

А. М. Грибков, Д. В. Шилин

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ В БЕСШТОКОВОМ ПНЕВМАТИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ

Работа посвящена разработке экспериментального стенда и исследованию силы трения в бесштоковом пневматическом приводе. В работе предложены уравнения для приближенного расчета сил трения пневмопривода. *Бесштоковый пневмопривод; сила трения; датчик силы; аппроксимация*

При построении математических моделей систем управления, у которых в качестве исполнительных устройств используются пневматические приводы, важно знать величины сил трения, возникающие внутри привода. В начале процесса управления и при смене направления движения привода эти силы больше активных сил, которые формируются вследствие перепада давления воздуха в полостях. В результате в системе возникают запаздывания, которые следует учитывать. На других участках силы трения вызывают заметное торможение в работе системы, которое тоже должно учитываться.

Очевидно, что силы трения зависят от многих параметров, например, таких как конструкция привода и материалы, из которых изготовлены приводы.

В этой работе были проведены исследования сил трения, на примере линейных пневматических приводов, выпускаемых компанией Festo, при разных скоростях движения выходного звена пневмопривода. По результатам исследований предложены уравнения для приближенного расчета сил трения пневмопривода, сделана оценка погрешности, которая может быть допущена при таком методе.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД

Величина силы трения $F_{тр}$ представляет собой суммарную силу трения манжеты поршня пневмоцилиндра и силу сопротивления при деформации упругой металлической пластины, расположенной между кареткой и поршнем (см. рис. 1).

Для измерения величины $F_{тр}$ был разработан стенд с программным числовым управлением (рис. 2).

Сила трения измерялась с помощью тензометрического датчика (1), закрепленного между кареткой пневмоцилиндра и кареткой механического преобразователя вращательного движения электродвигателя. Сигнал с датчика приходит на преобразователь (2). Выходной электрический

сигнал преобразователя ($\pm 10В$), соответствующий значению измеренной силы $F_{тр}$, приходит на СПК Siemens CPU 313C-2DP (3). При заданной постоянной скорости накапливается выборка значений, далее осредненные результаты измерений фиксируются в блоке базы данных контроллера и выводятся на экран компьютера при помощи SCADA системы WinCC flexible. Управление синхронным двигателем (4) осуществляется с помощью СПК Siemens, соединенного с преобразователем SEC-AC-305 (5).

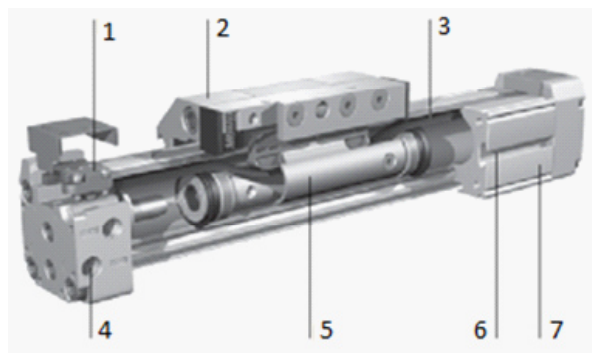


Рис. 1. Пневмоцилиндр DGPL: 1 – регулируемое демпфирование в конечных положениях; 2 – каретка, механически связанная с поршнем; 3 – упругая герметизирующая металлическая пластина; 4 – линии подвода/отвода воздуха; 5 – поршень; 6 – паз для монтажа датчиков положения; 7 – корпус.

С помощью данного исследовательского стенда можно измерять силы трения скольжения и страгивания в пневмоцилиндрах различных размеров. Пользователь, изменяя скорость движения каретки электропривода и, соответственно, штока пневмоцилиндра, имеет возможность получить силы трения покоя, которые возникают при страгивании (в случае штоковых пневмоцилиндров), силы трения скольжения, которые возникают после преодоления силы трения покоя во время движения штока пневмоцилиндра.

В литературе предлагается представлять зависимость силы трения скольжения от скорости в следующем виде [1]:

$$f = f_0 = f_1 v = f_2 v^2 = f_3 v^3, \quad (1)$$

где v – скорость относительного движения; f_0 – значение силы трения при $v = 0$; f_1 , f_2 и f_3 – экспериментальные коэффициенты, которые могут быть как положительными, так и отрицательными.

