

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА РУКИ МАНИПУЛЯТОРА

Канд. техн. наук, доц. **КРАВЕЦ Ф. К.**, инж. **ЛЕВКО Р. Р.**

Белорусский национальный технический университет

Динамический расчет электропневматического привода проводится с целью выбора рациональных параметров, отработки алгоритма управления, а также определения его быстродействия и качества переходного процесса.

На рис. 1 показана принципиальная схема электропневматического привода руки манипулятора робота РГШ-40 [1], который управляет схватным устройством (зажимом и разжимом губок схвата) при выполнении технологических операций. Схема содержит ресивер 1, электропневматический клапан 2, пневмоцилиндры 3 и 4, датчики давления 5 и 6, датчики перемещения 7 и 8, задатчик команд ручного управления 9 и электронный блок управления 10.

Электропневматический привод работает следующим образом. При подаче электрического сигнала U_1 на электропневматический клапан воздух из ресивера поступает по пневмомагистралям в поршневые полости цилиндров (проис-

ходит разжим схвата). Штоковые полости цилиндров при этом через электропневматический клапан сообщаются с атмосферой. Для реверсивного движения поршней электрический сигнал U_1 снимается и подается U_2 на электропневматический клапан. При этом штоковые полости цилиндров сообщаются с ресивером, а поршневые – с атмосферой (происходит зажим схвата).

Давление в рабочих полостях пневмоцилиндров контролируется датчиками 5 и 6, а перемещение их штоков – датчиками 7 и 8. Сигналы от датчиков поступают в электронный блок управления. Последний соединен линиями связи с электромагнитами пневмоклапана, управление которыми осуществляется по программе. В соответствии с программой исполнительные пневмоцилиндры могут работать как в обычном, так и в циклическом режиме с различной частотой.

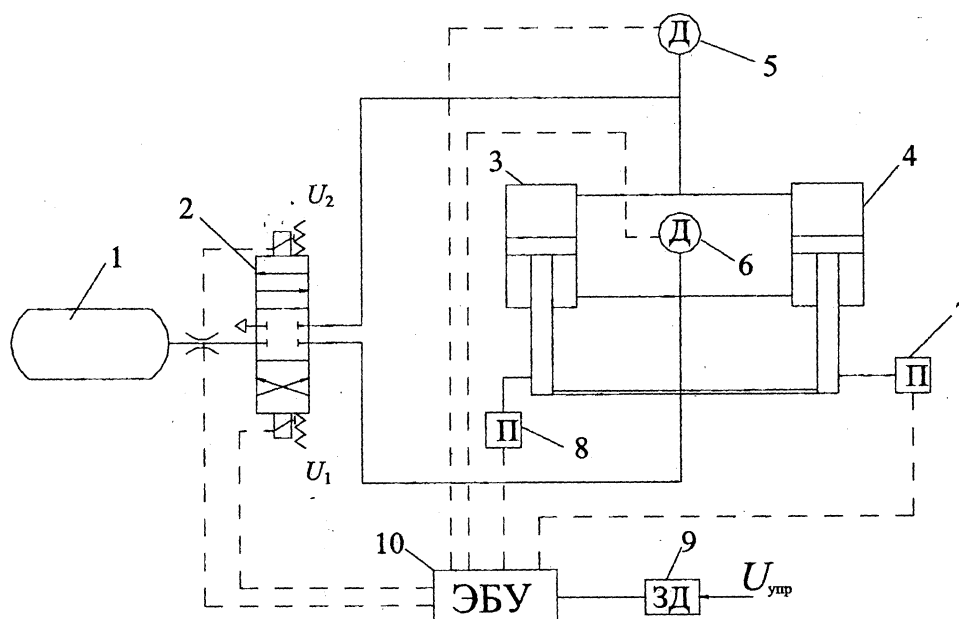


Рис. 1. Принципиальная схема электропневматического привода руки манипулятора робота РГШ-40

При необходимости работы электропневматического привода в наладочном режиме оператор воздействует на задатчик, программа прерывается и предпочтение отдается командам ручного управления.

