

Копирующий пневмопривод

© В.Н. Пильгунов, К.Д. Ефремова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

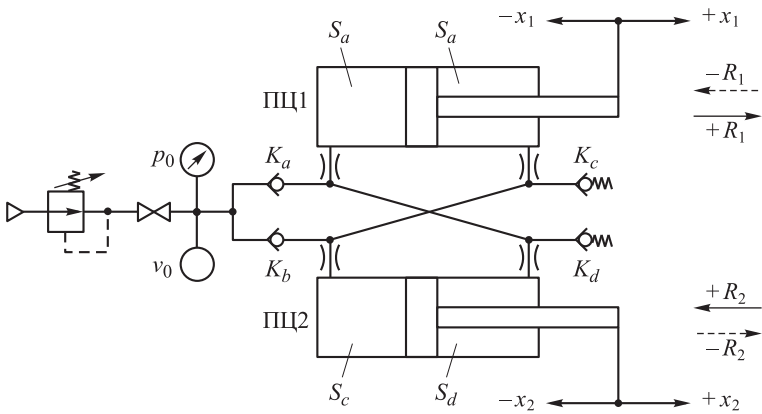
Предложено схемное решение копирующего пневмопривода с двумя дифференциальными пневмоцилиндрами, один из которых выполняет функцию задающего пневмоцилиндра, а другой — копирующего. Разработана математическая модель копирующего пневмопривода и проверена ее адекватность.

Ключевые слова: копирующий пневмопривод, задающий пневмоцилиндр, копирующий пневмоцилиндр, показатель критичности, параметр истечения, подпиточный клапан, клапан подпора.

Классическая схема пневмопривода возвратно-поступательного движения предусматривает наличие энергетической (компрессора и системы подготовки сжатого воздуха), исполнительной (пневмоцилиндра) и управляющей (пневмораспределителя и аппаратуры управления потоком сжатого воздуха) подсистем. В копирующем пневмоприводе (рисунок) функцию энергетической подсистемы выполняет задающий пневмоцилиндр, приводимый в движение человеком-оператором; управляющая подсистема отсутствует, компрессор работает периодически и поддерживает заданное давление подпитки в ресивере.

Управляющая сила R_1 на штоке задающего пневмоцилиндра ПЦ1 обеспечивает прямой ход x_1 поршня, при этом из штоковой полости S_b воздух вытесняется в поршневую полость S_c копирующего пневмоцилиндра ПЦ2: его шток выдвигается, преодолевая нагружающую силу R_2 . Сжатый воздух, вытесняемый из штоковой полости S_d пневмоцилиндра ПЦ2, поступает в поршневую полость S_a пневмоцилиндра ПЦ1. При обратном ходе поршня пневмоцилиндра ПЦ1 процесс аналогичен. Таким образом, поршень копирующего пневмоцилиндра следует за движением поршня задающего пневмоцилиндра и выполняет процедуру слежения по положению. Дифференциальность пневмоцилиндров определяет разность объема воздуха, вытесняемого из полости S_d , и объема воздуха, высвобождаемого полостью S_a . Это вызывает понижение давления в полости S_a , срабатывание подпиточного клапана K_a и поступление необходимого объема воздуха V_0 в полость S_a из ресивера. Давление в ресивере поддерживается на заданном уровне редуцирующим клапаном. Одновременно воздух, вытесняемый из штоковой полости S_b пневмоцилиндра ПЦ1, поступает в поршневую полость S_c пневмоцилиндра

ПЦ2 и обеспечивает прямой ход x_2 его поршня с преодолением встречной силы R_2 . При смене знака силы R_1 поршень пневмоцилиндра ПЦ1 совершает обратный ход, вытесняемые из поршневых полостей объемы воздуха превышают высвобождаемые объемы воздуха из штоковых полостей S_b и S_d , что вызывает срабатывание клапанов подпора K_b и K_d . Поршень пневмоцилиндра ПЦ2 перемещается на величину x_2 , определяемую тянущей силой R_2 . Если сила R_2 сохраняет знак нагрузки на прямом ходе, то она способствует уборке штока пневмоцилиндра ПЦ2. Давление настройки клапанов подпора должно быть несколько большим, чем давление подпитки p_0 , в противном случае через них будет стравливаться сжатый воздух.