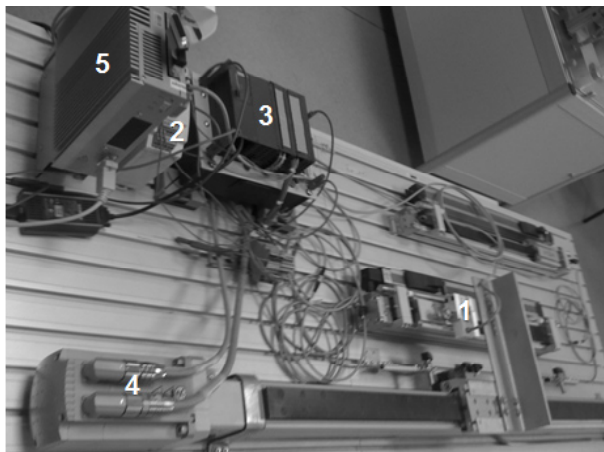


Рис. 2. Стенд для измерения сил трения с программным числовым управлением

В работе было произведено многократное измерение сил трения при различных скоростях и сделан подбор коэффициентов уравнения (1), при которых расхождение между расчетными и экспериментальными данными оказываются минимальными.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

До начала проведения исследования испытуемый пневмоцилиндр был установлен на стенде в исходном положении. Чтобы свести к минимуму влияния воздуха на результаты эксперимента, внешние коммуникации от приводов и штуцеры были отсоединены.

Для получения зависимости силы трения скольжения от скорости перемещения требуется значение относительной скорости, которое задается пользователем, и значение силы трения скольжения, которое соответствует заданной скорости. Таким образом, меняя скорости перемещения каретки электропривода и, соответственно, штока пневмоцилиндра, были получены зависимости силы трения скольжения от времени перемещения каретки пневмоцилиндра. С помощью данных графиков можно определить силу трения покоя и силу трения скольжения, значение которой берется средним за время движения. Были проведены исследования пневмоцилиндров при движении каретки в обоих направлениях. После

проведения исследований была построена зависимость силы трения скольжения от скорости. Полученную зависимость можно аппроксимировать. Результатом аппроксимации могут быть полиномы различных степеней, причем, чем выше степень полинома, тем ниже возможная погрешность аппроксимации.

Для проведения исследований использовались два одинаковых бесштоковых пневмоцилиндра DGPL-25-440 (вариант 1 и вариант 2) с целью получения и сравнения результатов исследования.

Для каждого пневмоцилиндра были сняты экспериментальные данные для движения каретки в обе стороны.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ В ПНЕВМОЦИЛИНДРЕ

Согласно экспериментальным данным, график зависимости силы трения скольжения от скорости движения каретки пневмопривода DGPL-25-440 (вариант 1) выглядит следующим образом (см. рис. 3):

Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки в виде полинома 2-й степени имеет следующий вид (см. рис. 4.):

$$F(v) = -0,0021v^2 + 0,1398v - 13,816, \quad (2)$$

где экспериментальные коэффициенты равны $f_0 = -13,816$, $f_1 = 0,1398$, $f_2 = -0,0021$.

Относительная погрешность аппроксимации составляет $\delta = 7\%$.

Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки в виде полинома 2-й степени имеет следующий вид (см. рис. 5.):

$$F(v) = 0,0042v^2 + 0,1948v + 13,829, \quad (3)$$

где экспериментальные коэффициенты равны $f_0 = 13,829$, $f_1 = 0,1948$, $f_2 = 0,0042$.

Относительная погрешность аппроксимации составляет $\delta = 5\%$.

Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки в виде полинома 3-й степени имеет следующий вид (см. рис. 6.):

$$F(v) = 7,13 \cdot 10^{-5}v^3 - 0,0084v^2 + 0,2657v - 13,816, \quad (4)$$

где экспериментальные коэффициенты равны $f_0 = -13,816$, $f_1 = 0,2657$, $f_2 = -0,0084$, $f_3 = 0,0000713$. Относительная погрешность аппроксимации составляет $\delta = 4,5\%$.