На рис. 2 приведена расчетная схема электропневматического привода руки манипулятора, составленная в соответствии с принципиальной схемой (рис. 1). На схеме приняты следующие обозначения: p_p – давление в ресивере; p_k – давление в емкости V_k электропневматического клапана; $(\mu f)_k$ – коэффициент расхода и эффективная площадь проходного сечения клапана; $(\mu f)_1 \dots (\mu f)_7$ – коэффициенты расхода проходных сечений соединительных пневмомагистралей; $S_{п1}, S_{п2}, S_{ш1}, S_{ш2}$ – эффективные площади поршней; $V_{п1}, V_{п2}, V_{ш1}, V_{ш2}$ – объемы поршневых и штоковых полостей пневмоцилиндров; $V_{0п1}, V_{0п2}, V_{0ш1}, V_{0ш2}$ – начальные объемы поршневых и штоковых полостей пневмоцилиндров; $p_{п1}, p_{п2}, p_{ш1}, p_{ш2}$ – давления воздуха в поршневых и штоковых полостях; p_1, p_2 – давления в узловых емкостях V_1 и V_2 соединенных пневмомагистралей; y_1, y_2 – перемещение штоков.

При составлении дифференциальных уравнений, описывающих переходной процесс в пневмоприводе, используются уравнения баланса мгновенных массовых расходов в узлах пневмоцепи и гиперболическая газодинамическая функция расхода [2]. При математическом описании динамики электропневматического привода руки манипулятора и в соответствии с рекоменда-

ми [1] приняты следующие допущения: пневматическая цепь рассматривается как система с сосредоточенными параметрами; температура воздуха T в емкостях принимается одинаковой и постоянной за время переходного процесса; отсутствуют утечки воздуха из пневмосистемы; давление воздуха в ресивере p_p не изменяется за время переходного процесса. Кроме того, принято, что полости электропневматического клапана впуска и выпуска V_k являются постоянными и равными между собой ввиду незначительного изменения в процессе работы привода.

Математическая модель, составленная в соответствии с расчетной схемой (рис. 2), приведена в табл. 1. При математическом описании электропневматического привода приняты следующие обозначения: $D_{п1}, D_{п2}, d_{ш1}, d_{ш2}$ – диаметры поршней и штоков пневмоцилиндров; $v_{кр}$ – критическая скорость течения воздуха, $v_{кр} = \sqrt{kRT}$, м/с; k – коэффициент адиабаты, $k = 1,41$; R – газовая постоянная для воздуха, $R = 287,14 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$; T – абсолютная температура, К; A и B – постоянные коэффициенты гиперболической газодинамической функции расхода ($A = 0,654$; $B = 1,13$); U_1 и U_2 – электрические сигналы, подаваемые на электромагниты. При наличии электрического сигнала на электропневмоклапане $U = 1$, при отсутствии – $U = 0$. Остальные обозначения, используемые в математической модели, приведены на расчетной схеме (рис. 2).

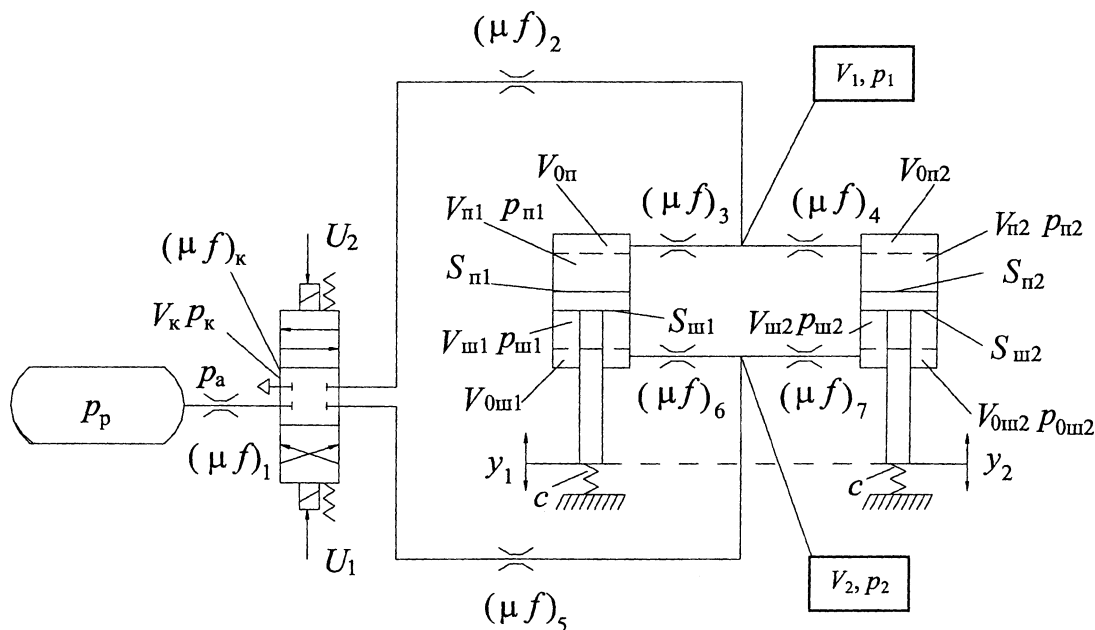


Рис. 2. Расчетная схема электропневматического привода руки манипулятора робота РГШ-40

