ISSN 0136-3549 0233-5697



TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

.6.

553

553 ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

> ГИДРОАЭРОДИНАМИКА И ДИНАМИКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ







0.6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.54+681.586+621.646

ГИДРОАЭРОДИНАМИКА И ДИНАМИКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИ**Я**

Гидравлика и пневматика 1

Таллин 1983

553

Содержание

	I.	Айнола Л.Я., Лийв У.Р. Разгонное движение не- сжимаемой жидкости вместе с цилиндрическим по- плавком в цилиндрической трубе	3
	2.	Руустал Э.А. О разгонном течении сжимаемой жидкости в цилиндрической трубе	II
•	3.	Каск Э.Г. Определение давления нестационарного течения жидкости при заданной закономерности средней скорости в трубопроводах	19
	4.	Коппель Т.А. Спектральное распределение энер- гии в слое смешения нестационарного стрывного течения в канале с открытой поверхностью	27
	5.	Ламп Ю.Ю., Лийв У.Р. Электромагнитный расхо- домер с частотой возбухдения 500 Hz	41
	6.	Реэдик В.И. Исследование возможностей регули- ровки режима работы пневматических датчиков положения с фокусированной кольцевой струей	51
	7.	Рездик В.И., Унт А.А. Пневматические струйные системы технологической информации для робото- технических комплексов холодной штамповки	63
	8.	Гроссшмидт Г.Т., Пахапилль Я.А. Многополюсные модели расчета характеристик регулятора пото- ка гидроприводов	75
	9.	Гроссшмидт Г.Т., Пахапилль Я.А. Итерационный расчет статической характеристики гидравличе- ского следящего привода	91
OUSENSV TAL	matu TA LINN acc	Таллинский политехнический институт Труды ТПИ № 553 ГИДРОАЗРОДИНАМИКА И ДИНАМИКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ Гидравлика и пневматика 1 Релактор Р. Кюттвер Технический редактор Е. Зорина Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 01 апреля 1983 года Подписано к печати 10 ноября 1983 года Формат 60х90/16 Под. л. 6,5 +0,25 прилож. Учизд. л. 5,4 Тибах 300 МВ-00175. Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскла, 2/9 Зак. М 733 Пети, 80 коп. С Таллин, ТПИ, 1983	
Научная	6HON		

№ 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.54.013.2

Л.Я. Айнола, У.Р. Лийв

РАЗГОННОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕСКИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ВМЕСТЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПОПЛАВКОМ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

В настоящей статье рассматривается задача движения из состояния покоя несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе в случае, когда в трубе вместе с жидкостью движется цилиндрический поплавок. При этом среднее сопротивление его пропорционально скорости движения вместе с жидкостью. В результате работы найдена средняя скорость при разгонном движении жидкости и влияние наличия поплавка на распределение скоростей по радиусу трубы.

Подобная задача в одномерной постановке для сжимаемой жидкости рассматривается в работе [I]. Похожие задачи решались также в работах [2, 3].

Постановка задачи

Рассматривается ламинарное нестационарное движение несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе, которое описывается уравнением

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0,$$
 (I.I)

где ц - скорость движения жидкости в направлении оси трубы;

- р плотность жидкости;
- динамический коэффициент вязкости;
- р давление;
- х, г координаты в направлении оси и радиуса трубы;
 - t время.

В трубе находится цилиндрический поплавок, радиус которого меньше радиуса трубы и между стенкой трубы и стенкой поплавка остается тонкая щель. Скорость поплавка перемещения вместе с жидкостью совпадает со средней скоростью движения жидкости. При этом предполагаем, что сила сопротивления, вызванная трением между стенкой трубы и поплавком линейно пропорциональна скорости движения поплавка. Исходя из этого, уравнение движения поплавка можно представить в виде

$$m \frac{dU}{dt} + \kappa U = q \cdot \pi R^2, \qquad (I.2)$$

где U - средняя скорость движения жидкости

$$U = \frac{2}{R^2} \int_{0}^{R} ur dr,$$
 (I.3)

q, - разность давления на торцевых плоскостях поплавка;

- m масса поплавка;
- к коэффициент сопротивления;
- R радиус трубы.

Рассматривая разгонное движение, когда в момент времени t = 0 к трубе приложен постоянный градиент давления f, имеем

$$\frac{\partial p}{\partial x} = f - \frac{q}{L}, \qquad (I.4)$$

где L - длина трубы.

Учитывая соотношения(I.2), (I.4), уравнение (I.I) можно представить в виде

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{m}{\pi R^2 L} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\kappa}{\pi R^2 L} U - f = 0.$$
(I.5)

Если перейти к новым безразмерным координатам η, τ, коэффициентам m, к, и переменным v, V, F по формулам

$$\eta = \frac{r}{R}, \quad \tau = \frac{\mu t}{\rho R^2},$$

$$m_{4} = \frac{m}{\pi \rho R^2 E}, \quad \kappa_{4} = \frac{\kappa}{\pi L \mu},$$

$$F = \frac{f R^2}{\mu U_0}, \quad v = \frac{u}{U_0},$$

$$V = 2 \int_{0}^{4} v \eta d\eta,$$
(I.7)

то получим

N

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta}\right) + m_1 \frac{dV}{d\tau} + \kappa_1 V - F = 0. \quad (I.8)$$

Рассмотрим уравнение (I.8) при начальном и граничном условиях

$$v = 0$$
 mpm $\tau = 0$, (I.9)
 $v = 0$ mpm $\eta = 1$. (I.10)

Решение для средней скорости

Найдем преобразование Лапласа уравнения (1.8). Учитывая начальное условие (1.9), имеем

$$\frac{d^2 \overline{v}}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d\overline{v}}{d\eta} - s \overline{v} = -\frac{F}{s} + (m_4 s + \kappa_4) \overline{V}, \qquad (2.1)$$

где 5 - параметр Лапласа.

Ввелем

новую функцию
$$\overline{\Phi}$$
 в формулу
 $\overline{\nabla} = \overline{\Phi} + \frac{F}{s^2} - (m_1 + \frac{\kappa_1}{s}) \overline{\nabla}$ (2.2)

и подставим в уравнение (2.1). Имеем

$$\frac{\mathrm{d}^2\bar{\Phi}}{\mathrm{d}\eta^2} + \frac{\mathrm{i}}{\eta} \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\eta} - \mathrm{s}\bar{\Phi} = 0.$$
 (2.3)

Общее решение уравнения (2.3), ограниченное при $\eta = 0$, имеє вид

$$\Phi = C(s) I_0(\eta \sqrt{s}), \qquad (2.4)$$

где I₀ - функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента;

С (s) - произвольная функция.

Учитывая соотношения (2.2) из граничного условия (I.IO), получим, что

$$C(s) = \frac{1}{I_0(\sqrt{s})} \left[-\frac{F}{s} + (m_1 + \frac{\kappa_1}{s}) \bar{V} \right].$$
 (2.5)

Следовательно, решение уравнения (2.1) имеет вид

$$\overline{V} = \frac{I_0(\eta \sqrt{s}) - I_0(\sqrt{s})}{I_0(\sqrt{s})} \left[-\frac{F}{s^2} + (m_1 + \frac{\kappa_1}{s}) \overline{V} \right].$$
(2.6)

Подставляя найденную функцию ∨ в правую часть равенства (1.7) и интегрируя ее, получим

$$V = \frac{I_2(\sqrt{s})}{I_0(\sqrt{s})} \left[\frac{F}{s^2} - (m_4 + \frac{\kappa_4}{s}) \overline{V} \right].$$
 (2.7)

Из последнего равенства (2.7) вытекает, что

$$\overline{V} = \frac{F}{s^{2} \left[\frac{I_{0}(\sqrt{s})}{I_{2}(\sqrt{s})} + \left(m_{1} + \frac{\kappa_{1}}{s}\right) \right]}$$
(2.8)

Рассмотрим решение нашей задачи при малых и больших временах. Для вычисления средней скорости $V(\tau)$ при малых τ воспользуемся асимптотическим разложением изображения V при $s - \infty$.

Соответствующие разложения для функции Бесселя от мнимого аргумента имеют вид [4]

$$\begin{split} I_{0}(z) &\approx \frac{e^{z}}{\sqrt{2\pi z}} \Big[1 + \frac{1}{23} \frac{1}{z} + \frac{3^{2}}{2^{7}} \cdot \frac{1}{z^{2}} + \frac{3 \cdot 5^{2}}{2^{10}} \frac{1}{z^{3}} + \frac{3 \cdot 5^{2} \cdot 7^{2}}{2^{15}} \frac{1}{z^{4}} + \cdots \Big] \quad (2.9) \\ I_{2}(z) &\approx \frac{e^{z}}{\sqrt{2\pi z}} \Big[1 - \frac{3 \cdot 5}{2^{3}} \frac{1}{z} + \frac{3 \cdot 5 \cdot 7}{2^{7}} \frac{1}{z^{2}} + \frac{3^{2} \cdot 5 \cdot 7}{2^{10}} \frac{1}{z^{3}} + \frac{3^{3} \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11}{2^{15}} \frac{1}{z^{4}} + \cdots \Big] , \end{split}$$

откуда получим, что

$$\frac{I_0(\sqrt{s})}{I_0(\sqrt{s})} \approx 1 + \frac{2}{\sqrt{s}} + \frac{3}{s} + \frac{15}{4} \frac{1}{s\sqrt{s}} + \frac{15}{4} \frac{1}{s^2} + \cdots$$
 (2.10)

Подставляя это выражение в соотношение (2.8), имеем

$$\overline{V} = \frac{F}{1+m_4} \left(\frac{1}{S^2} + \frac{\alpha_4}{S^{5/2}} + \frac{\alpha_2}{S^3} + \frac{\alpha_3}{S^{7/2}} + \frac{\alpha_4}{S^4} + \cdots \right), \quad (2.II)$$

где

$$\begin{aligned} & x_{4} = -\frac{2}{(1+m_{4})^{2}}; \\ & x_{2} = \frac{4}{(1+m_{4})^{2}} - \frac{3+\kappa_{1}}{1+m_{4}}; \\ & x_{3} = -\frac{8}{(1+m_{4})^{3}} + \frac{4(3+\kappa_{4})}{(1+m_{4})^{2}} - \frac{15}{4(1+m_{4})}; \\ & x_{4} = \frac{16}{(1+m_{4})^{4}} - \frac{42(3+\kappa_{1})}{(1+m_{4})^{3}} + \frac{15+(3+\kappa_{1})^{2}}{(1+m_{4})^{2}} - \frac{15}{4(1+m_{4})}. \end{aligned}$$

$$(2.12)$$

Переходя в соотношении (2.II) к оригиналу, имеем

$$V(\tau) = \frac{F}{1+m_1} \left(\tau + \frac{4\alpha_1}{3\sqrt{\pi}} \tau^{3/2} + \frac{\alpha_2}{2} \tau^2 + \frac{8\alpha_3}{15\sqrt{\pi}} \tau^{5/2} + \frac{\alpha_4}{6} \tau^3 + \cdots \right) \cdot (2.13)$$

Рассмотрим теперь случай, когда t — ∞ · В этом случае надо рассматривать асимптотику s - 0. Так как

$$I_{0}(z) \approx 1 + \frac{z^{2}}{4} + \frac{z^{4}}{64} + \dots$$

$$I_{2}(z) \approx \frac{z^{2}}{8} + \frac{z^{4}}{96} + \frac{z^{6}}{3072} + \dots ,$$
(2.14)

TO

$$\frac{I_{0}(\sqrt{5})}{I_{2}(\sqrt{5})} \approx \frac{8}{5} + \frac{4}{3} + \dots$$
 (2.15)

$$\bar{l} \approx \frac{F}{s[(8 + \kappa_4) + (\frac{4}{3} + m_4)s]}$$
 (2.16)

Переходя в соотношении (2.16) к оригиналу, имеем выражение для средней скорости

$$V(\tau) = \frac{F}{8 + \kappa_1} \left[1 - e^{-\frac{8 + \kappa_1}{4/5 + m_1} \tau} \right].$$
 (2.17)

Распределение скоростей

Рассмотрим, как присутствие поплавка влияет на распределение скоростей по радиусу трубы. Для этого найдем оригинал изображения (2.6) для малых и больших скоростей.