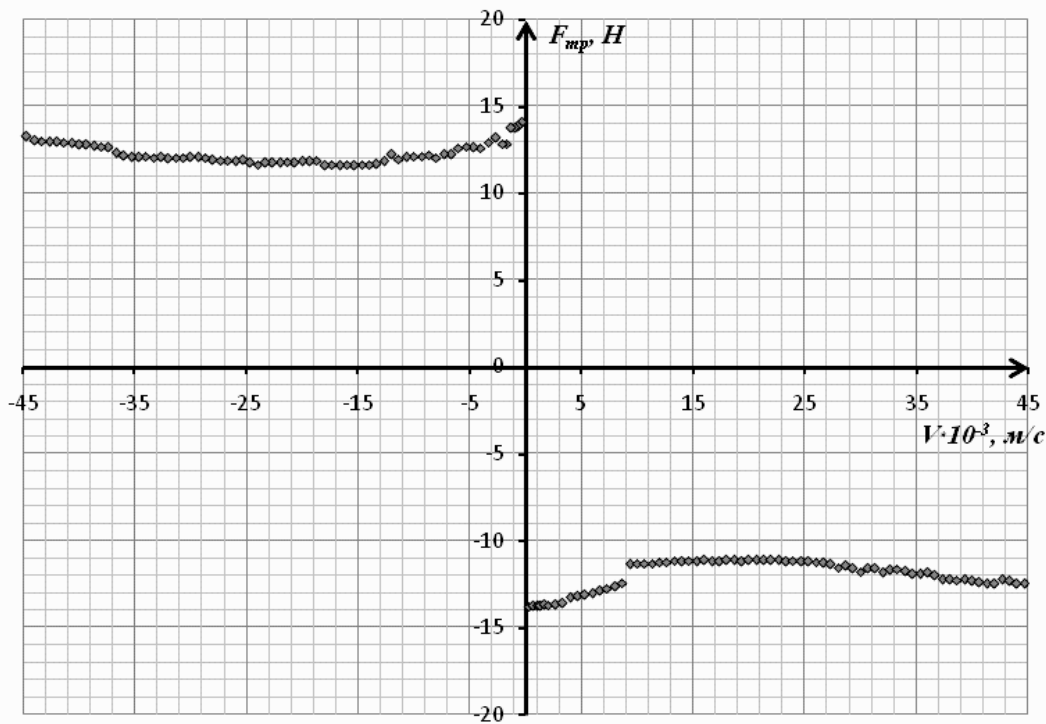


Рис.3. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 (вариант 1)

Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки в виде полинома 3-й степени имеет следующий вид (см. рис. 7):

$$F(v) = 8,76 \cdot 10^{-5} v^3 + 0,0094 v^2 + 0,2664 v + 13,829, \quad (5)$$

где экспериментальные коэффициенты равны $f_0 = 13,829$, $f_1 = 0,2664$, $f_2 = 0,0094$, $f_3 = 0,0000876$.

Относительная погрешность аппроксимации составляет $\delta = 3\%$.

Согласно экспериментальным данным, график зависимости силы трения скольжения от скорости движения каретки пневмопривода DGPL-25-440 (вариант 2) выглядит следующим образом (см. рис. 8).

Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки в виде полинома 2-й степени имеет следующий вид (см. рис. 9.):

$$F(v) = -0,0018 v^2 + 0,1121 v - 13,753, \quad (6)$$

где экспериментальные коэффициенты равны $f_0 = -13,753$, $f_1 = 0,1121$, $f_2 = -0,0018$.

Относительная погрешность аппроксимации составляет $\delta = 6\%$.

Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки в виде полинома 2-й степени имеет следующий вид (см. рис. 10.):

$$F(v) = 0,0026 v^2 + 0,1847 v + 14,057, \quad (7)$$

где экспериментальные коэффициенты равны $f_0 = 14,057$, $f_1 = 0,1847$, $f_2 = 0,0026$.

Относительная погрешность аппроксимации составляет $\delta = 8\%$.

Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки в виде полинома 3-й степени имеет следующий вид (см. рис. 11.):

$$F(v) = 6,68 \cdot 10^{-5} v^3 - 0,0073 v^2 + 0,2329 v - 14,258, \quad (8)$$

где экспериментальные коэффициенты равны $f_0 = -14,258$, $f_1 = 0,2329$, $f_2 = -0,0073$, $f_3 = 0,0000668$.

Относительная погрешность аппроксимации составляет $\delta = 4,5\%$.

Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки в виде полинома 3-й степени имеет следующий вид (см. рис. 12.):

$$F(v) = 11,2 \cdot 10^{-5} v^3 + 0,012 v^2 + 0,3615 v + 14, \quad (9)$$

где экспериментальные коэффициенты равны $f_0 = 14$, $f_1 = 0,3615$, $f_2 = 0,0124$, $f_3 = 0,000112$.

Относительная погрешность аппроксимации составляет $\delta = 4,5\%$.

Также было произведено измерение силы трения страгивания каретки пневмопривода DGPL-25-440. Был измерен момент $M = M_{\text{пц}} + M_{\text{мп}} = 0,352$ Нм развиваемый синхронным двигателем, необходимый для преодоления суммарной силы трения в пневмоцилиндре $M_{\text{пц}}$ и механическом преобразователе движения $M_{\text{мп}}$, а также момент необходимый для преодоления сил сопротивления только в механическом преобразователе движения $M_{\text{мп}} = 0,208$ Нм.

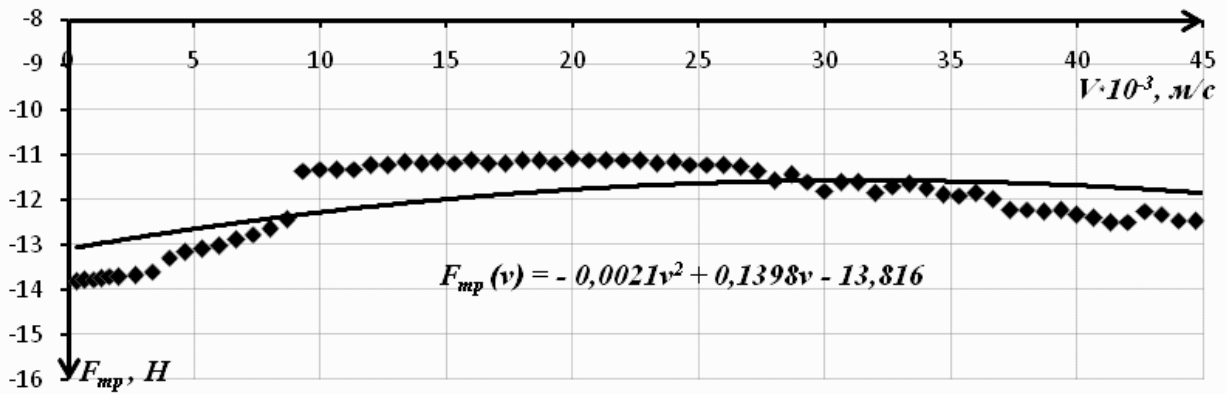


Рис. 4. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 и ее аппроксимация полиномом 2-й степени (прямой ход каретки)

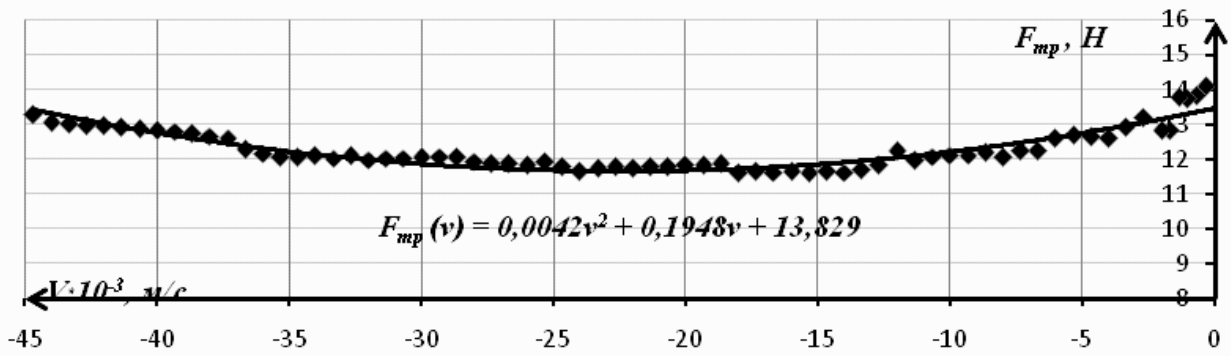


Рис. 5. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 и ее аппроксимация полиномом 2-й степени (обратный ход каретки)