Дифференциальное уравнение движения поршня исполнительного цилиндра руки манипулятора, составленное по принципу Даламбера, имеет вид

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy + P_0 + F_{\text{пр}} - F_{\text{тр}} - pF_{\text{п}} = 0,$$

где $pF_{\text{п}}$ – активная сила, обусловленная давлением энергоносителя (воздуха) в рабочей полости цилиндра; $F_{\text{пр}}$ – усилие, развиваемое приводом на штоке пневмоцилиндра; P_0 – сила, обусловленная преднатягом отжимной пружины захватного механизма руки манипулятора; c – жесткость отжимной пружины; $F_{\text{тр}}$ – приве-

денная сила трения в исполнительном приводе; b – коэффициент пропорциональности; m – приведенная масса поршня исполнительного пневмоцилиндра; p – давление в рабочей полости пневмоцилиндра; y – перемещение штока.

Приведенная в табл. 1 система уравнений не имеет аналитического решения в общем виде, поэтому моделирование осуществляется с помощью математической модели на ЭВМ. Дифференциальные уравнения решаются методом Рунге–Кутты в определенной последовательности.

Таблица 1

Математическая модель электропневматического привода руки манипулятора робота РГШ-40

Наполнение поршневых полостей $V_{\text{п1}}$ и $V_{\text{п2}}$ пневмоцилиндров
до давлений $p_{\text{п1}}$ и $p_{\text{п2}}$

$$\frac{dp_{\text{к}}}{dt} = \frac{k(\mu f)_1 v_{\text{кп}} p_{\text{р}}}{V_{\text{к}}} A \frac{p_{\text{р}} - p_{\text{к}}}{B p_{\text{р}} - p_{\text{к}}}; \quad (1)$$

$$(U_1 = 1; U_2 = 0);$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} = & \frac{k(\mu f)_2 v_{\text{кп}} p_{\text{к}}}{V_1} A \frac{p_{\text{к}} - p_1}{B p_{\text{к}} - p_1} - \frac{k(\mu f)_3 v_{\text{кп}} p_1}{V_{\text{п1}}} A \frac{p_1 - p_{\text{п1}}}{B p_1 - p_{\text{п1}}} - \\ & - \frac{k(\mu f)_4 v_{\text{кп}} p_1}{V_{\text{п2}}} A \frac{p_1 - p_{\text{п2}}}{B p_1 - p_{\text{п2}}}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{dp_{\text{п1}}}{dt} = \frac{k(\mu f)_3 v_{\text{кп}} p_1}{V_{\text{п1}}} A \frac{p_1 - p_{\text{п1}}}{B p_1 - p_{\text{п1}}}; \quad (3)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{k(\mu f)_4 v_{\text{кп}} p_1}{V_{\text{п2}}} A \frac{p_1 - p_{\text{п2}}}{B p_1 - p_{\text{п2}}}; \quad (4)$$

$$V_{\text{п1}} = V_{0\text{п1}} + S_{\text{п1}} y_1 = V_{0\text{п1}} + \frac{\pi D_{\text{п1}}^2}{4} y_1;$$

$$V_{\text{п2}} = V_{0\text{п2}} + S_{\text{п2}} y_2 = V_{0\text{п2}} + \frac{\pi D_{\text{п2}}^2}{4} y_2;$$