Для малых τ , т.е. при s — ∞, изображение (2.6) может быть представлено с помощью разложения (2.9) в виде

$$v = \left[\frac{e^{(\eta-1)\gamma s}}{\sqrt{\eta}} \left(1 + \beta_4 \frac{1}{\sqrt{s}} + \beta_2 \frac{1}{s}\right) - 1\right] \cdot \left[-\frac{F}{s^2} + \left(m_4 + \frac{K_4}{s}\right)\overline{V}\right], \quad (3.1)$$

где

$$\beta_{1} = \frac{1 - \eta}{8\eta};$$

$$\beta_{2} = \frac{9 - 2\eta - 7\eta^{2}}{128\eta^{2}}.$$
(3.2)

Если подставить в правую часть равенства (3.1) асимптотическое разложение изображения средней скорости $\vec{\vee}$ (2.11) и ограничиться тремя первыми членами в разложении, то получим

$$V = \frac{F}{1+m_1} \left[\frac{1}{s^2} - \frac{m_4 \alpha_1}{s^{5/2}} - \frac{m_4 \alpha_2 + \kappa_4}{s^3} - \frac{e}{\sqrt{\eta}} \left(\frac{1}{s^2} + \frac{\chi_1}{s^{5/2}} + \frac{\chi_2}{s^3} \right) \right],$$
(3.3)

где

$$y_1 = \beta_1 - m_1 \alpha_1;$$

$$y_2 = \beta_2 - m_2 \alpha_2 - \kappa_2 - m_2 \alpha_2 \beta_2.$$
(3.4)

Оригинал изображения (3.3) можно найти, используя формулу [5]

$$\frac{1}{s^{1+n/2}}e^{-\kappa\sqrt{s}} \rightleftharpoons (4\tau)^{n/2}i^{n} erfc \frac{\kappa}{2\sqrt{\tau}}$$
(3.5)

где

$$\int_{x}^{n} \operatorname{enfc} z = \int_{x}^{\infty} i^{n-1} \operatorname{enfc} x dx \qquad (3.6)$$

кратные интегралы вероятностей, причем

при $n = 0, 1, 2, \ldots$ $\kappa > 0,$

$$i^{\circ}$$
erfcz = erfcz = $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\infty} e^{-x^2} dx$. (3.7)

Для распределения скоростей имеем выражение

$$\begin{split} V(\eta,\tau) &= \frac{F}{1+m_{4}} \Big[\tau - \frac{4m_{4}\alpha_{4}}{3\sqrt{\pi}} \tau^{3/2} - \frac{m_{4}\alpha_{2} + \kappa_{4}}{2} \tau^{2} - \\ &- \frac{4}{\sqrt{\eta}} \Big(4\tau i^{2} \text{enfc} \frac{4-\eta}{2\sqrt{\tau}} + 8\tau^{3/2} \chi_{4} i^{3} \text{enfc} \frac{1-\eta}{2\sqrt{\tau}} + \\ &+ 46\tau^{2} \chi_{2} i^{4} \text{enfc} \frac{4-\eta}{2\sqrt{\tau}} \Big) \Big] \,. \end{split}$$
(3.8)

Теперь рассмотрим случай, когда t - . Для этого используя асимптотическое выражение (2.14), (2.16), получим

 $V(\eta) = \frac{2F}{8+\kappa_1}(1-\eta^2).$ (3.9)

Литература

I. Руустал Э.А. Анализ динамических процессов в трубе с одиночным цилиндрическим телом. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1983, № 544, с. 47-53.

2. Е в д о к и м о в Л.И. Определение скорости движения цилиндрического тела по напорному трубопроводу в потоке жидкости. - Водный транспорт леса (Межвузовск. сб. науч. тр.). Красноярск, 1974, вып. 2, с. 222-228.

3. T o m i t a Y., J o t a k i T. Analysis of capsule pipeline system by the method of characteristics. - Bull. J.S.M.E., 1981, vol. 24, N 195, p. 1579-1585.

4. Ватсон Г.Н. Теория бесселевых функций. М., ИЛ, 1949.

5. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича и И. Стиган. М., Наука, 1979.

L. Ainola, U. Liiv

<u>Acceleration from the Rest of the Incompressible</u> Liquid together with a Cylindric Float in a Round Pipe

Summary

The paper describes the acceleration from the rest of a liquid together with a cylindric float. Due to the initial raise of the pressure gradient the float moves with the mean velocity of the accelerated water. The paper presents the solutions for determination of the mean velocity and velocity distribution after the float during the acceleration period.



₩ 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУЛЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УЛК 532.54.013.2

Э.А. Руустал

О РАЗГОННОМ ТЕЧЕНИИ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

В ШИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Решение некоторых конкретных задач течения сжимаемой жидкости в трубах на базе упрощенных дифференциальных уравнений приведено, например, в работах [1], [4].

В работе [4] приведены некоторые случаи движения жидкости в длинных трубопроводах.

В настоящей работе, применяя такую же методику, как И в работе [4], рассматривается задача течения жидкости B трубе с конечной длиной. Для начальной стадии движения жидкости найдено распределение скоростей и давления.

Движение сжимаемой жидкости в круглых трубах описывается следующими дифференциальными уравнениями [1]:

> $\rho \frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \Big(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \Big) ,$ (I) $\frac{\partial p}{\partial r} = 0,$ $\rho c^2 \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_n}{\partial p} + \frac{V_n}{p} \right) + \frac{\partial p}{\partial \tau} = 0, \quad \end{bmatrix}$

где Vz, Vp - составляющие скорости в направлении осей координат 2, р;

- р давление;
- Р ПЛОТНОСТЬ ЖИДКОСТИ;
- и коэффициент вязкости;
- С СКОрость звука в жидкости;
 - т время.

Если перейти к безразмерным координатам ξ, η, t и переменным че, ч, ч, при помощи соотношений

$$\xi = \frac{I}{L}, \quad \eta = \frac{r}{d}, \quad t = \frac{c\tau}{L} \qquad (d - panyc \tau pyo_{\rm H}), \quad L - dnuha \tau pyo_{\rm H}),$$

$$u_{\xi} = \frac{v_{z}}{\mu}, \quad u_{\eta} = \frac{Lv_{r}}{d\mu}, \quad q_{r} = \frac{p}{c\rho\mu},$$
$$\mathcal{S} = \frac{L\mu}{c\rho d^{2}},$$

то уравнения (I) принимают следующий вид:

$$\frac{\partial u_{\xi}}{\partial t} - \Im\left(\frac{\partial^2 u_{\xi}}{\partial \eta^2} - \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial u_{\xi}}{\partial \eta}\right) + \frac{\partial q}{\partial \xi} = 0, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial r} = 0,$$
 (3)

$$\frac{\partial u_{\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial u_{\eta}}{\partial \eta} + \frac{u_{\eta}}{\eta} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0.$$
(4)

Рассмотрим следующие начальные и граничные условия:

Если обозначить

$$w = 2 \int u_{\xi} \eta d\eta$$
,

то уравнение (4) принимает вид

$$\frac{\partial W}{\partial \xi} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0 . \tag{4.}$$

Применяя преобразование Лапласа к уравнениям (2), (3), (4[•]) и к граничным условиям (6) и решив полученную задачу, получим

$$W(\xi,s) = q_0 \frac{1}{\chi(s)} \cdot \frac{ch[\chi(s)\xi]}{sh\chi(s)} , \qquad (7)$$

$$Q_{\varepsilon}(\xi,s) = \frac{q_{0}}{s} - \frac{q_{0}}{s} \cdot \frac{sh\left[\chi(s)\xi\right]}{sh\chi(s)}, \qquad (8)$$

$$U_{\xi}(\xi,\eta,s) = q_{0} \frac{\chi(s)}{s} \left[1 - \frac{I_{0}(\eta \sqrt{\frac{s}{2\varepsilon}})}{I_{0}(\sqrt{\frac{s}{2\varepsilon}})} \right] \cdot \frac{ch[\chi(s)\xi]}{sh\chi(s)}, \quad (9)$$

$$U_{\eta}(\xi,\eta,s) = q_{0} \frac{I_{1}(\eta\sqrt{\frac{s}{2e}}) - \eta I_{1}(\sqrt{\frac{s}{2e}})}{\sqrt{\frac{s}{2e}} \cdot I_{2}(\sqrt{\frac{s}{2e}})} \cdot \frac{sh[\chi(s)\xi]}{sh\chi(s)}, \qquad (10)$$

где W, Q, U_ξ, U_η – преобразования Лапласа функций w, q, u_ξ, u_η соответственно

$$\zeta(s) = s \sqrt{\frac{I_{o}\left(\sqrt{\frac{s}{2e}}\right)}{I_{2}\left(\sqrt{\frac{s}{2e}}\right)}}$$

На основании известных свойств преобразования Лапласа [3] асимптотическое поведение оригинала при t-0 определяется поведением изображения при s-∞.

Для изучения поведения W, Q, U_ξ, U_η при больших s используем асимптотическое разложение функций Бесселя от мнимого аргумента [2].

