

**В. Я. КОПП**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь;  
**Ю. А. ОСИНСКИЙ**, доц. каф. АТПП СевНТУ, г. Севастополь;  
**О. В. ФИЛИПОВИЧ**, канд. техн. наук, доц. каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь;  
**М. И. ГАРМАТЮК**, инженер каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ШАГОВОГО ПНЕВМОПРИВОДА ПОВОРОТНОГО ДЕЙСТВИЯ

Розглянуті структура, параметри, конструкція та основні принципи функціонування експериментальної установки для дослідження динамічних характеристик коливального крокового пневматичного приводу поворотної дії. Наведені приклади порівняння експериментальних даних з даними, які отримані в результаті моделювання динаміки приводу.

Рассмотрены структура, параметры, конструкция и основные принципы функционирования экспериментальной установки для исследования динамических характеристик колебательного шагового пневматического привода поворотного действия. Приведены примеры сравнения экспериментальных данных с данными, полученными в результате моделирования динамики привода.

The structure, parameters, design and main principles of functioning of experimental station for research of dynamic characteristics of an oscillatory step-by-step rotary pneumodrive are considered. Examples of comparison of experimental data with the data received as a result of modeling of dynamics of a drive are given.

**Введение.** Рассматриваемая экспериментальная установка, разработанная на кафедре автоматизированных приборных систем Севастопольского национального технического университета, предназначена для исследования динамических характеристик колебательного шагового пневматического привода поворотного действия (далее – КШПП). КШПП имеют ряд преимуществ перед другими типами пневмоприводов, осуществляющих позиционирование в большом числе фиксированных положений, например, большее число точек позиционирования и большую жесткость при фиксации достигнутого положения, а также возможность осуществления контурного управления при необходимости перемещения исполнительного органа по заданной траектории с заданной скоростью. Целью данной работы является описание конструкции и принципов функционирования установки, методики проведения исследований, а также сравнительный анализ эмпирических и теоретических результатов.

**Описание принципов функционирования установки.** Общий вид установки показан на рис. 1.

Установка расположена на столике, к основанию которого прикреплена массивная плита 1 для исключения воздействия различных случайных факторов (например, вибрации) на результаты измерений.

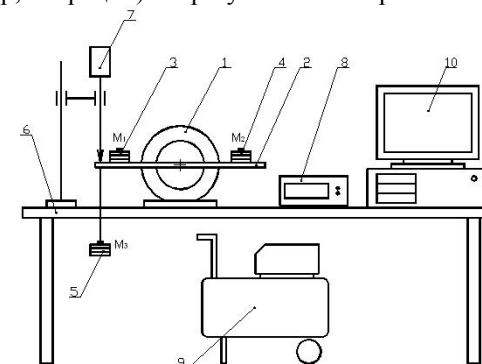


Рис. 1 – Общий вид установки

На плите установлен КШПП 1, к выходному валу которого прикреплен шкив с планкой 2 для установки грузов 3, 4, 5 различной массы. Грузами 3 и 4 равной массы  $M_1 = M_2$  осуществляется регулировка момента инерции системы без увеличения момента сопротивления, который остается неизменным. Груз 5 массой  $M_3$ , расположенный от оси вращения на определенном расстоянии (плече), предназначен также и для изменения момента сопротивления. На определенном расстоянии от центра выставлен измерительный наконечник растрового преобразователя 7, установленного в стойке и производящего измерения перемещений выходного вала привода. Питание системы сжатым воздухом и задание требуемой величины давления в магистрали осуществляется переносной пневматической системой 9, включающей компрессор, блок подготовки воздуха и ресивер. Блок 8, состоящий из двух частей, является комплексной системой управления и обработки результатов измерения. Первая его часть – программируемый микроконтроллер (МК) серии BC440, предназначенный для осуществления управления мембранными приводами КШПП как в непрерывном, так и в ручном пошаговом режимах. Основным элементом второй части (счетного устройства) является 8-разрядный высокопроизводительный микроконтроллер ATmega8, к которому присоединяется растровый преобразователь и кнопки управления. Подготовленные данные передаются на персональный компьютер (ПК) 10 по последовательному интерфейсу RS232, при этом формируется текстовый файл результатов.