Опорожнение штоковых полостей $V_{\text{ш1}}$ и $V_{\text{ш2}}$ пневмоцилиндров
до атмосферного давления $p_{\text{а}}$

$$(U_1 = 1; U_2 = 0)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{\text{ш1}}}{dt} = & - \frac{k(\mu f)_6 v_{\text{кп}} p_{\text{ш1}}}{V_{\text{ш1}}} A \frac{p_{\text{ш1}} - p_2}{B p_{\text{ш1}} - p_2} + \frac{k(\mu f)_5 v_{\text{кп}} p_2}{V_2} A \frac{p_2 - p_{\text{к}}}{B p_2 - p_{\text{к}}} + \\ & + \frac{k(\mu f)_7 v_{\text{кп}} p_{\text{к}}}{V_{\text{к}}} A \frac{p_{\text{к}} - p_{\text{а}}}{B p_{\text{к}} - p_{\text{а}}}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dp_{\text{ш2}}}{dt} = - \frac{k(\mu f)_7 v_{\text{кп}} p_{\text{ш2}}}{V_{\text{ш2}}} A \frac{p_{\text{ш2}} - p_2}{B p_{\text{ш2}} - p_2} + \frac{k(\mu f)_5 v_{\text{кп}} p_2}{V_2} A \frac{p_2 - p_{\text{к}}}{B p_2 - p_{\text{к}}}; \quad (6)$$

$$\frac{dp_{\text{к}}}{dt} = - \frac{k(\mu f)_8 v_{\text{кп}} p_{\text{к}}}{V_{\text{к}}} A \frac{p_{\text{к}} - p_{\text{а}}}{B p_{\text{к}} - p_{\text{а}}}; \quad (7)$$

$$V_{ш1} = V_{0ш1} - S_{ш1}y_1 = V_{0ш1} + \frac{\pi}{4}(D_{ш1}^2 - d_{ш1}^2);$$

$$V_{ш2} = V_{0ш2} - S_{ш2}y_2 = V_{0ш2} + \frac{\pi}{4}(D_{ш2}^2 - d_{ш2}^2).$$

Наполнение штоковых полостей $V_{ш1}$ и $V_{ш2}$ пневмоцилиндров
до давлений $p_{ш1}$ и $p_{ш2}$

Уравнение (1)

$$(U_1 = 0; U_2 = 1);$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{k(\mu f)_5 v_{кп} p_k}{V_2} A \frac{p_k - p_2}{B p_k - p_2} - \frac{k(\mu f)_6 v_{кп} p_2}{V_{ш1}} A \frac{p_2 - p_{ш1}}{B p_2 - p_{ш1}} - \frac{k(\mu f)_7 v_{кп} p_2}{V_{ш2}} A \frac{p_2 - p_{ш2}}{B p_2 - p_{ш2}}; \quad (8)$$

$$\frac{dp_{ш1}}{dt} = \frac{k(\mu f)_6 v_{кп} p_2}{V_{ш1}} A \frac{p_2 - p_{ш1}}{B p_2 - p_{ш1}}; \quad (9)$$

$$\frac{dp_{ш2}}{dt} = \frac{k(\mu f)_7 v_{кп} p_2}{V_{ш2}} A \frac{p_2 - p_{ш2}}{B p_2 - p_{ш2}}; \quad (10)$$

$$V_{ш1} = V_{0ш1} + S_{ш1}y_1 = V_{0ш1} + \frac{\pi}{4}(D_{ш1}^2 - d_{ш1}^2);$$

$$V_{ш2} = V_{0ш2} + S_{ш2}y_2 = V_{0ш2} + \frac{\pi}{4}(D_{ш2}^2 - d_{ш2}^2).$$

Опорожнение поршневых полостей $V_{п1}$ и $V_{п2}$ пневмоцилиндров
до атмосферного давления p_a

$$(U_1 = 0; U_2 = 1)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{k(\mu f)_3 v_{кп} p_{п1}}{V_{п1}} A \frac{p_{п1} - p_1}{B p_{п1} - p_1} + \frac{k(\mu f)_2 v_{кп} p_1}{V_1} A \frac{p_1 - p_k}{B p_1 - p_k}; \quad (11)$$

$$\frac{dp_k}{dt} = -\frac{k(\mu f)_4 v_{кп} p_k}{V_k} A \frac{p_k - p_a}{B p_k - p_a}; \quad (12)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = -\frac{k(\mu f)_4 v_{кп} p_{п2}}{V_{п2}} A \frac{p_{п2} - p_1}{B p_{п2} - p_1} + \frac{k(\mu f)_2 v_{кп} p_1}{V_1} A \frac{p_1 - p_k}{B p_1 - p_k}; \quad (13)$$

$$\frac{dp_k}{dt} = -\frac{k(\mu f)_k v_{кп} p_k}{V_k} A \frac{p_k - p_a}{B p_k - p_a}; \quad (14)$$

$$V_{п1} = V_{0п1} - S_{п1}y_1 = V_{0п1} - \frac{\pi D_{п1}^2}{4};$$

$$V_{п2} = V_{0п2} - S_{п2}y_2 = V_{0п2} - \frac{\pi D_{п2}^2}{4}.$$

Методика моделирования процессов управления исполнительными пневмоцилиндрами руки манипулятора. Воздух из ресивера поступает в электропневматический клапан. Процесс заполнения клапана до давления p_k , равного давлению в ресивере ($p_p = 0,6 \dots 0,8$ МПа), описывается уравнением (1).