Довольно просто получаются следующие разложения:

$$\frac{ch[\chi(s)\xi]}{sh\chi(s)} = \sum_{i} e \times p[-x_i\chi(s)] + \sum_{j} e \times p[-x_j\chi(s)], \quad (II)$$

$$\frac{h[\langle (s) \xi]}{sh \langle (s) \rangle} = \sum_{i} e \times p \left[-x_{i} \langle (s) \right] - \sum_{j} e \times p \left[-x_{j} \langle (s) \right], \quad (12)$$

где

$$x_i = 2i + 1 - \xi; \quad x_j = 2j + 1 + \xi;$$

$$\chi(5) = \Im \left[\frac{5}{\Im^2} + \left(\frac{5}{\Im^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 + \frac{7}{8} \left(\frac{\Im^2}{5} \right)^{\frac{4}{2}} + \frac{4}{2} \left(\frac{\Im^2}{5} \right) - \frac{41}{428} \left(\frac{\Im^2}{5} \right)^{\frac{3}{2}} + \dots \right], \quad (I3)$$

$$\exp\left[-x_{i}\left\{\left(s\right)\right]\right] = \exp\left(-x_{i}s\right) \cdot \exp\left(-x_{i}\sqrt{\vartheta}\cdot\sqrt{s}\right) \cdot \left[a_{4}+a_{2}\left(\frac{\vartheta}{s}\right)^{\frac{4}{2}}+a_{3}\left(\frac{\vartheta}{s}\right)+a_{4}\left(\frac{\vartheta}{s}\right)^{\frac{3}{2}}+\ldots\right], \quad (14)$$

где

где

N

$$1 - \frac{I_0(\eta \sqrt{\frac{5}{2\ell}})}{I_0(\sqrt{\frac{5}{2\ell}})} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\eta}} \exp\left[-\frac{1-\eta}{\sqrt{2\ell}} \cdot \sqrt{5}\right] \left[1 + \frac{1-\eta}{8\eta} \cdot \frac{2\ell}{5} + \frac{(1-\eta)(7\eta+9)}{2^7 \cdot \eta^2} \left(\frac{2\ell}{5}\right)^2 + \dots\right]. (I6)$$

Используя разложения (II) - (I6), получим

$$W(\xi,s) = q_o \sum_i \overline{\phi}_{w,i}(\xi,s) \exp(-x_i s) + q_o \sum_j \overline{\phi}_{w,j}(-\xi,s) \exp(-x_j s), \quad (I7)$$

Fige

$$\overline{\varphi}_{\mathsf{w},\mathsf{i}}(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{s}) = \exp\left(-x_{\mathsf{i}}^{2}\boldsymbol{\mathscr{B}}\right) \cdot \exp\left[-x_{\mathsf{i}}^{2}\sqrt{\boldsymbol{\mathscr{B}}}\sqrt{\boldsymbol{\mathscr{S}}}\right] \cdot \left(\frac{c_{1}}{s} + \frac{c_{2}}{s^{3/2}} + \frac{c_{3}}{s^{2}} + \cdots\right);$$

$$U_{\xi}(\xi,\eta,s) = q_{o} \sum_{i} \overline{\varphi}_{\xi,i}(\xi,\eta,s) \exp(-x_{i}s) + q_{o} \sum_{j} \overline{\varphi}_{\xi,j}(-\xi,\eta,s) \exp(-x_{j}s), \quad (18)$$

где

$$\overline{\varphi}_{\xi,i}(\xi,\eta,s) = \exp(-x_i \varkappa) \left[\exp(-x_i \sqrt{3\varepsilon} \sqrt{s}) \left(\frac{d_1}{s} + \frac{d_2}{s^{3/2}} + \frac{d_3}{s^2} + \ldots \right) - \frac{1}{\sqrt{\eta}} \exp\left(-\frac{1-\eta + x_i \varkappa}{\sqrt{3\varepsilon}} \sqrt{s} \right) \left(\frac{d_1'}{s} + \frac{d_2'}{s^{3/2}} + \frac{d_3'}{s^2} + \ldots \right) \right];$$

$$Q(\xi,s) = \frac{q_o}{s} - q_o \sum_i \overline{\varphi}_{a,i}(\xi,s) \exp(-x_i s) + q_o \sum_j \overline{\varphi}_{a,j}(-\xi,s) \exp(-x_j s), \quad (19)$$

где

$$\overline{\varphi}_{Q,i}(\xi,s) = \exp\left(-x_i \,\mathscr{H}\right) \cdot \exp\left(-x_i \sqrt{\mathscr{H}} \sqrt{s}\right) \left(\frac{f_1}{s} + \frac{f_2}{s^{3/2}} + \frac{f_3}{s^2} + \dots\right).$$

Kosųų́ų ициенты c_i, d_i, d_i, f_i выражаются через a_i и b_i
c₁ = b₁ a₁ %, d₁ = a₁,
c₂ = (b₁a₂+b₂a₁) %^{3/2}, d₂ = (a₁+a₂)
$$\sqrt{2e}$$
,
c₃ = (b₁a₃+b₂a₂) %², d₃ = (a₁+a₂+a₃) %,
.....,,,
d'₁ = a₁,
d'₂ = ($\frac{1+7n}{8n}$ a₁+a₂) $\sqrt{3e}$,
d'₃ = ($\frac{105n^2+14n+9}{2^7n^2}$ a₁ + $\frac{1+7n}{8n}$ a₂+a₃) %,
....,
f₁ = a₁, f₂ = a₂ $\sqrt{3e}$; f₃ = a₃ %,

Для нахождения оригиналов пользуемся следующими операционными формулами [2]:

$$\frac{e^{-\kappa v_{5}}}{s^{4} + \frac{n}{2}} \approx (4t)^{\frac{n}{2}} \cdot i^{n} \operatorname{erfc} \frac{\kappa}{2\sqrt{t}}, n = 0, 1, 2, \dots,$$

$$i^{-1} \operatorname{erfc} \frac{\kappa}{2\sqrt{t}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\kappa^{2}}{4t}};$$

$$i^{0} \operatorname{erfc} \frac{\kappa}{2\sqrt{t}} = \operatorname{erfc} \frac{\kappa}{2\sqrt{t}};$$

$$i^{n} \operatorname{erfc} \frac{\kappa}{2\sqrt{t}} = -\frac{\kappa}{2n\sqrt{t}} i^{n-4} \operatorname{erfc} \frac{\kappa}{2\sqrt{t}} + \frac{1}{2n} i^{n-2} \operatorname{erfc} \frac{\kappa}{2\sqrt{t}},$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

где

Введем следующие обозначения

$$\begin{array}{l} \displaystyle \frac{\mathrm{e}^{-\kappa\sqrt{s}}}{s} \coloneqq \mathrm{erfc} \; \frac{\kappa}{2\sqrt{t}} = \mathrm{e}_{1}(\kappa,t) \; , \\ \\ \displaystyle \frac{\mathrm{e}^{-\kappa\sqrt{s}}}{s^{3/2}} \coloneqq 2\sqrt{t} \left(-\frac{\kappa}{2\sqrt{t}} \; \mathrm{erfc} \; \frac{\kappa}{2\sqrt{t}} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \; \mathrm{e}^{-\frac{\kappa^{2}}{4t}}\right) = \mathrm{e}_{3/2}(\kappa,t) \; , \\ \\ \displaystyle \frac{\mathrm{e}^{-\kappa\sqrt{s}}}{s^{2}} \coloneqq 4t \left(\frac{\kappa^{2}+2t}{8t} \; \mathrm{erfc} \; \frac{\kappa}{2\sqrt{t}} - \frac{\kappa}{4\sqrt{\pi t}} \mathrm{e}^{-\frac{\kappa^{2}}{4t}}\right) = \mathrm{e}_{2}(\kappa,t) \; , \end{array}$$

Окончательно получим для оригиналов следующие формулы:

$$w(\xi,t) = q_{0} \sum_{i} \varphi_{w,i} (\xi,t-x_{i}) H(t-x_{i}) + q_{0} \sum_{j} \varphi_{w,j} (-\xi,t-x_{j}) H(t-x_{j}), (20)$$

rge

$$\varphi_{w,i} (\xi,t) = e \times p(-x_{i} \cdot e) [c_{1} \cdot e_{1} (x_{i} \sqrt{3e}, t) + c_{2} e_{30} (x_{i} \sqrt{3e}, t) + c_{3} \cdot e_{2} (x_{i} \sqrt{3e}, t) + \dots];$$

H(t) - единичная функция Хевисайда;

$$u_{\xi}(\xi,\eta,t) = q_{0} \sum_{i} \varphi_{\xi,i}(\xi,\eta,t-x_{i}) H(t-x_{i}) + q_{0} \sum_{j} \varphi_{\xi,j}(-\xi,\eta,t-x_{j}) H(t-x_{j}), (2I)$$

где

$$\begin{split} \varphi_{\xi,i}(\xi,\eta,t) &= \exp\left(-x_{i} \mathscr{R}\right) \left\{ d_{4} e_{4}(x_{i} \sqrt{\mathscr{R}},t) + d_{2} e_{3/2}(x_{i} \sqrt{\mathscr{R}},t) + \right. \\ & \left. + d_{3} e_{2}(x_{i} \sqrt{\mathscr{R}},t) + \ldots - \frac{1}{\sqrt{\eta}} \left[d_{4}^{\prime} e_{4} \left(\frac{1-\eta + x_{i} \mathscr{R}}{\sqrt{\mathscr{R}}},t \right) + \right. \\ & \left. + d_{2}^{\prime} e_{3/2} \left(\frac{1-\eta + x_{i} \mathscr{R}}{\sqrt{\mathscr{R}}},t \right) + d_{3}^{\prime} e_{2} \left(\frac{1-\eta + x_{i} \mathscr{R}}{\sqrt{\mathscr{R}}},t \right) + \ldots \right] \right\}; \end{split}$$

$$q_{i}(\xi,t) = q_{o} - q_{o} \sum_{i} \phi_{Q,i}(\xi,t-x_{i}) H(t-x_{i}) + q_{o} \sum_{j} \phi_{Q,j}(-\xi,t-x_{j}) H(t-x_{j}), \quad (22)$$

где
$$\varphi_{Q_{i}}(\xi,t) = \exp(-x_{i} \gg) \left[f_{1}e_{1}(x_{i}\sqrt{x},t) + f_{2}e_{3/2}(x_{i}\sqrt{x},t) + f_{3}e_{2}(x_{i}\sqrt{x},t) + \dots\right].$$

При фиксированной паре значений 5, t каждая из сумм в формулах (20), (21), (22) содержит только конечное число слагаемых, причем

$$i < \frac{1}{2}(t-1+\xi)$$
 M $j < \frac{1}{2}(t-1-\xi)$.

Если η=0 или η-0, то вместо разложения (16) получим

$$\begin{split} 1 &- \frac{I_0(\gamma \sqrt{\frac{5}{2e}})}{I_0(\sqrt{\frac{5}{2e}})} \approx 1 - \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[6]{3e}} e^{-\sqrt{\frac{5}{5e}}} \left(\sqrt[6]{4} - \frac{\sqrt{2e}}{2^3} \cdot \frac{1}{5^{1/4}} - \frac{7}{2^7} \cdot \frac{1}{5^{3/4}} - \frac{59 \times ^{3/2}}{2^{10}} \cdot \frac{1}{5^{5/4}} - \dots \right) \,. \end{split}$$

Вместо формулы (21) будем иметь

$$\begin{split} u_{\xi}(\xi,0,t) &= q_{0} \sum_{i} \Phi_{i}(\xi,t-x_{i}) H(t-x_{i}) + q_{0} \sum_{j} \Phi_{j}(-\xi,t-x_{j}) H(t-x_{j}), \\ \text{где} \ \Phi_{i}(\xi,t) &= \exp(-x_{i} \varkappa) \Big\{ d_{4} e_{4}(x_{i} \sqrt{\varpi},t) + d_{2} e_{3/2}(x_{i} \sqrt{\varpi},t) + \\ &+ d_{3} e_{2}(x_{i} \sqrt{\varpi},t) + \dots - \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\sqrt{2\pi}}} \Big[g_{4} h_{0}(\frac{1+x_{i} \varkappa}{\sqrt{\varpi}},t) + \\ &+ g_{2} h_{1}(\frac{1+x_{i} \varkappa}{\sqrt{\sqrt{2\pi}}},t) + g_{3} h_{2}(\frac{1+x_{i} \varkappa}{\sqrt{\varpi}},t) + \dots \Big] \Big\} ; \\ g_{1} &= d_{4}, \\ g_{2} &= -\frac{d_{4} \varkappa}{2^{3}} + d_{2}; \\ g_{3} &= -\frac{7 d_{4} \varkappa}{2^{7}} - \frac{d_{2} \sqrt{\varkappa}}{2^{3}} + d_{3}; \\ &\dots \dots \dots \dots \end{pmatrix} ; \\ h_{r}(\kappa,t) &= \sqrt{\frac{7}{\pi}} (2t)^{-\frac{1}{4} + \frac{r}{2}} \exp(-\frac{\kappa^{2}}{8t}) D_{-\frac{1}{2} - r}(\frac{\kappa}{2\sqrt{t}}), \\ r &= 0, 1, 2, \dots, \\ D_{\nu}(z) - \varphi y HKIIMA Bedepa [2]. \\ & I \text{ и тература} \end{split}$$

I. Айнола Л.Я., Лийв У.Р. Обучете сжимаемости при неустановившемся движении жидкости в трубах. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1978. № 445. с. 45-52.