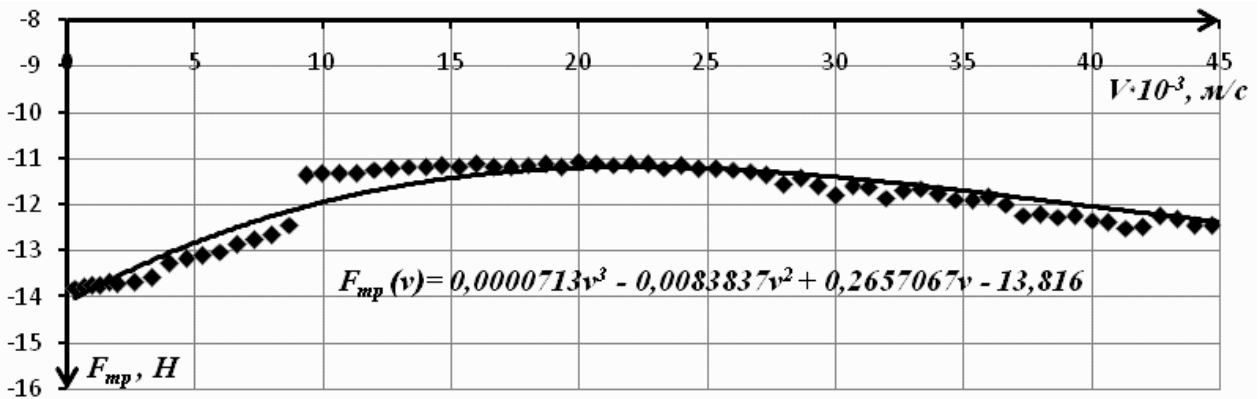


Рис. 6. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 и ее аппроксимация полиномом 3-й степени (прямой ход каретки)

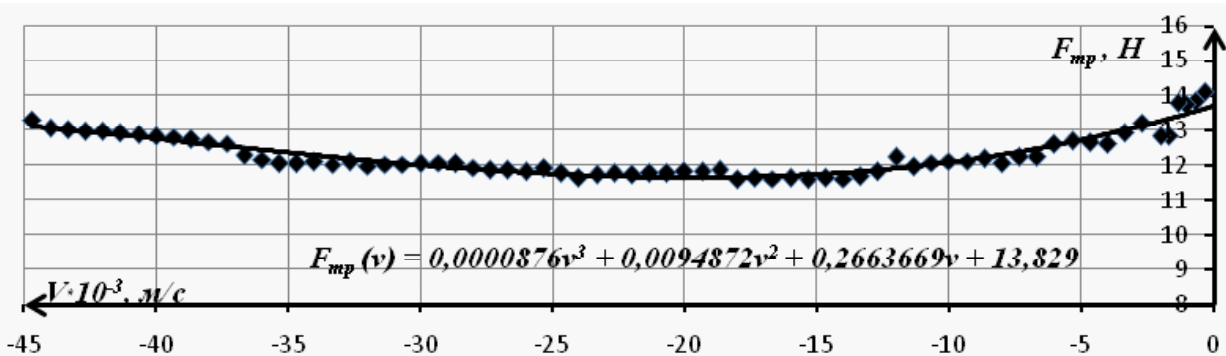


Рис. 7. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 и ее аппроксимация полиномом 3-й степени (обратный ход каретки)