Для управления процессами преобразования и записи информации предусмотрены кнопки «Сброс» и «Запись». При нажатии на кнопку «Сброс» происходит запуск счетчика в режиме ожидания. При нажатии на кнопку «Запись» МК выдает подготовленные данные на ПК. Обработка эксперимен-

тальных данных, в частности, преобразование линейного перемещения штока преобразователя 7 в угловую величину поворота ведомого вала привода, осуществляется в среде Maple.

Конструкция КШПП представлена на рис. 2 [1].

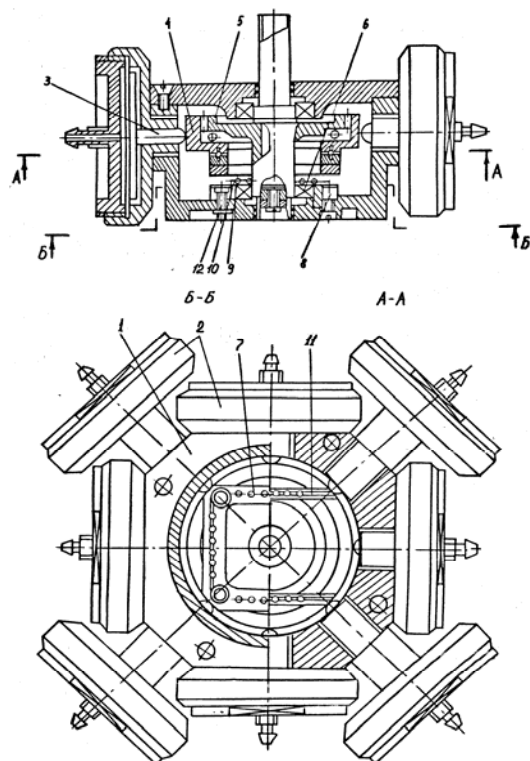


Рис. 2 – Конструкция КШПП

Он состоит из корпуса 1 с восемью мембранными приводами 2, расположенными под углом  $45^\circ$  относительно друг друга. Штоки 3 приводов 2 контактируют с шестерней внутреннего зацепления 4, выполняющей роль ведущего элемента. В свою очередь шестерня 4 находится в зацеплении с валом-шестерней 5, установленной в подшипниковых опорах 6. В отличие от волновой передачи, ведущий элемент выполнен жестким, а аналогия этих передач прослеживается в том, что шестерня 4 может совершать только плоскопараллельные круговые колебания. От поворота вокруг собственной оси она фиксируется крестообразной муфтой 7 и прижимной планкой 8 через шарики 9, которые расположены в сепараторах 10 и 11. Люфт всей системы выбирается за счет затяжных винтов 12.

Последовательной подачей воздуха в приводы 2 обеспечиваются плоскопараллельные круговые колебания шестерни 4, преобразующиеся во вращение вала-шестерни 5 вокруг собственной оси.

**Теоретический анализ динамических характеристик КШПП.** Контакт ведущего и ведомого элементов происходит по двум точкам. При совершении ведущим элементом под действием сил, создаваемых пневмоприводами, плоскопараллельных круговых колебаний за счет контакта в одной из точек ведомый элемент поворачивается на угол  $\gamma$ . При совершении одного полного круга колебаний ведущего элемента ведомый элемент поворачивается на угол  $\gamma^{ок} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} 2\pi$ , где  $z_1$  и  $z_2$  – числа зубьев ведущего и ведомого колес

соответственно. Диаметр  $d$  окружности колебаний ведущего элемента равен  $d = 2r$  и соответствует максимальному зазору между ведущим и ведомым элементами, причем  $d = D_1 - D_2 = (z_1 - z_2)m_z$ . Делительные диаметры ведущего и ведомого элементов равны:  $D_1 = z_1 m_z$ ,  $D_2 = z_2 m_z$ , где  $m_z$  – модуль зацепления. Коэффициент передачи  $i$  определяется соотношением

$$i = \frac{\gamma^{ок}}{x_1^{ок}} = \frac{2}{D_2}, \text{ где } x_1^{ок} - \text{длина окружности колебаний ведущего элемента равная } x_1^{ок} = \pi d = \pi(z_1 - z_2)m_z.$$