2. Абрамович М., Стигал И. Справочник по специальным функциям. М., Наука, 1979. 832 с.

З. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. М., Наука, 1965. 207 с.

4. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М., Наука, 1975. 296 с.

E. Ruustal

Über den Anlauf der Strömung der zu komprimierenden Flüssigkeit in einem Zylinderförmigen Rohr

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Strömung der zu komprimierenden Flüssigkeit in einem zylinderförmigen Rohr von endlicher Länge betrachtet. Die Aufgabe wird mit Hilfevereinfachter Differentialgleichungen gelöst, wobei die Laplace-Transformation verwendet wird. Für die Geschwindigkeiten und den Druck am Beginn des Prozesses hat man asymptotische Formeln bekommen.



₩ 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.542.2 Э.Г. Каск

(I)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ЗАДАННОЙ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ В ТРУБОПРОВОДАХ

В гидроустановках при проектировании и эксплуатации водопроводов и при выборе оборудования учет фактора повышения давления является весьма существенным.

Большинство авторов, занимающихся вопросами повышения давления при нестационарном движении жидкости в трубопроводе, исходят из одного и того же принципа определения амплитуды повышения давления, а именно из общего решения Н.Е. Жуковского для идеальной жидкости. В расчетной практике для простых неразветвленных трубопроводов до сего времени исходят из предположения, что сила напора изменяется пропорционально квадрату скорости (расхода). Вязкость и потери напора на трение принимаются равными нулю.

Проведенные нами опыты в лаборатории гидравлики ТПИ показали, что максимальная амплитуда давления при нестационарном течении жидкости в трубопроводах при ускоренном движении воды из состояния покоя появляется в начале процесса, когда структура потока еще нетурбулентная и имеет почти равномерное распределение скорости.

Учитывая последний факт, расчетная модель для определения амплитуды давления при нестационарном течении жидкости в трубе должна учитывать потери напора на трение.

При отсутствии внешних объемных сил ламинарное течение описывается следующей линеаризованной системой [1].

$$\label{eq:phi} \begin{split} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + 2\alpha \rho \, V &= 0 \,, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + c^2 \rho \, \frac{\partial V}{\partial x} &= 0 \,, \end{split}$$

I9

где V - средняя скорость;

р - давление;

продольная координата трубопровода;

t - время;

- р плотность жидкости;
- с скорость распространения ударного давления в жидкости.

Здесь

$$2q = \frac{32\nu}{d^2}, \qquad (2)$$

где d - диаметр трубы;

у - коэффициент вязкости.

Если ввести в уравнение (I) безразмерные величины ξ , $\tau,\,V_{\xi},\,q$ по формулам

$$\begin{aligned} x &= L\xi, \quad t = \frac{L}{c}\tau, \\ V &= UV_{\xi}, \quad p &= c\rho Uq, \end{aligned}$$
 (3)

где L - длина трубы;

U - характерная скорость,

и обозначить $\alpha = \frac{2\alpha L}{C}$; то уравнения (I) можно переписать в безрезмерном виде

$$\frac{\partial V_{\xi}}{\partial \tau} + \frac{\partial q}{\partial \xi} + \alpha V_{\xi} = 0 , \qquad (4)$$

$$\frac{\partial V_{\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial q}{\partial \tau} = 0 .$$

Ниме приводится решение уравнения (4) при следующих начальных к краевых условиях:

$$V_{\xi}(\xi,0) = q_{\xi}(\xi,0) = 0 \quad \text{при } \tau = 0,$$

$$V_{\xi} = V_{\xi}^{*}(\tau) \quad \text{при } \xi = 0, \quad (5)$$

$$q_{\xi} = 0 \quad \text{при } \xi = 1.$$

После замены неизвестной функции суммой

$$I_{\xi} = V_{\xi}^{*}(\tau) + V(\xi, \tau)$$
 (6)

уравнение (4) принимает вид

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + \frac{\partial q}{\partial \xi} + \alpha V = -\frac{\partial V_{\xi}}{\partial \tau} - \alpha V_{\xi}^{*}, \qquad (7)$$
$$\frac{\partial V}{\partial \xi} + \frac{\partial q_{\xi}}{\partial \tau} = 0.$$

Начилие и краевые условия

$$V(\xi,0) = q(\xi,0) = 0$$
 mpm $\tau = 0$,

$$V = 0$$
 при $\xi = 0$,
 $q = 0$ при $\xi = 1$.

Обозначив правую часть первого уравнения из системы (7)

$$f(\tau) = -\frac{\partial V_{\xi}^{*}}{\partial \tau} - \alpha V_{\xi}^{*}(\tau), \qquad (9)$$

записываем уравнение (7) в виде

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + \frac{\partial V}{\partial \xi} + \alpha V = f(\tau), \qquad (10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \xi} + \frac{\partial q}{\partial \tau} = 0.$$

Рассмотрим сначала однородную систему

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} + \alpha V = 0 , \qquad (II)$$

решение которой будем искать в выде

$$V = X_{q}(\xi) T_{q}(\tau), \qquad (12)$$

$$q = X_{q}(\xi) T_{q}(\tau).$$

Подставне уравнення (I2) в уравнення (II), получим систему уравнений

$$\begin{aligned} X_{v}T_{v}' + X_{q}'T_{q} + \alpha X_{v}T_{v} = 0 , \\ X_{v}'T_{v} + X_{q}T_{q}' = 0 , \end{aligned} \tag{13}$$

где T' и X' - производные по соответствущим переженным.

После применения отношения

$$\frac{T_{v'+\alpha}T_{v}}{T_{q}} = -\frac{X_{q}}{X_{v}} = \varepsilon$$

$$\frac{T_{q'}T_{q}}{T_{v}} = -\frac{X_{v}}{X_{q}} = -\varepsilon_{1}$$

инсем две системы уравнений

$$\begin{aligned} \chi'_{q_{y}} + \varepsilon \chi_{v} &= 0 \\ \chi'_{v} - \varepsilon_{t} \chi_{q} &= 0 \\ T'_{v} + \alpha T_{v} - \varepsilon T_{q} &= 0 \\ T'_{q_{y}} + \varepsilon_{t} T_{v} &= 0 \end{aligned}$$
(14)

из которых можно получить уравнение

$$\chi_{q_{\mu}}^{\mu} + 2\epsilon^{2}\chi_{q_{\mu}} = 0, \qquad (15)$$
$$\chi_{q_{\mu}}^{2} = \epsilon\epsilon_{\mu}.$$

FRE

Общее решение полученного уравнения (15) выразим в ви-

де

$$C_q = C_1 \sin \Re \xi + C_2 \cos \Re \xi . \tag{16}$$

Из системы уравнений (14) получим общее решение для

Xv

$$X_{v} = -\sqrt{\frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon}} (c_{1} \cos \varkappa \xi - c_{2} \sin \varkappa \xi).$$
 (17)

При помощи краевых условий

c. - 0 .

 $\begin{array}{l} X_v = 0 \ , \ \ \xi = 0 \ , \\ X_{q_{\rm s}} = 0 \ , \ \ \xi = 1 \end{array} ,$

определим постоянные интегрирования

$$c_2 \cos 2\ell = 0$$
, $2\ell_{\kappa} = \frac{2\kappa - \ell}{2}\pi \cdot (\kappa = 1, 2, ...)$.

После этого общие уравнения (16) и (17) принимают вид:

$$X_{VK} = -\sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon}} c_2 \sin \Re_K \xi$$

$$X_{0K} = c_2 \cos \Re_K \xi.$$

Вернемся к неоднородной системе (IO) и будем искать функции V и q, в виде рядов

$$V = \sum_{k=1}^{\infty} Y_{Vk}(\tau) \sin \varkappa_{k} \xi , \qquad (I8)$$
$$q_{\gamma} = \sum_{k=1}^{\infty} Y_{q_{\gamma}}(\tau) \cos \varkappa_{k} \xi .$$

Подставив систему уравнений (18) в уравнения (10) получим

$$\sum_{\kappa=1}^{\infty} (Y'_{\nu\kappa} - \mathcal{H}_{\kappa} Y_{q,\kappa} + \alpha Y_{\nu q}) \sin \mathcal{H}_{\kappa} \xi = f'(\tau') ;$$

$$\sum_{\kappa=1}^{\infty} (\mathcal{H}_{\kappa} Y_{\nu\kappa} + Y'_{q,\kappa}) \cos V_{\kappa} \xi = 0.$$
(19)

Дальше умножим первое из уравнений (19) на sin ж_еξ, второе на созж_еξ и проинтегрируем по ξ от 0 до I, получим

$$\mathfrak{S}_{\kappa} Y_{\nu\kappa}' - \mathfrak{S}_{\kappa}^{2} Y_{q\kappa} + \mathfrak{s}_{\kappa} \mathfrak{S}_{\kappa} Y_{\nu\kappa} = 2 f(\tau),$$

$$\mathfrak{S}_{\nu\kappa} + Y_{q\kappa}' = 0,$$

$$(20)$$

отсюда

$$Y_{q_{\kappa}}^{\prime\prime} + \alpha Y_{q_{\kappa}}^{\prime} + \mathfrak{d}_{\kappa}^{2} Y_{q_{\kappa}} = -2f(\tau).$$
 (21)

Начальными условиями для уравнения (21) являются

$$Y_{q,\kappa}(0) = Y'_{q,\kappa}(0) = 0.$$
 (22)

Решение задачи Коши (21) и (22) представляется в виде

$$Y_{q\kappa} = -\tilde{Y}_{q\kappa}(0)e^{-\frac{\alpha}{2}\tau} \left[\cos\beta_{\kappa}\tau + \frac{1}{\beta_{\kappa}}\frac{\alpha}{2}\sin\beta_{\kappa}\tau\right] - \tilde{Y}_{q\kappa}(0)e^{-\frac{\alpha}{2}\tau}\frac{1}{\beta_{\kappa}}\sin\beta_{\kappa}\tau + \tilde{Y}_{q\kappa}(\tau), \qquad (23)$$

где

Подставив полученное выражение для коэффициентов во второй из рядов (18), получим формулу для искомого безразмерного давления

 $\beta_{\kappa} = \sqrt{\partial e_{\kappa}^2 - \frac{\alpha^2}{4}}$.

$$q = \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left\{ -\tilde{Y}_{q\kappa}(0) e^{-\frac{\alpha}{2}\tau} \left[\cos \beta_{\kappa}\tau + \frac{1}{\beta_{\kappa}} \frac{\alpha}{2} \sin \beta_{\kappa}\tau \right] - \tilde{Y}_{q\kappa}'(0) e^{-\frac{\alpha}{2}\tau} \frac{1}{\beta_{\kappa}} \sin \beta_{\kappa}\tau + \tilde{Y}_{q\kappa}(\tau) \right\} \cos \vartheta \epsilon_{\kappa} \xi.$$
(24)