При подаче электрического сигнала U_1 ($U_1 = 1$) на электромагнит клапана последний сра-

батывает, и воздух из ресивера поступает по пневмомагистралям в поршневые полости $V_{п1}$ и $V_{п2}$ пневмоцилиндров. При этом решаются уравнения (2)...(4). Одновременно происходит опорожнение штоковых полостей $V_{ш1}$ и $V_{ш2}$ пневмоцилиндров через электропневматический клапан в атмосферу. Этот процесс описывается уравнениями (5) и (7). При достижении заданного уровня давления в поршневых и ат-

мосферного в штоковых полостях пневмоцилиндров расчет прекращается:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{dp_{n1}}{dt} = \frac{dp_{n2}}{dt} = 0; \quad \frac{dp_{m1}}{dt} = \frac{dp_{m2}}{dt} = 0.$$

При этом электрический сигнал U_1 снимается с электромагнита ($U_1 = 0$).

Для возвращения поршней гидроцилиндров в исходное положение электрический сигнал U_2 подается на электромагнит ($U_2 = 1$) пневмоклапана. Последний срабатывает, и сжатый воздух из ресивера заполняет штоковые полости V_{m1} и V_{m2} пневмоцилиндров. Решаются уравнения (8)...(10). Одновременно происходит опорожнение поршневых полостей V_{n1} и V_{n2} пневмоцилиндров. При этом решаются уравнения (11) и (14).

При достижении заданного давления в штоковых и атмосферного в поршневых полостях пневмоцилиндров расчет прекращается. Тогда:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{dp_{m1}}{dt} = \frac{dp_{m2}}{dt} = 0; \quad \frac{dp_{n1}}{dt} = \frac{dp_{n2}}{dt} = 0 \text{ и } U_2 = 0.$$

Для обеспечения останова поршней пневмоцилиндров в заданном (промежуточном) положении электрический сигнал снимается с электропневматического клапана 2 ($U_1 = U_2 = 0$). При этом вход и выход воздуха из цилиндров прекращается. Происходит фаза выдержки давления при остановленных поршнях в заданном положении. После фазы выдержки в зависимости от алгоритма управления исполнительными элементами привода может происходить процесс наполнения или опорожнения цилиндров. При этом используются соответствующие уравнения, по которым ведется расчет указанных процессов.

В результате расчета получают динамические характеристики, по которым оценивают

качество переходных процессов и быстродействие привода при данных конструктивных параметрах последнего. При неудовлетворительных динамических характеристиках изменяют конструктивные параметры элементов исследуемого привода и расчет повторяется.

Таким образом, используя данную методику, можно выбрать параметры проектируемого электропневматического привода, удовлетворяющего заданным требованиям.

На рис. 3 показаны динамические характеристики электропневматического привода руки манипулятора робота РГШ-40, полученные в результате расчета. Основные параметры привода, используемые для расчета, приведены в табл. 2. На графиках приняты следующие обозначения: p_n и p_m — давления соответственно в поршневой и штоковой полостях пневмоцилиндров.

Анализ результатов расчета показал, что наполнение поршневой полости пневмоцилиндров до давления 90 % от p_{max} составляет 0,36 с, а штоковых полостей — 0,33 с. Опорожнение поршневых и штоковых полостей до минимального давления, равного 90 % от p_{min} , происходит соответственно за 0,46 и 0,42 с. Время наполнения и опорожнения поршневых полостей пневмоцилиндров по сравнению со штоковыми несколько больше, что обусловлено разностью их геометрических объемов. Следует отметить, что процессы наполнения и опорожнения обоих пневмоцилиндров на графиках совпадают. Это объясняется равенством принятых в расчетах коэффициентов расхода $(\mu f)_k$, $(\mu f)_2...(\mu f)_7$ для параллельно подключенных пневмоцилиндров, соединенных с источником давления (ресивером), равными по длине и диаметрам пневмомагистралями.