Теоретические динамические характеристики КШПП оценивались при помощи уравнения движения, выведенного на основании уравнения Лагранжа второго рода, и подробно приведенного в [2]. Из-за ограниченности объема статьи вывод здесь не приводится. Окончательно это уравнение имеет вид:

$$\ddot{\alpha} r \left[ m_1 + \frac{J i^2}{1 - K} \right] = F_{\tau \text{ пез}} - \frac{M_c i}{1 - K},$$

где  $K = \frac{(tg\phi_1 + tg\phi_2) f}{(f + tg\phi_2) tg\phi}$  (элементы, входящие в данную формулу, определены в [2]),  $\ddot{\alpha}$  – вторая производная центрального угла  $\alpha$ , определяющего величину смещения ведущего элемента относительно исходного положения;  $m_1$  – масса ведущего элемента;  $r$  – радиус окружности колебаний ведущего элемента, соответствующий половине максимального зазора между ведущим и ведомым элементами;  $J$  – момент инерции выходного вала с присоединенными к нему элементами;  $M_c$  – момент сопротивления, действующий на выходном валу ( $M_c = m_z \cdot b \cdot m_z = M_3$ ,  $b$  – плечо);  $F_{\tau \text{ пез}}(\alpha)$  – результирующая сила, действующая в направлении движения ведущего элемента.

Результирующая сила  $F_{\tau \text{рез}}(\alpha)$  зависит от величины текущего угла поворота ведущего элемента и в общем случае определяется из выражения

$$F_{\tau \text{рез}} = F_{\tau \text{рез}} + F_{\text{мп}\Sigma}^{x_i},$$

где  $F_{\tau}$  – сила, создаваемая пневмоприводами и действующая в направлении движения ведущего элемента;  $F_{\text{мп}\Sigma}^{x_i}$  – суммарная сила трения, также действующая в направлении противоположном движению ведущего элемента (в выражение для определения данной силы входит коэффициент трения  $f_p$ , создаваемого при взаимодействии штоков мембранных приводов и ведущим элементом).

Подробный вывод выражений для определения  $F_{\tau}$  и  $F_{\text{мп}\Sigma}^{x_i}$  при различных законах управления и, следовательно, при различных вариантах перемещений, приведен в [2]. Кроме этого следует отметить, что при моделировании динамики КШПП учитывались термодинамические процессы в мембранных пневмоприводах, создающих усилие  $F_{\tau}$ , и инерционность коммутирующей аппаратуры.

**Сравнение теоретических и экспериментальных данных.** Приведем примеры сравнения динамических характеристик КШПП, полученных в результате численного решения уравнения движения и эмпирических, полученных по результатам опытных данных на рассматриваемой установке. Рассматриваются два возможных случая перемещения ведущего элемента привода (на  $22,5^{\circ}$  и  $45^{\circ}$ ), динамические характеристики определяются на одном шаге при одинаковых значениях исходных данных, указанных в таблице 1. Исходные данные, значения которых варьируются в зависимости от номера эксперимента, приведены в таблице 2.

Из всего множества проведенных в статье приведены результаты 6 экспериментов, которые в дальнейшем различаются по номерам. Для всех случаев шток измерительного преобразователя устанавливался на расстояние, равное 0,02 м от оси вращения выходного вала КШПП. Примеры, показывающие зависимости угла поворота ведомого элемента КШПП от времени ( $\gamma = \gamma(t)$ ), полученные путем теоретических и экспериментальных исследований для различных вариантов исходных данных, приведены на рис. 3.

Отметим, что перемещение на  $22,5^{\circ}$  проводилось из состояния, при котором включен один мембранный привод в состояние, при котором включены два соседних привода одновременно. При перемещении на  $45^{\circ}$  из использовалось переключение двух соседних мембранных приводов.

Таблица 1 – Исходные данные для проведения экспериментальных и теоретических исследований

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1.	Коэффициенты трения (зацепление $f$ /привода $f_p$ )	0,08/0,05
2.	Числа зубьев ведущего $z_1$ / ведомого $z_2$ колес	158/150
3.	Модуль зацепления $m_z$ , мм	0,0003
4.	Масса ведущего элемента $m_1$ , кг	0,522
5.	Собственный момент инерции ведомого элемента $J_2$ , Н·м <sup>2</sup> ;	0,00128
6.	Магистральное давление $P_M$ , МПа	0,6
7.	Абсолютная температура $T$ , К	290
8.	Коэффициенты расхода $\mu_1 / \mu_2$	0,6/0,2
9.	Диаметры проходных сечений подходящих магистралей $d_1 = d_2$ , м	0,0015
10.	Эффективные площади мембран пневмоприводов $S_1 = S_2$ , м <sup>2</sup>	0,022
11.	Максимальный ход штоков мембранных пневмоприводов $x_{sum}$ , м	0,0006
12.	Координаты, определяющие холостые объемы пневмоприводов $x_{01} = x_{02}$ , м	0,004
13.	Постоянные времени срабатываний коммуникационной аппаратуры $\tau_1 = \tau_2$ , с	0,0033

