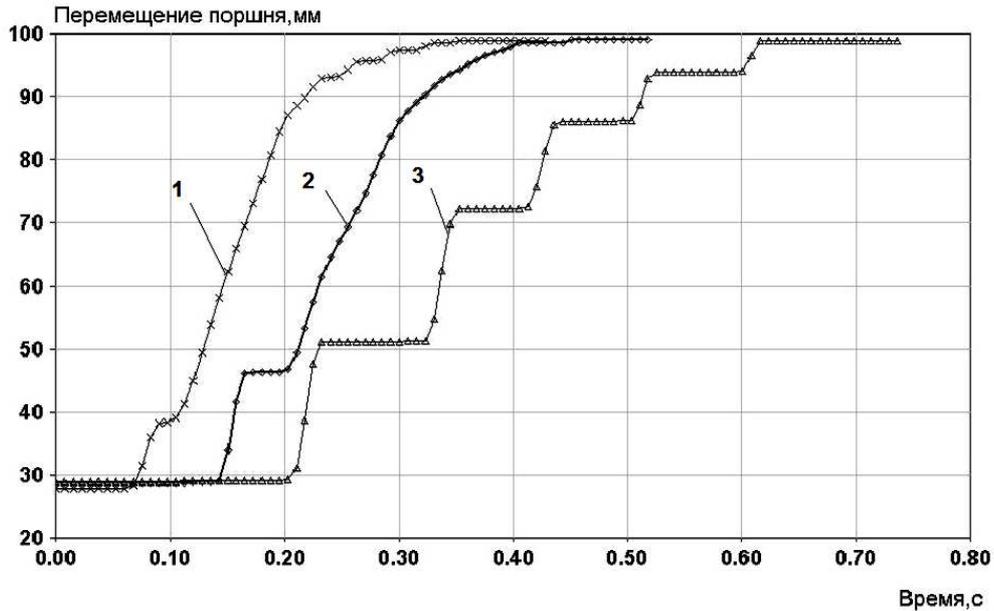


Рис. 13. Зависимость перемещения поршня от времени при разных значениях контактного трения:
1 – 200 Н, 2 – 300 Н, 3 – 400 Н

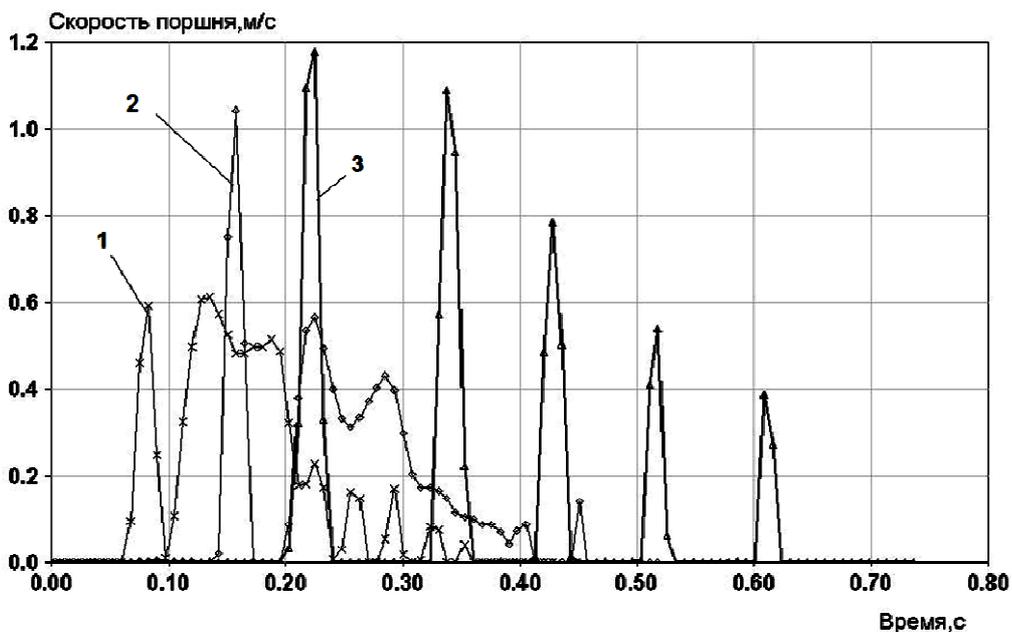


Рис. 14. Зависимость скорости поршня от времени при разных значениях контактного трения:
1 – 200 Н, 2 – 300 Н, 3 – 400 Н