Неизвестные коэффициенты $\tilde{Y}_{q,k}(0)$ и $\tilde{Y}'_{q,k}(0)$ можно определить следующим образом: разложим заданную функцию $V^*_{\xi}(\tau)$ в стеленной ряд

$$V_{\xi}^{*}(\tau) = \sum_{s=0}^{n+4} q_{s} \tau^{s} , \qquad a_{0} = 0 ,$$

а $f(\tau)$ представим в виде

$$f(\tau) = \sum_{s=0}^{n} b_{s} \tau^{s}, \qquad (25)$$

где коэффициент в_s определяется из уравнения (9) по формуле b - - с с - (s + 1) с + 1

$$b_s = -\alpha a_s - (s+1) a_s + 1.$$

Найдем частные решения $\tilde{Y}_{q,\kappa}(\tau)$ уравнения (23) также в виде отрезка степенного ряда

$$\widetilde{Y}_{q,\kappa} = \sum_{s=0}^{n} c_{\kappa s} \tau^{s}.$$
(26)

Подставив ряды (25) и (26) в уравнение (21)

$$\sum_{k=1}^{n} \left[s(s-1) c_{ks} \tau^{s-2} + \alpha s c_{ks} \tau^{s-4} + 3e_{k}^{2} c_{ks} \tau^{s} \right] = -2 \sum_{s=1}^{n} b_{s} \tau^{s},$$

получим рекуррентные соотношения для коэффициентов

$$c_{\kappa_{4}n} = \frac{1}{3\ell_{\kappa}^{2}} (-2\delta_{n}) ,$$

$$c_{\kappa_{4}n-4} = \frac{1}{3\ell_{\kappa}^{2}} (-2\delta_{n-4} - \alpha nc_{\kappa n}) .$$



$$c_{k_{1}}n - m = \frac{1}{2\ell_{k}^{2}} \left[-2\delta_{n-m} - \alpha(n-m+1)c_{k_{1}}n - m+1 - (27) - (n-m+2)(n-m+1)c_{k_{1}}n - m+2 \right], \quad m = 2,3...n.$$

Из соотношения (26) получим

$$\begin{split} & \widetilde{Y}_{q,\kappa}(0) = c_{\kappa 0} , \\ & \widetilde{Y}'_{q,\kappa}(0) = c_{\kappa 1} , \end{split}$$

где с_{ко} и с_{ки} определяются с помощью формулы (27). Подставив выражения (26) и (28) в уравнение (24), для безразмерного давления окончательно получим

$$q_{\mu} = \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left\{ -c_{\kappa 0} e^{-\frac{\alpha}{2}} \left[\cos \beta_{\kappa} \tau + \frac{1}{\beta_{\kappa}} \frac{\alpha}{2} \sin \beta_{\kappa} \tau \right] - c_{\kappa 4} e^{-\frac{\alpha}{2} \tau} \frac{1}{\beta_{\kappa}} \sin \beta_{\kappa} \tau + \sum_{s=0}^{n} c_{\kappa s} \tau^{s} \right] \cos \varkappa_{\kappa} \xi .$$
(29)

Для расчета безразмерного давления по формуле (29) была составлена программа на языке ФОРТРАН и проведены вычисления на ЭВМ ЕС-1022.

Для иллюстрации подученных результатов по расчету повышения давления на фиг. I приведен вычисленный по уравнению (29) и по формуле (3) график $P_{pdc4} = f(t)$, а также график $P_{onbir} = f(t)$, полученный при экспериментальном исследовании движения воды из состояния покоя в трубе d = I0 мм. Экспериментальная установка описана в работе [2]. График $\frac{dV}{dt}$ получен при помощи графической обработки кривой V = = f(t).

Результаты сравнения расчетных и измеренных величин давления показывают, что расхождение не превышает ±5 %. Аналогичные результаты были получены и в условиях других опытов. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанная нами математическая модель полностью удовлетворяет требованиям инженерных расчетов некоторых трубопроводов в режиме нестационарного течения жидкости в трубе.

Литература

I. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М., Недра. 1975. 2. Каск Э.Г., Лийв У.Р. Опытная установка для исследования пульсирующих режимов течения жидкости. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1971, № 309, с. 121-124.

E. Kask

Die Untersuchung der Druckerhöhung in der instatsionären Rohrströmung

Zusammenfassung

Dieser Artikel enthält ein mathematisches Modell, das die Druckerhöhung in Rohrströmung, die aus dem Ruhezustand in Bewegung versetzten Rohrströmung, beschreibt. Anschliessend werden die experimentellen Ergebnisse mit den theoretischen Behauptungen gegenübergestellt. ₩ 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.543

Т.А. Коппель

СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В СЛОЕ СМЕЩЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В данной работе анализируется обмен кинетической энергии турбулентности между вихрями различных размеров в слое смещения, возникающей между отрывным вихрем и основным течением в канале с открытой поверхностью при отрыве нестационарного течения.

Введение

Во многих гидродинамических задачах при отрыве течения возникает слой смешения между отрывным вихрем и основным течением. При математическом моделировании отрыва течения большое значение имеют процессы переноса энергии в слое смешения, которая по своему характеру есть отдельное нестационарное явление. Большинство работ по отрывным течениям посвящены исследованиям, где основные характеристики течения являются стационарными. Относительно мало исследованы нестационарные отрывные течения, при этом основная часть из них посвящена исследованию отрыва потока от разных твердых тел в жидкости.

В слое смещения происходит интенсивный обмен кинетической энергии между вихрями разных масштабов. При нестационарном течении турбулентность имеет определенную инерцию и спектры могут намного отличаться от спектров стационарного развитого течения [I, 2]. Здесь необходимо также учитывать, что при нестационарных течениях турбулентность возникает при числах Рейнольдса, которые намного отличаются от величины стационарного течения. Переход ламинарного течения в турбулентное при ускорении движения из состояния покоя в круглой гидравлической гладкой трубе происходит при числе Рейнольдса, превосходящем критическое число Рейнольдса стационарного течения на два порядка [3].

Спектральный анализ в слое смешения проведен в немногих работах, например, [4, 5]. Оцениваются качественно частоты, которые имеют максимальную энергию при отрыве воздушного потока, и последующий процесс усиления этих возмуцений в слое смешения.

Проведение экспериментов и основы расчета

Экспериментальные исследования и последующая обработка результатов, приведенных в данной статье, выполнены автором статьи в Дельфтском техническом университете в лаборатории механики жидкости [6]. Компоненты скоростей и и v (соответственно по направлению течения и перпендикулярно течению) измерялись 2-компонентной ДДИС типа TPD-1077/2M. Последующая обработка результатов проводилась на вычислительной машине AMDAHL -470 V.

Эксперименты были проведены в открытом лотке из органического стекла. В начале опыта вода находилась в лотке в покое и нестационарность течения создавалась изменением расхода Q. по закону полусинуса (ускорение и замедление течения). Продолжительность опыта была T = 90 с и максимум расхода Q_m = 16 л/с. Расширение канала и профили измерения в слое смещения указаны на фиг. I.



Фиг. 1.

28

До начала опыта глубина воды в канале составляла 10,9 см. Последующие оценки спектрального распределения энергии получены на глубине потока 6,6 см в разных профилях «» измерений.

Для расчета спектрального распределения энергий была использована методика, приведенная в работах [I, 2]. Основой является метод ансамбля [6], при этом осреднение в больпинстве случаев проводилось по I5 реализациям скоростей, измеренным в одной измерительной точке с постоянными конечными и начальными условиями.

Учитывая продолжительность опыта T = 90 с, можно брать короткие временные отрезки 2,56 с, где реализация скорости считается стационарной. Поэтому в определенные моменты времени из всех измерений в данной точке принимаются отрезки реализации скоростей и рассчитываются спектры с последующим осреднением по методу ансамбля.

Нельзя забывать, что реализации скоростей являются нестационарными, поэтому по такой методике относительно спектрал. ного распределения энергии турбулентности можно делать только качественные выводы, с количественными же выводами нужно быть осторожнее (расчет микро- и макромасштабов турбулетности).

Перед расчетом спектров на вычислительной машине из реализаций скоростей ч и v методом наименьших квадратов были исключены средние компоненты как линейные тренды [], 2]. Производилась перед записью также фильтрация сигналов по частоте Котельникова 25 Гц (запись с частотой 50 Гц).

Для расчетов на вычислительной машине были применены стандартные подпрограммы из библиотек программ NAGLIB и IMSL. Спектральные плотности рассчитывались методом быстрого преобразования Фурье (БПФ), используя подпрограммы FTEPS из библиотеки стандартных программ IMSL, которое рассчитывает спектральные плотности и взаимный спектр двух временных рядов. Результат расчета определяется математически следующим образом:

$$X_{\kappa_{+4}} = \sum_{j=0}^{L-1} x_{j+4} \cdot \exp(2\pi i j \kappa / L),$$
 (I)

где $\kappa = 0, 1 \dots L - 1; i = \sqrt{-1}$.



Фиг. 2.

30



Фиг. 3.

Вместе с подпрограммой FTFPS используется симметричное окно

$$W(j) = 1 - \left| \frac{j - \frac{L-1}{2}}{\frac{L+1}{2}} \right|, \quad j = 0, 1, \dots L-1.$$
(2)

После расчета сегменты N/L из разных опытов по методу ансамбля осредняются и шкалируются (результат в квадрате). Результирующие спектральные оценки получаются для частот

$$f_i = \frac{i - 1}{L \cdot \Delta t}, \qquad (3)$$

где Δt интервал времени между отсчетами ($\Delta t = 0,02$ с). В конце расчетов спектральные оценки нормализуют с дисперсией компонента скоростей соответственно.

Результаты исследования

Исследования турбулентности показывают, что происходит непрерывный обмен энергии между вихрями разных масштабов.Известно, что в стационарных развитых течениях кинетическая энергия переходит от больших вихрей на более маленькие без потерь, и, наконец, диссипируется благодаря вязкости из самых меньших вихрей. При нестационарном течении можно видеть и противоположные процессы, т.е. слияние больших вихрей из более маленьких.

Во-первых, рассмотрим спектры после расширения канала в профиле A, где возникает отрыв потока и начинается генерация слоя смешения вниз по течению. На фиг. 2 для скорости и и на фиг. 3 для скорости и в разные моменты времени развития отрыва (продолжительность опыта 90 с).

В начальные моменты опыта на обоих фигурах можно заметить, что проискодит генерация отдельных низкочастотных когерентных структур, частота которых простирается до 7 Гц. В момент 70 с в замедленной фазе течения спектры имеют вид развитого турбулентного спектра, с максимумом на частоте <I Гц и уклоном -5/3. На следующих двух фигурах (фиг. 4 и 5) приведены спектры скорости по разным профилям в слое смещения в конце ускоренной фазы течения (момент времени



Фиг. 4.



Фиг. 5.


Фиг. 6.



Фиг. 7.

40 с). Профиль () находится в 60 см до расширения канала. Здесь турбулентность генерируется из-за потери устойчивости пограничного слоя.

Приведенные спектральные распределения энергии намного отличаются. На фиг. 4, где рассмотрены спектры компонента скорости ц, намного отличается от других спектров спектр в профиле А. Можно предполагать, что здесь происходит вынужденная генерация турбулентности при отрыве, и доля энергии больших вихрей меньше, чем вниз по течению в слое смещения.