Принципиальная схема копирующего пневмопривода

Термодинамический процесс изменения состояния воздуха может быть описан уравнением

$$dq = de + da, \quad (1)$$

где dq — удельная теплота, подводимая к воздуху массой m , $dq = dQ/m$; de — удельное изменение внутренней энергии воздуха объемом V , $de = dE/m$; da — удельная внешняя работа, совершаемая воздухом массой m при его расширении, $da = dA/m$ [1, 2]. Копирующий пневмоцилиндр совершает работу $dA > 0$ по преодолению знакопеременной силы на штоке. Поршень задающего пневмоцилиндра, выполняющего функцию компрессора, использует подводимую человеком-оператором механическую энергию, в этом случае $dA > 0$ и $da = de - dq$.

Работа копирующего пневмопривода в зависимости от скорости движения штоков пневмоцилиндров может происходить при различных процессах изменения состояния воздуха.

В **изотермическом процессе** подводимая теплота в условиях постоянства температуры $dT = 0$ приводит к увеличению объема воздуха V и поршень совершает полезную работу $dA > 0$ по преодолению силы R на штоке на пути dx . Если рассматривать воздух как идеальный газ, то процесс будет происходить без изменения его внутренней энергии: $de = 0$ и $dq = da = pdV_m = pA_n dx/m$, где A_n — площадь поршня, м²; V_m — удельный объем воздуха V , отнесенный к его массе m при плотности ρ , $V_m = V/m = 1/\rho$, м³/кг¹. Учитывая уравнение Менделеева — Клапейрона

$$pV_m = \frac{p}{\rho} = RT, \quad (2)$$

где R — газовая постоянная воздуха, $R = 287$ Дж/(кг¹·К¹), определяем удельную работу $a = RT \ln(V_{m2}/V_{m1})$. В этом случае уравнение состояния воздуха (1) принимает вид

$$p_1 V_{m1} = p_2 V_{m2} = \text{inv},$$

или с учетом $V_m = 1/\rho$

$$p_1/\rho_1 = p_2/\rho_2 = \text{inv}.$$

Изотермический процесс возможен в условиях активного теплообмена пневмоцилиндров с окружающей средой, или при малой скорости движения их поршней $dx/dt = 0$.

Изобарический процесс происходит при постоянной силе: $R = \text{inv}$. Если рассматривать воздух как реальный газ, то $dq = C_p dT$, $de = C_v dT$, где C_p и C_v — удельные теплоемкости воздуха, полученные при его нагреве в условиях постоянства давления $dp = 0$ и объема $dV = 0$. Уравнение состояния газа (1) имеет вид $(C_p - C_v)dT = pdV_m = pA_n dx/dt$.

Газовая постоянная R находится как разность удельных теплоемкостей $R = C_p - C_v$. Тогда уравнение (1) принимает вид $da = pA_n dx/dt = RdT$. Интегрирование этого уравнения в пределах изменения температуры $T_1 \dots T_2$ определяет физическую сущность газовой постоянной

$$R = \frac{a}{T_2 - T_1}.$$

Адиабатический процесс происходит без подвода теплоты ($dq = 0$), с учетом этого уравнение состояния (1) принимает вид $de = -da$, что соответствует равенству $pA_n dx/m = -C_v dT$.

Дифференцирование уравнения (2) обуславливает изменение температуры

$$\frac{d(pV_m)}{R} = \frac{(pdV_m + V_m dp)}{R}.$$

Используя показатель адиабаты $k = C_p/C_V$, получаем

$$\frac{kdV_m}{V_m} + \frac{dp}{p} = 0.$$

Интегрирование этого равенства позволяет записать уравнение состояния воздуха в адиабатическом процессе: $p_1 V_{m1}^k = p_2 V_{m2}^k = \text{inv}$.

Политропический процесс — промежуточный (реальный) процесс между изотермическим ($dq \neq 0$) и адиабатическим ($dq = 0$) процессами. Вместо показателя адиабаты вводится показатель политропы $n = (C_p - C_n)/(C_V - C_n)$, который учитывает удельную теплоемкость C_n в политропическом процессе. Уравнение состояния воздуха в адиабатическом процессе имеет вид

$$p_1 V_{m1}^n = p_2 V_{m2}^n = \text{inv}.$$

В термодинамическом процессе, связанном с тепломассообменом, переменность массы воздуха в полостях пневмоцилиндров при движении поршня вызывает нестационарность процесса изменения состояния воздуха и уравнение баланса энергий (1) становится развернутым:

$$dq_m = dq + q_1 \frac{dm_1}{m} = de + da + q_2 \frac{dm_2}{m}, \quad (3)$$

где q_1, q_2 — удельная теплота входящего в объем воздуха массой dm_1 и выходящего из этого объема воздуха массой dm_2 ; dq_m — приращение удельной теплоты в процессе тепломассообмена; da — совершенная поршнем внешняя удельная работа, $da = pdV_m$; dV_m — изменение удельного объема, $dV_m = d(V/m) = A_n dx/m - V_0 dm/m$ (V_0 — начальный объем полости пневмоцилиндра); dm — приращение массы воздуха в полости пневмоцилиндра, $dm = dm_1 - dm_2$.

В рассматриваемом случае удельная работа составляет

$$da = p A_n \frac{dx}{m} - p V_m \frac{dm}{m}.$$

В работе [3] приведено выражение для оценки величины $dq_m = dq + (I_1 - ke)dm_1/m$, где I_1 – удельное теплосодержание (энтальпия) входящего воздуха массой dm_1 , $I_1 = e + pV_m$.

С учетом выражений $de = C_v dT$; $k = C_p / C_v$; $R = C_p - C_v$; $k - 1 = R / C_v$; $R = C_v / (k - 1)$; $pV_m = RT$ находим удельную работу в процессе тепломассобмена:

$$da = \frac{pA_n dx}{m} - \frac{e(k-1)dm}{m}.$$

Введем безразмерный параметр $q_a = dq_m/m$, оценивающий интенсивность тепломассобмена dq_m по сравнению с совершенной внешней работой da :

$$q_a = \frac{dq + q(I - ke)dm_1 / m}{pA_n dx / m - e(k-1)dm / m}. \quad (4)$$

Массовый расход воздуха $G = dm/dt$. После преобразований уравнение (4) принимает вид

$$q_a = \frac{dQ / dt + (I_1 - ke)G_1}{pA_n dx / dt - e(k-1)(G_1 - G_2)}. \quad (5)$$

В выражении (5) слагаемое $pA_n dx/dt$ соответствует мощности термодинамического процесса тепломассообмена, а слагаемое dQ/dt — секундному изменению подводимой теплоты.

Запишем приведенные формулы (1)–(5) для процессов заполнения и опорожнения полостей пневмоцилиндров ПЦ1 и ПЦ2 копирующего пневмопривода.

1. Быстрое опорожнение полости пневмоцилиндра вытеснителем без теплообмена. В этом случае

$$G_1 = 0; dx < 0; dQ = 0; q_a = 0; n = k - q_a(k-1) = 1,4.$$

2. Медленное опорожнение полости пневмоцилиндра в условиях теплообмена. При медленном опорожнении составляющие уравнения (5) принимают следующие значения: $G_1 = 0; dx < 0; dQ < 0;$

$$q_a = \frac{dQ / dt}{pA_n dx / dt + e(k-1)G_2},$$

а в условиях изотермического процесса интенсивность теплообмена dq_{m_1} равна совершенной работе $q_a = 1$, $n = k - q_a(k - 1) = 1$.

3. Заполнение полости пневмоцилиндра переменного объема без совершения внешней работы в условиях отсутствия теплообмена. Этот режим происходит при параметрах процесса $G_2 = 0$; $dx > 0$; $p = 0$;

$$dQ = 0; \quad q_a = -\frac{(I_1 / e - k)}{k - 1}.$$

4. Заполнение полости пневмоцилиндра переменного объема с совершением внешней работы по преодолению постоянной силы в условиях отсутствия теплообмена. В этом случае составляющие уравнения (5) имеют следующие значения: $G_2 = 0$; $dx > 0$; $p = p_0 = \text{inv}$;

$$dQ = 0; \quad q_a = \frac{(I_1 / e - k)G_1}{pA_n dx / (edt) - (k - 1)G_1}.$$

Постоянство давления ($p = \text{inv}$) соответствует изобарическому процессу ($dp = 0$) и значению безразмерного параметра $q_a = 3,5$. Совершаемая поршнем внешняя работа будет однозначно связана с массовым расходом G_1 воздуха, заполняющего полость, и его начальными параметрами (энтальпией I_1 и внутренней энергией e).