Для проверки соответствия полученных экспериментальных данных нормальному распределению существует множество методов. Задача состоит в том, чтобы выбрать наиболее подходящий метод для данного случая. Решение этой задачи на практике осложняется тем, что приходится обрабатывать выборки небольшого объема (5–7 точек в сечении, 30–50 точек во всей выборке). В связи с этим следует рассмотреть методы, которые позволяют получить результат в этих условиях.

Условные обозначения в табл. 2:

j – сечение группы точек многократных измерений;

σ_j, σ_j^2 – отклонение и среднее квадратичное отклонение;

M_j – математическое ожидание доверительного интервала для каждого j -го сечения группы точек.

Таблица 2
Статистическая обработка результатов эксперимента

Группы точек в сечениях	Сплошной массив точек
1. Проверка на соответствие нормальному закону распределения	
2. Получение оценок математического ожидания, среднеквадратичного отклонения и дисперсии в каждом сечении j	Получение уравнения регрессии, построение регрессионной кривой, вычисление оценок σ_j^2 и σ_j
3. Проверка дисперсии σ_j^2 на однородность	Проверка адекватности уравнения регрессии экспериментальным данным
4. Построение доверительного интервала M_j в каждом сечении	Выбор сечений j для определения M_j и построения доверительного интервала
5. Обработка косвенных результатов измерений (если необходимо)	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние десятилетия на рынке исполнительных приводов различного назначения были определены основные области применения пневмо- и гидрооборудования. В той области промышленности, где требуется привод с развиваемыми нагрузками до 7000 Н с большим быстродействием и точностью позиционирования, находит применение пневмопривод со встроенной системой измерения пути (система *Soft Stop*). Такие системы применяют в пищевой промышленности, в автомобилестроении, в машиностроении (обработка поверхности, подача обрабатывающего инструмента, перекладка заготовки и др.).

На сегодняшний день существует необходимость в проведении экспериментальных исследований пневмоприводов по влиянию эксплуатационных нагрузок на такие параметры как точность и быстродействие. К одной из эксплуатационных нагрузок, которые можно имитировать в лабораторных условиях, можно отнести силу контактного трения и статическую

нагрузку. В данной статье был рассмотрен экспериментальный стенд, который позволяет проводить подобные полунатурные исследования.

Обработанные методами математической статистики результаты экспериментальных исследований позволяют определить диапазоны статической нагрузки и нагрузки от силы контактного трения, при которых рекомендуется использовать систему *Soft Stop* при заданных геометрических параметрах исполнительного механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галлямов Ш. Р., Стариков К. В. Современные пневматические системы позиционирования // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: тез. докл. XII Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп. М.: МЭИ, 2008. С. 68–69.
2. Герц Е. В. Динамика пневматических систем машин. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
3. Стефан Хессе. Рационализация подачи больших заготовок: Учеб. пособие. Фесто, 112 с.
4. Каталог пневмооборудования. Festo AG & Co. 2008. 350 с.
5. Низкотемпературные твердотопливные газогенераторы: Методы расчета рабочих процессов, экспериментальные исследования / О. В. Валеева, С. Д. Ваулин, С. Г. Ковкин, В. И. Феофилактов. Мисс: ГРЦ «КБ им. акад. В.П. Макеева», 1997. 268 с.

ОБ АВТОРАХ

Галлямов Шамиль Рашитович, асс. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. магистр по энергомашиностр. (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. пневмо-гидросистем, перспективной малогабаритной техники.

Стариков Константин Викторович, магистрант. Дипл. бакалавр по энергомашиностр. (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. пневмо-гидросистем.

Целищев Владимир Александрович, проф. той же каф. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматики ЛА и двигательных установок.