На фиг. 5 спектры компонента скорости v больше отличаются друг от друга. Видно, что спектры компонента скорости v по длине слоя смещения приближаются к спектрам развитого течения, имеющим инерпионную область с наклоном -5/3. На расстоянии 65 см от расширения канала (профиль D) спектры являются похожими, до этого происходит увеличение энергии низкочастотных компонентов вихрей по дличе слоя смещения. Это значит, что при нестапионарном отрыве течения турбу тентность возникает сначала более мелкомасштабной, и потом в ходе развития течения происходит передача энергии на большие вихри.

На последних двух фигурах (фиг. 6 и 7) приведены спектры скоростей в моменты времени 70 с от начала опыта (в середине замедленной фазы течения).

Для компонента скорости и на фиг. 6 спектры очень похожие, турбулентность является полностью развитой. Кроме этого известно, что замедление течения влияет положительно на развитие турбулентности. Спектры имеют наклон -5/3.

Спектры номпонента скорости V на фиг. 7 имают некоторые расхождения (спектры в профилях А и О от остальных спектров в слое смещения). Если сревнивать, однако, эти спектральные распределения со спектрами на фиг. 5, заметна тенденция и приближению развитой турбулентности в ходе нестационарного развития слоя смежения.

Заключение

По спектральные расчетам энергии при отрыве нестационарного потока (профикь А на фиг. 2 и 3) происходит генерация отдельных вихревых структур с низкой частотой. Доля энергии низкочастотных компонентов увеличивается во время развития процесса, и в конце замедленной фазы течения спектр имеет форму развитого турбулентного течения.

По длине слоя смешения спектры компонента скоростей развиваются и приближаются к спектрам развитого стационарного течения с наклоном -5/3. При этом доля кинетической энергии больших вихрей увеличивается за счет энергии мелких вихрей. Это указывает на слияние мелких и образование более крупных вихрей.

Если спектральные распределения изменяются во время протекания нестационарного процесса и отличаются от спектров развитой турбулентности, можно предположить, что и другие характеристики турбулентности отличаются от соответствующих величин стационарного течения. Поэтому при математическом моделировании для замыкания уравнений необходимо иметь дополнительные соотношения на основе экспериментальных исследований нестационарного течения. Квазистационарный метод, который часто применяется, не ведет к исчерпывающим результатам.

Автор статьи выражает свою благодарность проф. М. де Врис и проф. Я. Калквайк из Дельфтского Технического университета за поддержку и помощь при проведении исследований в Дельфте.

Литература

I. Айнола Л.Я., Коппель Т.А., ЛампЮ.Ю., Лийв У.Р. Спектральный анализ ускоренного турбулентного движения жидкости в трубопроводах. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1980, № 485, с. 3-15.

2. A in ola L.J., Koppel T.A., Liiv U.R. An investigation of turbulence generation and wall shear stress spectral analysis during unsteady flow in tubes. -XVIII Congress IAHR, Proc., vol. 3, Gagliari, Italy, 1979, p. 165-172.

З. Коппель Т.А., Лийв У.Р. Экспериментальное исследование возникновения движения жидкости в трубопроводах. - Изв. АН СССР, МЖГ, № 6, 1977, с. 79-85. 4. Durst F., Melling A., Whitelaw J.H. Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion. - J. F. Mech., 1974, vol. 84, part 1, p. 111-128.

5. Chedron W., Durst F., Whitelaw J.H. Asymmetric flows and instabilities in symmetric ducts with sudden expansions. - J. F. Mech., 1978, vol. 84, part 1, p. 13-31.

6. K o p p e 1 T. Experiments on unsteady separating flow in an open channel. - Internal report No. 3-81. Laboratory of Fluid Mechanics, Delft University of Technology, The Netherlands, 97 p.

T. Koppel

Spectral Analysis of Energy in the Mixing Layer of the Unsteady Separating Flow in an Open Channel

Summary

In the article a qualitative estimation of the spectral content of the energy in the mixing layer of the unsteady separating flow in an open channel is given. The spectral estimates are drawn for the acceleration and deceleration of the flow. The vortex content of the turbulence, generated by the separation, is different from the vortex content in the mixing layer.



№ 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 681.121.082 Ю.Ю. Ламп. У.Р. Лийв

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСХОДОМЕР С ЧАСТОТОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ 500 Hz

Разработка электромагнитных расходомеров для измерения нестационарных течений жидкости в трубах связана со значительными трудностями. Во-первых, улучшение динамических качеств расходомеров требует повышения частоты возбуждения датчика расходомера, которое представляет серьезные технические проблемы. Это касается не только питания датчика, но и детектирования сигнала в условиях увеличивающейся квадратурной помехи, которая возрастает с частотой в квадрате. Вовторых, необходима разработка методов динамического тарирования расходомеров, отвечающих требованиям гидромеханики. Известно, что электромагнитный расходомер с точечными электродами не чувствителен к искажениям эпюры распределения продольных скоростей, если они являются симметричными относительно оси. Однако несимметричные искажения могут в значительной степени увеличить погрешности измерения расхода в зависимости от конструкции датчика [I, 2]. Поэтому необходимо уточнить режимы течения жидкости, при которых возможно увеличение погрешности.

Ниже описываются конструкция и принципы работы электромагнитного расходомера, предназначенного для работы в условиях нестационарности потока жидкости, и методика динамической тарировки расходомеров.

Датчик с точечными электродами имеет нелинейное распределение электромагнитного поля. Это позволяет существенно сократить вес и длину прибора. Например, датчик с условным диаметром Д_Ч = 100 мм имеет длину L = 318 мм. Труба датчика вместе с флянцами изготовлена из немагнитной нержавеющей стали. Внутренняя поверхность трубы преобразователя покрыта слоем полиуретана толщиной 5 мм. Пара катушек имеет седловидную конфигурацию, которая обеспечивает нелинейное распределение магнитного поля. Катушки рассчитаны на создание переменного магнитного поля частотой f = 500 Hz.



Фиг. 1.

Функциональная схема прибора приведена на фиг. І. Начнем описание схемы с опорного генератора, который состоит из последовательно включенных двух интеграторов (У8 и У9) и фазоинвертора (УІО). Генератор вырабатывает стабильное в отношении изменения внешних условий синусоидальное Haпряжение с частотой 500 Hz, которое подается на вход VCHлителя УИ. Нагрузкой УШ является трансформатор TPI, BTOричные обмотки которого питают схему фазовращателя RII-C4 и усилителей мощности УІ2 и УІЗ. Мостовое включение YI2 и УІЗ и последовательный резонанс контура С5 - индуктивность обмоток преобразователя расхода ПР - позволяет увеличить отдаваемую на нагрузку полезную мощность. Снимаемое с электродов напряжение сигнала Uc подается на вход дифференциального усилителя УI и У2 с высоким входным импедансом (УІ включает два операционных усилителя 544У ДА в

режиме повторителей). Синкронный детектор состоит из токовых ключей (TI, T2, УЗ) и дифференциального усилителя У4. Передаточная характеристика СД линейна в широком динамическом диапазоне изменения входного сигнала. Опорное напряжение СД формируется из синусоидального сигнала компаратором У7 и логической схемой ЭІ. Детектированное напряжение U_A с выхода СД поступает на вход фильтра У5 и через выходной усилитель У6 на выход прибора и измерительный прибор ИП. Фильтр реализует передаточную функцию Баттерворта, имеющую вид

$$H(p) = \frac{1}{(p+b_1p+1)(p+b_2p+1)}$$

где b₁ = I₉854 и b₂ = 0,765.

Прибор имеет очень высокую степень интеграции. Например, единственными схемами, где применяются транзисторы, являются усилители мощности У6, УП, УП2 и УП3. В основном использованы операционные усилители К553УД2.

Основой проверки динамической погрешности расходомеров является широко применяемый гидрометрологический метод, согласно которому мгновенный расход определяется интегрированием мгновенной эпюры скоростей. При этом эпюра скоростей определяется, как правило, образцовым прибором, характеристики которого соответствуют предъявляемым требованиям как по точности измерения, так и по стабильности и повторяемости показаний. В настоящее время соответствующего прибора для одновременного измерения эпюры скоростей не существует, поэтому в условиях нестационарности потока применяется метод осреднения по ансамблю реализаций с последующим интегрированием по всему сечению трубы. Для каждого момента времени t_0 нестационарного процесса оценкой математического ожидания является величина, равная

$$\mu_{x}(t_{0}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_{i}(t_{0}),$$

где N - число опытов в ансамбле.

Оценкой пульсации в момент t_о является среднеквадратичное отклонение

$$S_{x}(t_{0}) = \left\{ \left[\frac{\sum_{v=1}^{N} x_{v}(t_{0})^{2}}{N} - \mu_{x}(t_{0})^{2} \right] \frac{N}{N-1} \right\}^{\frac{1}{2}}.$$



Приведенные оценки будут зависеть от числа опытов N. Поэтому при обработке опытных данных вычисляются доверительные пределы с доверительной вероятностью (I- α)-IOO % для математического ожидания и дисперсии согласно работам Бендата и Пирсола [З]. Доверительные пределы для оценки математического ожидания вычисляются по зависимости

$$\left[\mu_{\mathbf{x}}(t_{0}) - \frac{S_{\mathbf{x}}(t_{0})t_{n}; \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{N}}\right] \leq \hat{\mu}_{\mathbf{x}}(t_{0}) < \left[\mu_{\mathbf{x}}(t_{0}) + \frac{S_{\mathbf{x}}(t_{0})t_{n}; \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{N}}\right],$$

где $\hat{\mu}_{x}(t_{0})$ - истинное среднее значение, n = N - 1. Величины t_{n} , $\alpha/2$ определяются по таблице t-распределения Стюдента [3].

Реализация описанной выше методики возможна только с применением средств вычислительной техники. Запись опытных данных в цифровой форме на магнитную ленту реализована системой X-2, построенной на базе серийного устройства ЕС-9002 [4, 5]. Дальнейшая статистическая обработка проводится на ЭВМ ЕС-I022. Для всех измеряемых величин вычисляются 90 проценты с доверительные пределы истинного математического ожидания и дисперсии.

В качестве образцового прибора для определения локальных скоростей принята термоанемометрическая аппаратура датской фирмы "ДИСА" 55МОІ вместе с коническими термоанемометрическими датчиками 55 R 42. Термоанемометрический метод позволяет измерять локальную скорость в широком диапазоне с точностью не менее I %, если во время опытов параметры измеряемой среды (температуру и чистоту воды) поддерживать в определенных пределах. Очень важное значение имеет методика градуировки датчиков, так как каждый датчик имеет собственную нелинейную зависимость выходного напряжения от скорости.

Опытная установка, предназначенная для проверки динамических качеств расходомеров, представлена на фиг. 2. Она состоит из следующих основных узлов:

I – напорный бак, 2 – кран для выпуска воздуха, 3 – трубопровод, 4 – электромагнитный датчик, 5 – пульсатор, 6 – насос, 7 – пульт управления.

Максимальный расход, создаваемый насосом Q = 78,5 л/с, частота пульсации расхода регулируется от 0 до IO Гц, а амплитуда пульсации расхода в пределах △Q = 0...I5 %.



Фиг. 3.