5. Заполнение полости пневмоцилиндра переменного объема с совершением внешней работы по преодолению позиционной нагрузки без теплообмена. Этот режим характеризуется следующими параметрами процесса: $G_2 = 0$; $dx > 0$; $p = p(x)$; $dQ = 0$;

$$q_a = \frac{(I_1 / e - k)G_1}{p(x)A_n dx / (edt) - (k - 1)G_1}.$$

Рассмотрим силовые характеристики пневмоцилиндров ПЦ1 и ПЦ2 без учета сил трения в уплотнениях и направляющих с переменными силами на штоках $R_1 = R_1(x_1)$ — управляющая сила, $R_2 = R_2(x_2)$ — нагружающая сила [4]. Необходимо отметить, что в зависимости от режима работы копирующего пневмоцилиндра сила R_2 может быть как знакопеременной, так и знакопостоянной.

Для задающего пневмоцилиндра ПЦ1:

прямой ход

$$(x_1 > 0) p_a S_a + k_1 x_1 - p_b S_b = 0; \quad (6)$$

обратный ход

$$(x_1 < 0) p_b S_b - k_1 x_1 - p_a S_a = 0. \quad (7)$$

Для копирующего пневмоцилиндра ПЦ2 при знакопостоянной нагрузке R_2

прямой ход

$$(x_2 > 0) p_c S_c - k_2 x_2 - p_b S_b = 0; \quad (8)$$

обратный ход

$$(x_2 < 0) p_d S_d + k_2 x_2 - p_c S_c = 0. \quad (9)$$

Для копирующего пневмоцилиндра ПЦ2 при знакопостоянной нагрузке R_2 :

прямой ход

$$(x_2 > 0) p_c S_c - k_2 x_2 - p_d S_d = 0; \quad (10)$$

обратный ход

$$(x_2 < 0) p_d S_d - k_2 x_2 - p_c S_c = 0. \quad (11)$$

Истечение воздуха через подводящие и отводящие устройства пневмоцилиндров происходит с потерями гидравлической энергии. Потери давления на входе в полость пневмоцилиндра будем рассматривать как потери выхода из трубопровода с коэффициентом сопротивления $\xi_{\text{вх}} = 1$, а потери давления на выходе из полости пневмоцилиндра — как потери входа в трубопровод с коэффициентом сопротивления $\xi_{\text{вх}} = 0,5$. Это соответствует коэффициентам расхода $\mu_{\text{вх}} = 0,50$ и $\mu_{\text{вых}} = 0,82$ на входе в полость пневмоцилиндра и выходе из нее. Значения массовых расходов воздуха через входное и выходное устройства будем рассчитывать по формулам, полученным из уравнения Сен-Венана — Ванцелля с учетом уравнения состояния газа Менделеева — Клапейрона ($\rho = p/RT$) и соотношения плотностей в политропическом процессе

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n}, \quad \text{или} \quad \rho_2 = \rho_1 \beta^{1/n},$$

где β — относительное (безразмерное) давление, которое будем рассматривать как показатель критичности процесса истечения воздуха под абсолютным давлением p_1 в газовую среду с абсолютным давлением p_2 (значения $\beta_{\text{кр}} = 0,528$; $\beta < 0,528$; $0,528 < \beta < 0,83$; $\beta > 0,83$ определяют режимы критического, надкритического, докритического истечения воздуха и режим несжимаемой капельной жидкости соответственно [5]), $\beta = p_2/p_1$. Тогда

$$G = \mu A_{\text{п.с}} p_1 \left[\frac{2n}{RT_1 (n-1)} \right] (\beta^{2/n} - \beta^{n+1/n})^{0,5}, \quad (12)$$

где $A_{\text{п.с}}$ — площадь проходного сечения.

Введем проводимость подводящего (отводящего) устройства пневмоцилиндра ($Z = \mu A_{\text{п.с}}$) и параметр истечения воздуха через подводящее (отводящее) устройство

$$k_\beta = \left[\frac{2n}{RT_1 (n-1)} \right] (\beta^{2/n} - \beta^{n+1/n})^{0,5}.$$

Параметр истечения $k_\beta = k_\beta(\beta, R, T)$ учитывает свойства газа (R), его абсолютную температуру (T) на входе в устройство, характер процесса истечения (показатель политропы n) и показатель критичности (β). Зависимость параметра истечения от показателя политропы представлена в работе [6]. После подстановки проводимости Z и параметра истечения k_β в уравнение (12) получим уравнение для определения массового расхода:

$$G = Z k_\beta p_1.$$

Исследуем работу копирующего пневмопривода на прямом и обратном ходах поршня задающего пневмоцилиндра ПЦ1.