Рисунок 1 — Структурная схема системы регулирования частоты

Таблица 2 – Варьируемые исходные данные

№ п/п	Наименование параметра	Номер эксперимента					
		1	2	3	4	5	6
1.	Перемещение ведущего элемента, град	22,5	22,5	22,5	45	45	45
2.	Плечо (расстояние, на котором подвешен груз от центра вращения), $b$ , м	0,1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15
3.	Масса груза, $m_2 = M_3$ , кг	0,34	0,34	0,17	0,34	0,17	0,64

Надійшла до редколегії 02.03.2011

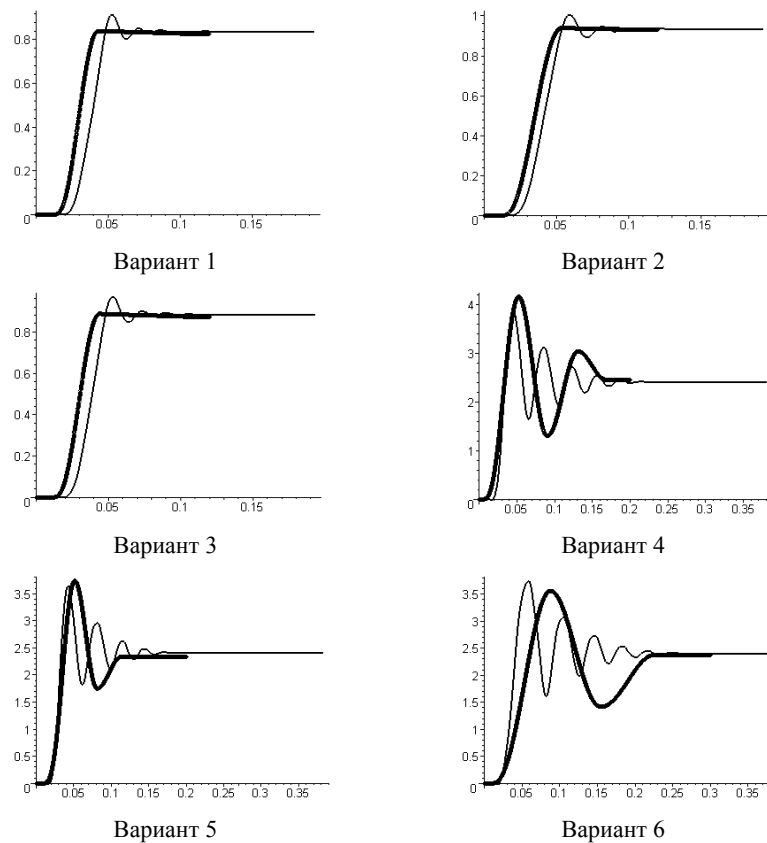


Рис. 3 – Графики зависимости угла поворота ведомого элемента от времени:  
— экспериментальные исследования; — теоретические исследования

**Выводы.** Сравнение результатов и экспериментальных исследований показывает, что при оценке времени перемещения в конечную точку наибольшее рассогласование теоретических и экспериментальных результатов составляет 18,9%, что вполне удовлетворительно для пневмоприводов. Средняя погрешность по времени перемещения составляет 11%.

Перспективами дальнейших исследований в данной области являются исследования управляемого движения выходного вала КШПП по оптимальному закону.

**Список литературы:** 1. *Konn В. Я.* Пневматические модульные манипуляторы в сборочном производстве / *В. Я. Konn* // Машиностроительное производство. Сер. Автоматизация производства, гибкие производственные системы, робототехника. – М. : ВНИИТУЭМР, 1989. – Вып. 1. – С. 52. 2. *Konn В. Я.* Колебательные шаговые пневмоприводы / *В. Я. Konn, Ю. А. Осинский,*