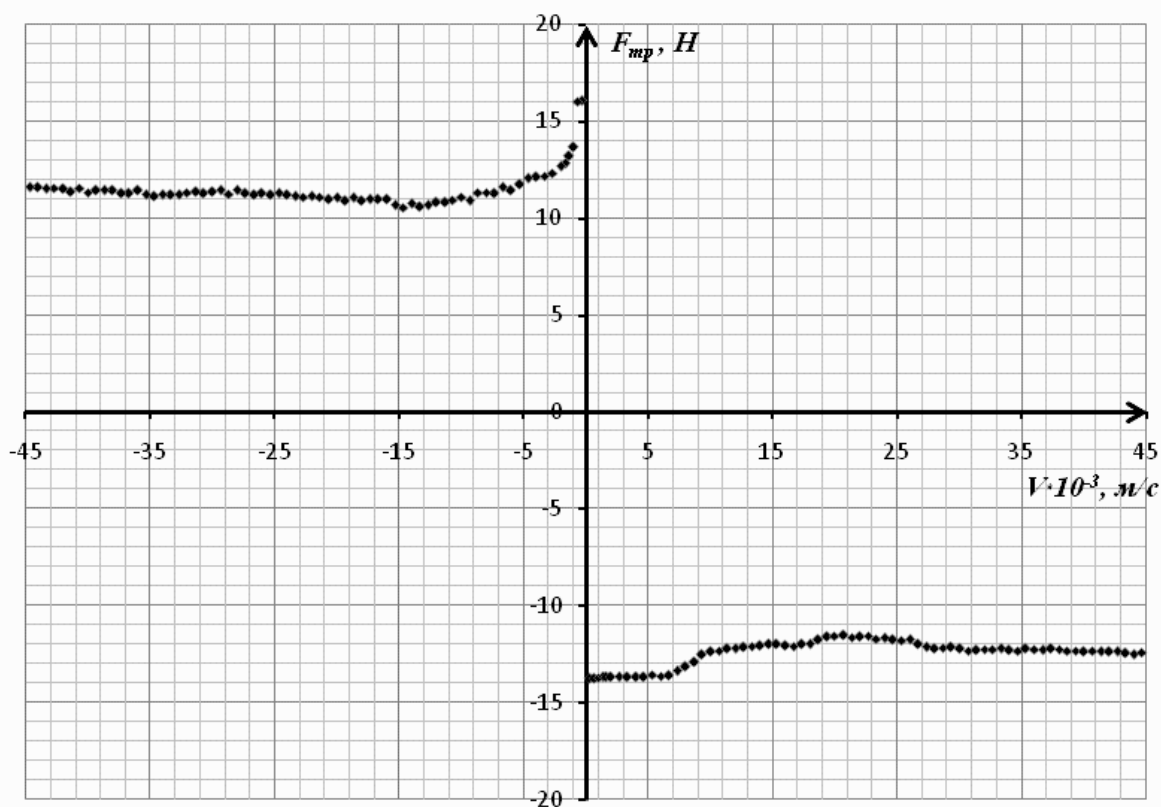


Рис. 8. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 (вариант 2)

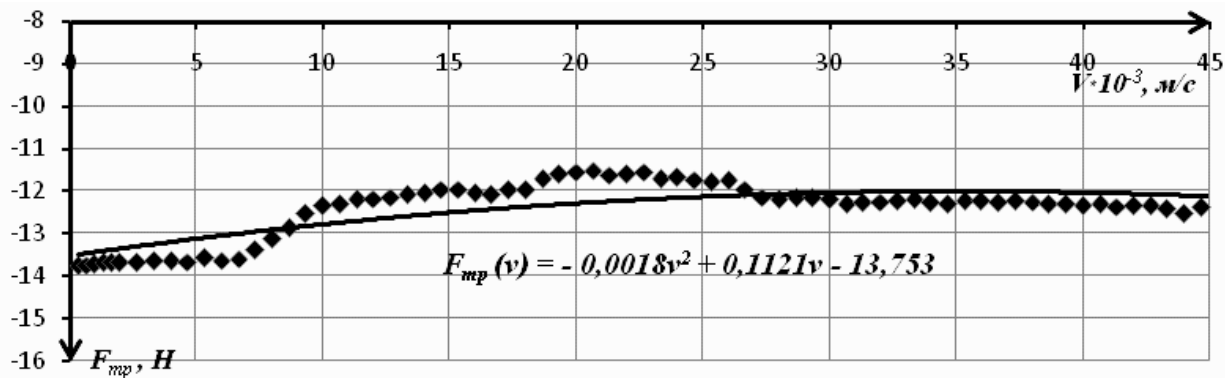


Рис. 9. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 и ее аппроксимация полиномом 2-й степени (прямой ход каретки)