Прямой ход поршня пневмоцилиндра ПЦ1. Запишем приведенные формулы (6)—(12) для процессов заполнения и опорожнения полостей пневмоцилиндров ПЦ1 и ПЦ2 копирующего пневмопривода.

1. Опорожнение штоковой полости S_b . Масса воздуха, вытесняемая поршнем из полости S_b ,

$$dm_b = d(V_b \rho_b) = S_b d(x_1 \rho_b) = S_b x_{10} d\rho_b + S_b \rho_{b0} dx_1, \quad (13)$$

где V_b — объем воздуха, вытесняемый из штоковой полости; x_{10} , ρ_{b0} — исходная позиция поршня и плотность воздуха в исходной позиции. В соответствии с уравнением Менделеева — Клапейрона запишем

$$d\rho_b = \frac{d p_b}{RT} \text{ и } dm_b = \frac{S_b x_{10} d p_b}{RT_b} + S_b \rho_{b0} dx_1.$$

Первое слагаемое этого уравнения соответствует массе воздуха, оставшейся в полости пневмоцилиндра вследствие изменившейся плотности,

второе слагаемое — массе воздуха, покидающего полость пневмоцилиндра при исходной плотности.

Масса воздуха, выходящая из полости S_b через отводящее устройство за время dt ,

$$dm_b = G_b dt = Z_{\text{вх}} k_{\beta b} P_b dt.$$

Для определения параметра истечения $k_{\beta b}$ необходимо оценить значение показателя критичности $\beta_b = (p_b - \Delta p_b) / p_b$, где Δp_b — потеря давления в отводящем устройстве. Давление в штоковой полости определим из уравнения (6): $p_b = (p_a S_a + k_1 x_1) / S_b$. Очевидно, что масса воздуха, выходящая через отводящее устройство пневмоцилиндра ПЦ1, равна второму слагаемому уравнения (13):

$$Z_{\text{вх}} k_{\beta b} (p_a S_a + k_1 x_1) dt = S_b^2 \rho_{b0} dx_1.$$

2. Заполнение поршневой полости S_a . Масса воздуха, заполняющая высвобождаемый объем в полости S_a ,

$$dm_2 = d(V_a \rho_a) = S_a d(x_1 \rho_a) = S_a x_{10} d\rho_a = S_a \rho_{a0} dx_1. \quad (14)$$

В соответствии с уравнением Менделеева — Клапейрона имеем

$$d\rho_a = \frac{dp_a}{RT_a} \quad \text{и} \quad dm_a = \frac{S_a x_{10} dp_a}{RT_a} + S_a \rho_{a0} dx_1.$$

Первое слагаемое этого уравнения соответствует массе воздуха, оставшейся в полости пневмоцилиндра вследствие изменившейся плотности, второе слагаемое — массе воздуха, которая должна поступить в полость пневмоцилиндра при исходной плотности.

Масса воздуха, поступающая в полость S_a через подводящее устройство за время dt , представляет собой сумму массы воздуха, вытесняемого из штоковой полости пневмоцилиндра ПЦ2, и массы воздуха, проходящей через обратный клапан K_a , при этом на входе в подводящее устройство установится давление подпитки p_0 :

$$dm_a = G_a dt = Z_{\text{вых}} k_{\beta b} p_0 dt.$$

Параметр истечения $k_{\beta a}$ оценивается показателем критичности $\beta_a = p_a / p_0$. Масса воздуха, поступающая в поршневую полость пневмоцилиндра ПЦ1 через подводящее устройство, равна второму слагаемому уравнения (14)

$$Z_{\text{вых}} k_{\beta a} p_0 dt = S_a \rho_{a0} dx_1.$$

3. Опорожнение штоковой полости S_d пневмоцилиндра ПЦ2.

Масса воздуха, вытесняемая поршнем из полости S_d ,

$$dm_d = d(V_d \rho_d) = S_d d(x_2 \rho_d) = S_d x_{20} d\rho_d + S_d \rho_{d0} dx_2. \quad (15)$$

В соответствии с уравнением Менделеева — Клапейрона $d\rho_d = dp_d / RT_d$ и $dm_d = \frac{S_d x_{20} dp_d}{RT_d} + S_d \rho_{d0} dx_2$.