Используемая для опытов вода перед заполнением системы предварительно очищается катионовым фильтром, заполненным сульфоуглем. Термостабилизация воды в течение опытов проводится автоматически – путем дозировки холодной отфильтрованной воды. Разность температур рабочей и охлаждающей воды примерно 10 °C, которая достаточна для компенсации выделяемой в течение опыта теплоты насосом и пульсатором. Колебания температуры в течение длительного опыта не превосходят ±0,1 °C, что позволяет произвести измерения с термоанемометрической аппаратурой надежно и с большой точностью.

Запись опытных данных синхронизируется с движением пульсатора с помощью бесконтактного выключателя. При этом на магнитную ленту записываются данные в течение одного периода колебания. Запись ведется автоматически через каждый второй период. Количество накапливаемых периодов в один ансамбль задается оператором. В данном случае количество опытов в одном ансамбле N =100...200, которое является достаточным для получения достоверной оценки математического ожидания. процесса.

На фиг. З приводятся эпюры локальных скоростей B сечении трубы, расположенном в непосредственной близости от датчика, в разные моменты времени в зависимости от относительного радиуса трубы r/R. В данном случае частота пульсаций T = I000 мS (f = 1Hz). Как видно из построенных эпор, наибольшие изменения происходят в пристеночной части трубы B пределах относительного радиуса от 0,7 до 1,0. Однако наибольший вклад в среднюю скорость имеет центральное ядро течения жидкости. Интегрирование эпюр, приведенных на фиг. 3, дает нам мгновенные значения средней по сечению скорости. На фиг. 4 представлены графики изменения давления в двух сечениях трубы, показания расходомера и определенные по вышеописанной методике значения средней по сечению скорости в течение всего периода колебания. Наблюдается небольшое опережение по фазе показаний термоанемометра, однако в общем разность не превышает I %, что является хорошим результатом проверки метода динамической градуировки электромагнитного расходомера.

Применение этой методики на существенно больших частотах пульсаций позволяет определить динамическую погрешность



расходомера, так как частотный диапазон измерения термоанемометрических датчиков в воде не менее I кHz.

Литература

1. R e i n h o l d I. Velocity profile influence on electromagnetic flowmeter accuracy. - Proc. FLOMEKO, 1978, Netherlands, p. 181-185.

2. Al - Khazraji Y.A., Al - Rabeh R.H., Baker R.C., Hemp J. Comparison of the effect of a distorted profile on electromagnetic, ultrasonic and differential pressure flowmeters. - Proc. FLOMEKO, 1978, Netherlands, p. 215-222.

3. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., Мир, 1974.

4. Ламп Ю.Ю., Ланкотс Ю.Ю., Лийв У.Р. Многоканальная система накопления гидродинамических данных нестационарных процессов на базе ЕС-9002. – Тезисы докладов I Всесоюзной конференции "Метрология гидрофизических измерений", 1980, с. 170-171.

5. A i n o l a L.J., K o p p e l T.A., L a m p J.J., L i i v U.R. Experimental data processing system for unsteady flow studies. - Proc. XIX Congr. IAHR, 1981, India, New Dehli, vol. 4, p. 535-544.

J. Lamp, U. Liiv

Electromagnetic Flowmeter with the Feeding Frequency of 500 Hz

Summary

A complex approach to the unsteady mean velocity measurement problems using an electromagnetic method is described. A full description of the electromagnetic flowmeter with increased feeding frequency of the discharge converter, the dynamic calibration method using a thermoanemometer and computation techniques are given. The experimental data set out that the error of the dynamic calibration of the electromagnetic flowmeter will not precede 1 %.



₩ 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУЛЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 681.586.35

В.И. Реэдик

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕГУЛИРОВКИ РЕЖИМА РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ С ФОКУСИРОВАННОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СТРУЕЙ

Введение

Основным преимуществом пневмоавтоматики, по сравнению с другими средствами автоматизации, является возможность применения для измерения параметров технологического процесса надежных и простых по конструкции пневматических струйных датчиков. Пневматические струйные датчики нечувствительны к вибрациям и ударным нагрузкам, температуре, запыленности и замасленности среды и хорошо зарекомендовали себя во все ужесточающихся условиях эксплуатации входновыходных устройств автоматических систем управления [1, 2, 3]. Из струйных датчиков измерения положения и наличия объектов большее распространение получили датчики, основанные на принципе отражения конической кольцевой струи от объекта. Эти датчики имеют широкий диапазон измерения, а также обладают достаточной точностью и быстродействием для решения большинства задач дискретной автоматизации технологическим оборудованием [4]. Предпочтительное применение получили датчики с цилиндрической и расходящейся кольцевой струей. Но датчики с фокусированной кольцевой струей имеют также целый ряд достоинств, из которых следует отметить более подходящую форму и устойчивость выходной характеристики и более высокие быстродействие и точность.

Схема датчика с конической фокусированной кольцевой струей показана на фиг. I, а. Хотя первые основополагающие исследования датчиков с фокусированной кольцевой струей относятся к концу 60-х годов [5], пока практически отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору параметров таких



Фиг. 1. Датчик с конической кольцевой фокусированной струей: а) геометрические параметры датчика;

б), в) схемы работы датчика.

датчиков в зависимости от требований к характеру их выходных характеристик. Незатронутыми остались также проблемы исследования возможностей целенаправленного управления процессами в рециркуляционной зоне между датчиком и приближающимся к нему объектом с целью достижения желаемого режима работы датчика. Существенные нелинейности и резонансные явления в рециркуляционной зоне датчика не позволили пока создать расчетную модель датчика, действительную в широком диапазоне изменения параметров датчика и отражающую всю сложность происходящих в нем аэродинамических явлений.

Видимо, целесообразнее всего в сложившейся ситуации углублять исследования аэродинамических явлений, заложенных в основу работы датчика, с целью выяснения всех возможных путей целенаправленного управления как характером, так и параметрами выходной характеристики датчика. В результате намеченных исследований могут открыться новые пути для составления расчетных методик, более полно и глубоко описывающих все существенные аэродинамические явления в датчике. Такой подход оправдал себя уже при исследовании датчиков с конической расходящейся кольцевой струей [6].

Пути воздействия на аэродинамические процессы в рециркуляционной зоне датчика

Схема датчика с конической фокусированной кольцевой струей, его основные параметры и общий характер течения струи показаны на фиг. І. При отсутствии объекта вытекающая из сопла коническая струя на определенном расстоянии от сопла соударяется, сливается и продолжает движение общей турбулентной струей (см. фиг. I,6). В зависимости от угла соударения струи и, следовательно, величины обратного течения в рециркуляционную зону, в приемном сопле наблюдается вакуум, либо давление. При приближении к датчику объекта рециркуляционная зона начинает деформироваться, и отраженный поток в рециркуляционную зону растет и давление на выходе увеличивается. При определенных условиях рециркуляционная зона разрушается и возникает новая картина течений (см. фиг. I,в), что сопровождается релейным скачком давления на выходе датчика.

3 результате изменения основных геометрических параметров датчика можно получить различный характер и качество его выходного сигнала. Под качеством выходного сигнала здесь понимается комплекс показателей, включающих чувствительность датчика и флуктуацию его выходного сигнала при аналоговом режиме работы, или амплитуду скачка выходного давления, а также расстояние и гистерезис переключения по перемещению объекта при релейном режиме работы датчика. Характер выходного сигнала зависит от режима работы датчика, т.е. от базовых аэродинамических явлений при взаимодействии фокусированной кольцевой струи с приближающимся объектом и может изменяться от аналогового монотонного до релейного.

Для достижения желаемого режима работы при датчиках с конической расходящейся кольцевой струей оказалось эффективнее всего воздействовать на аэродинамические процессы в рециркуляционной зоне датчика регулированием соотношения объемов воздуха, всасываемого струей из наружной и внутренней ее поверхностей [6]. Исследования показали, что этот способ оказывается полезным и при датчиках с фокусированной кольцевой струей. При выдвижении сердечника (см. фиг.I) увеличивается всасывание из наружной, а при углублении сер-



Фиг. 2. Выходные характеристики датчика:

1) аналоговая;

2) релейная.

дечника - из внутренней области, что вызывает соответствующее уменьшение или увеличение уровня вакуума в рециркуляционной зоне. Но у датчиков с фокусированной струей невозможно изменением длины сердечника добиться столь закономерного управления режимом работы датчика, как это оказалось B03можным при датчиках с расходящейся струей [6]. Более ощутимо здесь и влияние аэродинамического резонанса, впервые установленного при исследовании датчиков с расходящейся конической струей [6]. На фиг. 2 показан характер изменения выходных сигналов датчиков, подверженных влиянию аэродинамического резонанса. Объясняется такое чередование BARVVMA и давления на выходе датчика периодическим усилием 0Cлаблением центрального обратного потока в результате периодического распада его на более мелкие вихри. Явление аэродинамического резонанса является серьезным препятствием при составлении расчетной модели датчика и обобщении результатов экспериментальных исследований.

Способы обеспечения желаемого режима работы датчика

Ограниченный объем данной статьи не позволяет представить всего обширного материала, получающегося в результате анализа экспериментальных данных, и поэтому пришлось ограничиться только рекомендациями более общего харантера. Все приведенные далее рекомендация действительны при следующих, наиболее вероятных диапазонах изменения основных параметров датчика (см. фиг. I,a): $d_0 = 5 \cdots 16 \text{ мм.} \beta = 0 \ldots 90^{\circ}$, толщина струи $\beta = 0, 05 \ldots 0, 2 \text{ мм}$ и давление питания IO--40 кПа. Выдвижение – углубление сердечника l_S изменялось в пределах от -2 до +9 мм.



Фиг. 3. Классификация выходных характеристик датчика.

На фиг. З приведена одна из возможных классификаций режимов работы датчика, основанная как на характере изменения, так и устойчивости выходного сигнала датчика при приближении и нему объекта. Следует отметить, что чисто аналогового режима работы можно добиться весьма редко, поскольку разрушение рециркуляционной зоны датчика приближающимся и датчику объектом почти всегда сопровождается флуктуациями выходного сигнала. Зачерненные участки на характеристиках типа I и П указывают на наличие менее и более выраженных флуктуаций выходного сигнала датчика. Режим работы датчика считается аналоговым (I), если флуктуации выходного сигнала заметно меньше гистерезиса переключения по давлению выпускаемых струйных дискретных элементов и, следовательно, не могут вызвать переключения порогового элемента. Переходной (П) режим ра-

боты датчика использовать не рекомендуется, поскольку амплитуда колебаний выходного сигнала может оказаться столь великой, что вызовет переключение порогового элемента, а оставшиеся аналоговые участки выходной характеристики имеют, как правило, слишком малый подъем, чтобы их использовать. Очевидно, что для установления релейного (Ш) режима работы датчика необходимо, чтобы гистерезис датчика по перемещению объекта был больше поля рассеивания координаты переключения и тем самым стабилизировал процесс переключения.

При составлении дальнейших рекомендаций предпочтение дано релейному режиму работы датчика, поскольку в релейном режиме работы кроются возможности достижения большей точности [4]. В самом деле, при датчиках положения среднего расстояния (0,75...12 мм) подъем выходной характеристики на начальном ее участке весьма мал и при подключении к выходу датчика порогового элемента даже при предварительном уси-



Угол струм в, град

Фиг. 4. Зависимость расстояния переключения датчика при релейном режиме работы от угла фокусирования и диаметра струи.