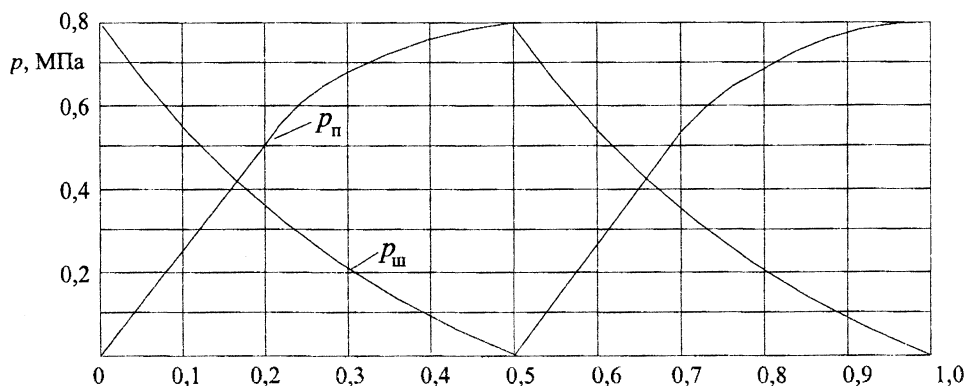


Рис. 3. Динамические характеристики электропневматического привода руки манипулятора робота РГШ-40

Таблица 2

**Основные параметры
электропневматического привода**

№ п/п	Наименование параметра	Численное значение
1	Пропускная способность, м ² : – питающей магистрали $(\mu f)_1$ – соединительной магистрали $(\mu f)_2$ – соединительной магистрали $(\mu f)_5$ – магистрали, подключенной к поршневым полостям пневмоцилиндров $(\mu f)_3 = (\mu f)_4$ – магистрали, подключенной к штоковым полостям гидроцилиндров $(\mu f)_6 = (\mu f)_7$ – клапана впуска (выпуска) $(\mu f)_k$	$1,2 \cdot 10^{-5}$ $5,2 \cdot 10^{-5}$ $5,2 \cdot 10^{-5}$ $3,2 \cdot 10^{-5}$ $3,2 \cdot 10^{-5}$ $1,6 \cdot 10^{-6}$
2	Площадь поршня, м ² : – в поршневой полости $S_{п1} = S_{п2}$ – в штоковой полости $S_{ш1} = S_{ш2}$	$3,85 \cdot 10^{-3}$ $2,25 \cdot 10^{-3}$
3	Приведенная масса поршня цилиндра $m_1 = m_2$, кг	0,89
4	Емкость клапана впуска (выпуска) V_k , м ³	$8,7 \cdot 10^{-6}$
5	Ход клапана впуска (выпуска) h , м	$3,4 \cdot 10^{-3}$
6	Давление в ресивере p_p , МПа	0,8
7	Начальный объем поршневой полости исполнительного пневмоцилиндра $V_{оп1} = V_{оп2}$, м ³	$3,95 \cdot 10^{-5}$
8	Начальный объем штоковой полости исполнительного пневмоцилиндра $V_{ош1} = V_{ош2}$, м ³	$2,82 \cdot 10^{-5}$
9	Жесткость отжимной пружины c , Н/м	$2,5 \cdot 10^3$
10	Преднатяг отжимной пружины F , Н	146

Варьируя геометрическими параметрами регулирующих аппаратов, пневмомагистралей, исполнительных пневмодвигателей, нагрузкой, уровнем давления, а также частотой электрических сигналов, подаваемых на электромагниты пневмоклапана, можно оказать влияние на динамические характеристики электропневматического привода, а также исследовать влияние тех или иных параметров элементов привода на качество его функционирования.

Разработанная методика расчета электропневматического привода позволяет на стадии проектирования выбирать конструктивные параметры, проводить исследования динамики, оценивать качество переходных процессов, определять его быстродействие и может быть использована при создании перспективных электропневматических систем технологических и мобильных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленные роботы в машиностроении: Альбом схем и чертежей: Учеб. пособие для техн. вузов / Ю. М. Соломенцев, К. П. Жуков, Ю. А. Павлов и др.; Под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1986. – 140 с.
2. Метлюк Н. Ф., Автушко В. П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М.: Машиностроение, 1980. – 231 с.