Масса воздуха, выходящая из полости S_d через отводящее устройство за время dt ,

$$dm_d = G_d dt = Z_{\text{вх}} k_{\beta d} p_d dt.$$

Параметр истечения $k_{\beta d}$ оценивается через показатель критичности $\beta_d = (p_d - \Delta p_d) / p_d$, где Δp_d — потеря давления в отводящем устройстве. Давление p_d в штоковой полости выразим из (8):

$$p_d = \frac{(p_c S_c - k_2 x_2)}{S_d}.$$

Масса воздуха, выходящая через отводящее устройство, равна второму слагаемому уравнения (15)

$$Z_{\text{вх}} k_{\beta d} (p_c S_c - k_2 x_2) dt = S_d^2 \rho_{d0} dx_2.$$

4. Заполнение поршневой полости S_c пневмоцилиндра ПЦ2.

Масса воздуха, заполняющая высвобождаемый объем,

$$dm_c = d(V_c \rho_c) = S_c d(x_2 \rho_c) = S_c x_{20} d\rho_c + S_c \rho_{c0} dx_2. \quad (16)$$

В соответствии с уравнением Менделеева — Клапейрона запишем

$$d\rho_c = \frac{dp_c}{RT_c} \text{ и } dm_c = \frac{S_c x_{20} dp_c}{RT_c} + S_c \rho_{c0} dx_2.$$

Масса воздуха, поступающая в полость S_c через подводящее устройство пневмоцилиндра ПЦ2,

$$dm_c = G_c dt = Z_{\text{вых}} k_{\beta c} (p_c + \Delta p_c) dt. \quad (17)$$

Параметр истечения $k_{\beta c}$ оценивается показателем критичности $\beta_c = p_c / (p_c + \Delta p_c)$, где Δp_c — потеря давления в подводящем устройстве. Давление в поршневой полости выразим из уравнения (8):

$$p_c = \frac{(p_d S_d - k_2 x_2)}{S_c}.$$

Масса воздуха, поступающая в поршневую полость через подводящее устройство, равна второму слагаемому уравнения (16)

$$Z_{\text{вых}} k_{\beta c} (p_d S_d + k_2 x_2 + \Delta p_c S_c) dt = S_c^2 \rho_{c0} dx_2. \quad (18)$$

Таким образом, динамика копирующего пневмопривода на прямом ходе задающего пневмоцилиндра описывается системой уравнений, полученных в условиях теплообмена:

$$Z_{\text{вых}} k_{\beta a} p_0 dt = S_a \rho_{a0} dx_1;$$

$$Z_{\text{вх}} k_{\beta d} (p_c S_c - k_2 x_2) dt = S_d^2 \rho_{d0} dx_2;$$

$$Z_{\text{вх}} k_{\beta d} (p_a S_a + k_1 x_1) dt = S_b^2 \rho_{b0} dx_1;$$

(19)

$$Z_{\text{вых}} k_{\beta c} (p_d S_d + k_2 x_2 + \Delta p_c S_c) dt = S_c^2 \rho_{c0} dx_2;$$

$$p_b = \frac{(p_a S_a + k_1 x_1)}{S_b};$$

$$p_d = \frac{(p_c S_c - k_2 x_2)}{S_d}.$$

Обратный ход поршня пневмоцилиндра ПЦ1. Запишем выражения массовых расходов в процессах заполнения и опорожнения полостей пневмоцилиндров ПЦ1 и ПЦ2 при обратном ходе поршня пневмоцилиндра ПЦ1.

1. Опорожнение поршневой полости S_a пневмоцилиндра ПЦ1.
 Масса воздуха, вытесняемая поршнем из полости S_a ,

$$dm_a = d(V_a \rho_a) = S_a d(x_1 \rho_a) = S_a x_{10} \frac{dp_a}{RT_a} + S_a \rho_{a0} dx_1. \quad (20)$$

Масса воздуха, выходящая из полости S_a через отводящее устройство,

$$dm_a = G_a dt = Z_{\text{вх}} k_{\beta a} p_a dt. \quad (21)$$

Показатель критичности $\beta_a = (p_a - \Delta p_a) / p_a$. Давление в полости S_a
 $p_a = (p_b S_b - k_1 x_1) / S_a$.