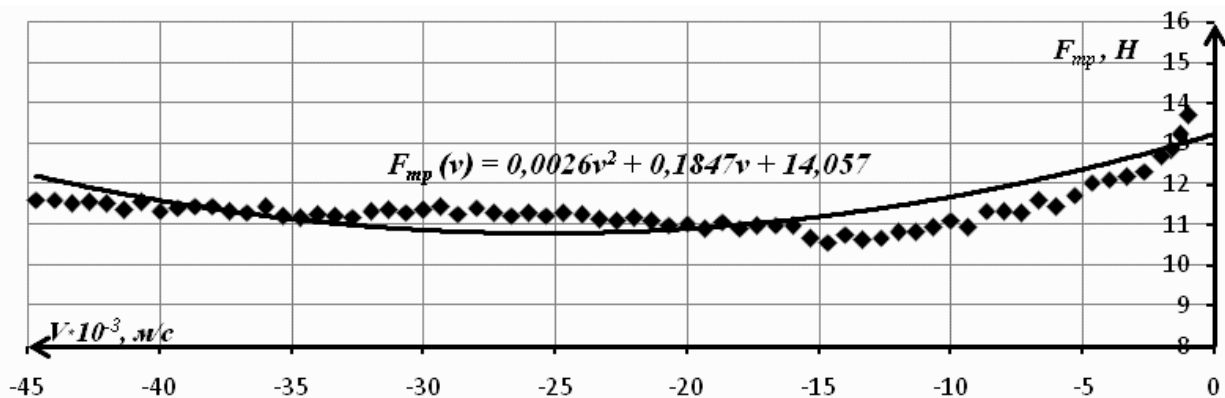


Рис. 10. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 и ее аппроксимация полиномом 2-й степени (обратный ход каретки)

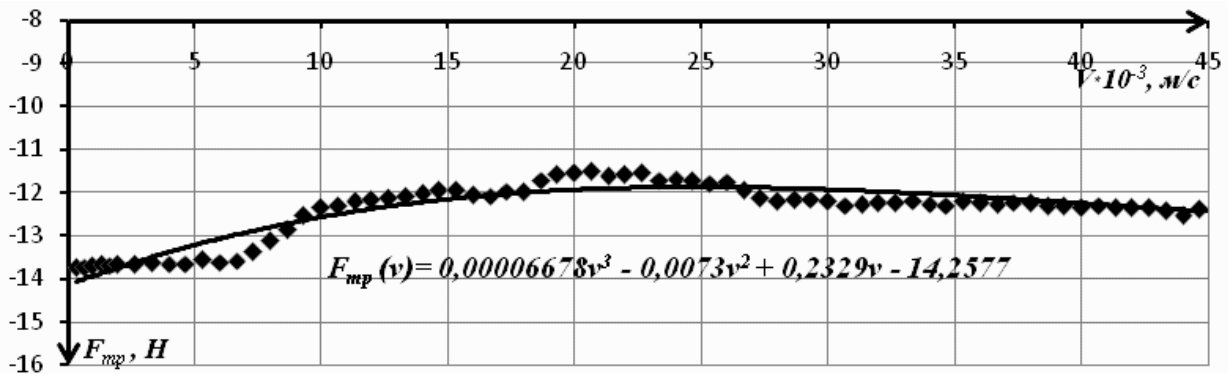


Рис. 11. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 и ее аппроксимация полиномом 3-й степени (прямой ход каретки)