Уравнение баланса масс

$$Z_{\text{вх}} k_{\beta a} (p_b S_b - k_1 x_1) dt = S_a^2 \rho_{a0} dx_1. \quad (22)$$

2. Заполнение штоковой полости S_b пневмоцилиндра ПЦ1. Масса воздуха, заполняющего полость S_b ,

$$dm_b = d(V_b \rho_b) = S_b d(x_1 \rho_b) = S_b x_{10} \frac{dp_b}{RT_b} + S_b \rho_{b0} dx_1. \quad (23)$$

Масса воздуха, поступающего в полость S_b через подводящее устройство, будет определяться как разность массы воздуха, вытесняемого поршнем из полости S_c пневмоцилиндра ПЦ2, и массы воздуха, проходящей через клапан подпора K_b , при этом на входе в полость установится давление p_b' , характеризующее настройкой клапана:

$$dm_b = G_b dt = Z_{\text{вых}} k_{\beta b} p_b dt. \quad (24)$$

Показатель критичности $\beta_b = p_b / p_0$, давление в полости S_b $p_b = (p_a S_a + k_1 x_1) / S_b$.

3. Опорожнение поршневой полости S_c пневмоцилиндра ПЦ2.
 Масса воздуха, вытесняемая поршнем из полости S_c ,

$$dm_c = d(V_c \rho_c) = S_c d(x_2 \rho_c) = \frac{S_c x_{20} dp_c}{RT_c} + S_c \rho_{c0} dx_2. \quad (25)$$

Масса воздуха, выходящего из полости S_c через отводящее устройство,

$$dm_c = G_c dt = Z_{\text{вх}} k_{\beta c} p_c d. \quad (26)$$

Показатель критичности $\beta_c = (p_c - \Delta p_c) / p_c$, давление в полости S_c $p_c = (p_d S_d + p_d S_d) / S_c$.

4. Заполнение штоковой полости S_d пневмоцилиндра ПЦ2. Масса воздуха, заполняющего полость S_d ,

$$dm_d = d(V_d \rho_d) = S_d d(x_2 \rho_d) = \frac{S_d x_{20} dp_d}{RT_d} + S_d \rho_{d0} dx_2. \quad (27)$$

Масса воздуха, поступающая в полость S_d через подводящее устройство, будет вычисляться как разность массы воздуха, вытесняемого из полости S_a пневмоцилиндра ПЦ1, и массы воздуха, выходящего через клапан подпора K_d ; при этом на входе в полость установится давление p_d' , определяемое настройкой клапана:

$$dm_d = G_d dt = Z_{\text{вых}} k_{\beta d} p_d dt. \quad (28)$$

Показатель критичности $\beta_d = p_d / p_0'$, давление в полости S_d $p_d = (p_c S_c - k_2 x_2) / S_d$.

Динамика копирующего пневмопривода на обратном ходе задающего пневмоцилиндра описывается системой уравнений (20)—(28). Исследования копирующего пневмопривода, выполненного на базе одинаковых пневмоцилиндров с параметрами 30; 16; 150 мм при давлении подпитки $p_0 = 0,2$ МПа и давлении настройки клапанов подпора $p_K = 0,22$ МПа подтвердили адекватность разработанной математической модели.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. *Основы пневмоавтоматики*. Москва, Машиностроение, 1973, 360 с.
- [2] Нагорный В.С., Денисов А.А. *Устройства автоматики гидро- и пневмосистем*. Москва, Высшая школа, 1991, 367 с.
- [3] Герц Е.В. *Динамика пневматических систем машин*. Москва, Машиностроение, 1985, 255 с.
- [4] Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. *Гидравлика, гидромашины и гидроприводы*. Москва, Машиностроение, 1982, 423 с.
- [5] Башта Т.М. *Гидропривод и гидропневмоавтоматика*. Москва, Машиностроение, 1972, 320 с.

- [6] Пильгунов В.Н. Высокоточный широкодиапазонный расходомер сжатого воздуха — измеритель малых перемещений. *Электронное научно-техническое издание «Наука и образование»*, № 8, 2012. URL: <http://technomag.edu.ru>. doi: 10.7463/0812.0451962 (дата обращения 20.05.2013).

Статья поступила в редакцию 08.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Копирующий пневмопривод. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hydro/686.html>

Ефремова Клара Дмитриевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных и методических работ в области пневмоавтоматики и механики жидкости и газа. e-mail: kde@bmstu.ru

Пильгунов Владимир Николаевич родился в 1941 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1964 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидромеханика, гидравлические машины и гидропневмоавтоматика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области механики жидкости и гидропневмоавтоматики. e-mail: vnp41@yandex.ru