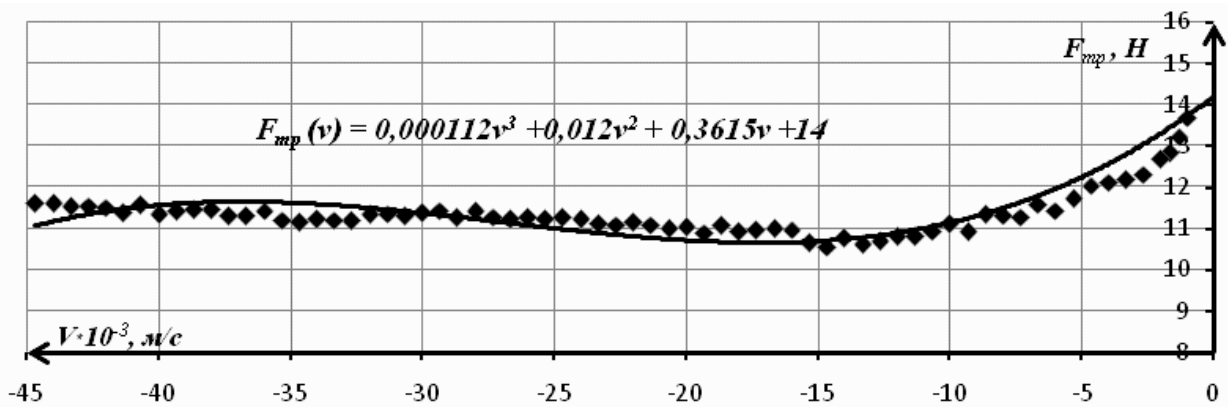


Рис. 12. Зависимость сил трения скольжения от скорости движения каретки бесштокового пневмоцилиндра DGPL-25-440 и ее аппроксимация полиномом 3-й степени (обратный ход каретки)

Таким образом, найден момент необходимый для страгивания каретки пневмоцилиндра $M_{\text{пц}} = M - M_{\text{мп}} = 0,144 \text{ Нм}$

По формуле пересчета для шарико-винтовой передачи найдено линейное усилие необходимое для страгивания каретки пневмоцилиндра DGPL-25-440.

$$F_{\text{стр}} = \frac{2\pi\eta_p M_{\text{пц}}}{D} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,9 \cdot 0,144}{0,02} = 40,7 \text{ Н}, \tag{10}$$

где $F_{\text{стр}}$ – усилие необходимое для страгивания каретки пневмоцилиндра, η_p – КПД шарико-винтовой передачи, D – диаметр вала механического преобразователя движения.

ВЫВОДЫ

1) Сравнивая полученные полиномы для двух одинаковых бесштоковых цилиндров, можно сделать вывод о том, что экспериментальные коэффициенты f_0, f_1, f_2 при прямом и обратном дви-

жении каретки практически совпадают, поэтому будем считать, что сила трения скольжения не зависит от направления движения каретки пневмоцилиндра, тогда в дальнейшем ограничимся снятием экспериментальных данных только для одного направления движения.

2) Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод об относительной погрешности аппроксимации. При аппроксимации полученной зависимости с помощью полинома 2 степени погрешности составляют 6–8%, что выше, чем при аппроксимации с помощью полинома 3 степени, которая равна 3–5%.

3) В опытах проводились исследования двух одинаковых моделей пневмоприводов, сравнивая результаты, видно, что полученные коэффициенты уравнений для двух цилиндров отличаются. В качестве причины можно указать, что один из пневмоцилиндров (вариант 2) был в эксплуатации, что и повлияло на конечный результат.

4) Данные зависимости возможно использовать при численном интегрировании системы дифференциальных уравнений, описывающих

динамическое состояние бесштокового пневматического привода [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пенкин Н. С., Пенкин А. Н., Сербин В. М.** Основы трибологии и триботехники. М.: Машиностроение. 2008. 206 с.
2. **Грибков А. М., Шилин Д. В.** Математическое моделирование манипулятора типа трипод на базе бесштоковых пневматических приводов // Известия

высших учебных заведений МАШИНОСТРОЕНИЕ. 2011. № 9. С. 3–10.

ОБ АВТОРАХ

Грибков Александр Михайлович, доц., зав. каф. гидромеханики и гидравлических машин МЭИ(ТУ). Дипл. инж. (МЭИ(ТУ) 1969). Канд. техн. наук. в обл. гидравлических машин и гидропневмоагрегатов.

Шилин Денис Викторович, асп. той же каф. Магистр техники и технологии (МЭИ, 2010).