фиг. 5. Области различных режимов работы датчика:

а) угол фокусирования струи 60⁰
б) угол фокусирования струи 75⁰

лении сигнала получается больший гистерезис переключения по перемещению объекта, чем при релейном режиме работы датчика.

При выборе типа и параметров датчика, как правило, исходят из расстояния до объекта, которое требуется фиксировать датчиком, и задается требованиями технологического оборудования. Ориентировочные данные для выбора расстояния переключения датчика при релейном режиме его работы можно получить из фиг. 4. При увеличении толщины струи b (см. фиг. I,a) и повышении давления питания p_o расстояние переключения в некоторой степени увеличение расстояния переключения вызывает равное увеличение расстояния переключения датчика.

Для достижения желаемого режима работы датчика следует . пользоваться графиками типа, показанными на фиг. 5,а и 5,б, откуда можно установить возможности регулировки режима работы датчика путем изменения выдвижения и углубления сердечника датчика. Как видно из фиг. 5, при датчиках с фокусированной струей, изменение выдвижения и углубления сердечника не является столь универсальным средством достижения релейного режима, как это было у датчиков с расходящейся струей [6]. Вообще, области режимов работы датчика при различных углах фокусирования струи существенно отличаются, что вызывает заметные трудности при обобщении результатов исследований. При малых углах фокусирования струи релейный режим работы датчика наблюдается только вблизи нижней границы диапазона диаметров струи. С увеличением диаметра и угла фокусирования струи для обеспечения релейного режима работы необходимо уменьшать выдвижение сердечника и даже переходить на углубленные сердечники. Вероятнее всего, релейный режим работы датчика наблюдается при углах фокусирования струи 50...80°. Релейного режима работы удобнее добиться при одновременном изменении всех трех основных параметров датчика: диаметра струи, угла ее фокусирования и выдвижения - углубления сердечника, что, конечно, накладывает определенные ограничения на обеспечение остальных параметров выходной характеристики датчика. Для получения релейного режима работы датчика требуется отыскать также оптимальные величины толщины струи и давления питания. Как правило, при малых величинах толщины струи и давления питания релейный режим отсутствует, при их увеличении в определенном диапазоне их из-

менения появляется, а при дальнейшем их увеличении снова исчезает.

При желании получить аналоговый режим работы датчика следует использовать меньшие углы, где выходная характеристика датчика более стабильная. Исследования показали, что при аналоговом режиме работы датчика возможный участок работы порогового элемента и расстояние переключения датчика при релейном режиме работы приблизительно совпадают, так что для ориентировочной оценки расстояния работы датчика можно пользоваться данными графика на фиг. 4.

Рекомендации по регулировке параметров выходных характеристик датчика

Кроме режима и расстояния работы датчика, рассмотренных в предыдущем пункте, важными параметрами выходной характеристики датчика являются: амплитуда скачка давления на выходе и гистерезис переключения по перемещению объекта при релейном, а чувствительность при аналоговом режиме работы датчика.

Амплитуда скачка давления при релейном режиме работы при нагрузке датчика на глухую камеру может быть поднята до 8 кПа и выше. Но это не является самоцелью, поскольку нижняя граница амплитуды близка к уровню нулевого давления (см. фиг. 2, кривая 2), что создает благоприятные условия для согласования выходного сигнала датчика с дискретным пороговым элементом даже при сравнительно низком энергетическом уровне сигнала. При увеличении давления питания и толщины струи амплитуда скачка давления на выходе датчика также увеличивается, но поднимается и нижний уровень скачка. При чрезмерном увеличении давления питания и толщины струи режим работы датчика станет неустойчивым. Для обеспечения удобной настройки и экономичности датчика при релейном режиме работы требуется, чтобы толщина струи была в пределах 0,07...0,12 мм и давление питания 10...20 кПа.

Максимальный гистерезис переключения датчика по перемещению объекта с увеличением диаметра струи от 5 до 16 мм увеличивается соответственно от 0,1 до 2 мм. Однако изменением толщины струи или давления питания можно режим работы датчика смещать в сторону области неустойчивости, где гистерезис становится меньше поля рассеивания расстояния переключения. Следовательно, таким образом можно получить и любой промежуточный гистерезис переключения. Минимальный устойчивый гистерезис переключения, что определяет точность датчика, с увеличением диаметра струи от 5 до 16 мм также увеличивается от 0,02 до 0,06 мм.



Угол конуса струи в, град

Фиг. 6. Зависимость чувствительности датчика при аналоговом режиме работы от угла фокусирования и диаметра струи.

При использовании датчика в аналоговом режиме работы основным параметром его выходной характеристики является чувствительность. Поскольку выходная характеристика датчика существенно нелинейная и отличается по начальному уровню, то точная оценка величины чувствительности датчика заи поэтому фиг. 6 носит, в большей труднительна, степени, качественный характер. Видно, что чувствительность датчика сравнительно мало зависит от диаметра струи. но растет с увеличением угла фокусирования что объee. ясняется сокращением длины рециркуляционной зоны датчика. При увеличении толщины струи и давления питания чувствительность датчика растет почти линейно, но из-за все возрастающих флуктуаций в струе использовать толщину струй больше 0,15 мм и давления питания выше 30 кПа не рекомендуется. Зависимость чувствительности датчика от выдвижения сердечника имеет явно выраженный максимум в пределах выдвижения сердечника 0,5...1,5 мм

Выводы

I. У датчиков перемещения и наличия объекта с фокусированной кольцевой струей можно добиться желаемого режима работы (аналогового либо релейного) регулированием соотношения объемов воздуха, всасываемого в струю от наружной и внутренней поверхностей рециркуляционной зоны датчика. Для этого требуется изменить величину выдвижения сердечника датчика в комбинации с изменением диаметра и угла фокусирования струи.

2. Приведенные в статье рекомендации по выбору параметров цатчиков с фокусированной кольцевой струей для достижения требуемого характера и подходящих параметров его выходного сигнала позволяют существенно сократить объем экспериментальных исследований при разработке новых датчиков такого типа.

Литература

I. Залманзон Л.А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем. М., Наука, 1973. 464 с.

2. Töpfer H., Schwarz A., Leuthold O. Überblick - Stand - Trend der Fluid-Technik in der Automatisierung. - Messen, Steuern, Regeln, 1978, 11, S. 610-616.

3. R o c k s t r o h M., F r e i S. Über Anwendungsmöglichkeiten fluidischer Regler. - VIII Fluidics and Fluid Engineering in Control Preprints. Vol. II, Bucharest, Romania, 1980, p. 341-354.

4. Реэдик В.И. Анализ точностных характеристик струйных датчиков. - В сб.: Ausgewählte Vorträge VII. Jablonna Fluidik Konferenz, B7. Dresden, DDR, 1978. 10 S. 5. Le Hunte G.B., Ramanathan S. Development of a digital fluidic proximity sensor. - Proceedings 4 th Cranfield Fluidics Conference. Paper S1. BHRA, Cranfield, Bedford, England, 1970, p. S1-S16.

6. Реэдик В.И. Выбор параметров датчиков с конической кольцевой струей. - VIII Fluidics and Fluid Engineering Control Preprints. Vol. II. Bucharest, Romania, 1980, p. 11-20.

V. Reedik

An Investigation into the Possibilities of Setting the Working Regime of the Pneumatic Conical Focused Jet Sensor

Summary

The ways of forming the different character sensor output signals, based on conducting the aerodynamical processes between sensor and target are discussed. Changing the balance between air ejection from outer and inner regions of the recirculating zone for this purpose are mainly used. Thoroughgoing recommendations for the choice of the sensor main parameters to get the desired character of the output signal are given.

№ 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУЛЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 681.586.35

В.И. Рездик, А.А. Унт

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СТРУЙНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ

Введение

Неотложной задачей в развитии машино- и приборостроения в ближайшие годы является всесторонняя автоматизация производства, чтобы высвободить дефицитную рабочую силу от физически трудных, монотонных и повторяющихся операций. Особенно утомительна работа на холодноштамповочных прессах, где зысокий темп работы сочетается с постоянным вниманием, чтобы обеспечить безопасность работы и избежать аварии. Самым перспективным путем автоматизации листоштамповочного оборудования в условиях серийного производства является создание робототехнических комплексов штамповки [1, 2]. Хотя прессы можно без существенных переделок снабжать промышленными роботами, основные технические трудности возникают при организации связи между прессом, роботом и транспортной системой, а также при слиянии отдельных рабочих позиций B елиный взаимосвязанный комплекс.

Выпускаемые в настоящее время отечественные промышленные роботы, предусмотренные для обслуживания прессов, относятся к роботам первого поколения, т.е. заменяя человека на физической работе, они не имеют чувствительной системы, воспринимающей информацию о состоянии объектов, с которыми они работают. Весь робототехнический комплекс, однако, слишком сложен, чтобы длительное время функционировать без отклонений, а любой отказ в системе может привести к поломке робота либо штампа или заклиниванию пресса. Поэтому создание любого робототехнического комплекса (РТК) требует разработки системы технологической (внешней для конкретного ро-

бота) информации (СТИ), обеспечивающей правильность и безаварийность работы всего комплекса. Потребность описанных в статье СТИ возникла с разработкой для ПО "Норма" двух РТК штамповки деталей ремня безопасности – ушка и стержня замка. Разработка и построение РТК проводилось в СКТБ "Эффект" ПТХКИ Министерства местной промышленности ЭССР. Пневматические струйные датчики и пневматическая часть СТИ были разработаны на кафедре технологии машиностроения Таллинского политехнического института.

Выбор и разработка технических средств для построения СТИ

Основой любой системы технологической информации являются датчики, которые в РТК выполняют весьма различные функции и работают также в различных условиях (на прессах, манипуляторах роботов, в штампах, в подающих устройствах и т.п.). Датчикам, пригодным для встройки в штампы, предъявляются повышенные требования по части ресурса работы и надежности в условиях ударной нагрузки и замасленности среды. Также требуется, чтобы датчики не изменяли своих параметров и были защищены от попадания абразивных частиц во время переточки штампов. Остальные датчики РТК, как правило, работают в более благоприятных условиях.

В СТИ РТК холодной штамповки нашли применение в основном 3 вида датчиков: механоэлектрические, пневматические стуйные и фотоэлектрические. Стандартные механоэлектрические конечные выключатели весьма трудно приспосабливать к штампам, но они могут быть применены в основном при крупных деталях. Фотоэлектрические датчики на базе оптрона, разработанные для РТК штамповки [3], являются удобными и широкодиапазонными средствами измерения и могут успешно применяться в незамасленной среде.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, в тяжелых условиях работы самыми надежными оказались системы технологической информации на базе струйных пневматических датчиков. Струйные датчики просты в изготовлении и обслуживании, их реализация в штампах значительно проце других типов датчиков. Хотя уже разработано большое количество разнотипных струйных датчиков для измерения положения и определения наличия объектов [4], в специфических условиях холодной листовой штамповки часто приходится искать совсем новые ретения. В ЭНИКМАШЕ разработан целый ряд пневматических датчиков специально для условий холодной штамповки [5], но все эти датчики предназначены для проверки правильности положения в штампах сравнительно крупных заготовок. При штамповке ушка и стержня ремня безопасности встроить датчики в штамп не оказалось возможным и для этого пришлось разработать специальные накладные датчики ощупывания края деталей (толщина деталей 3 мм).

На кафедре технологии машиностроения ТПИ были разработаны для СТИ РТК специальные датчики ошупывания края деталей, имеющие форму таблетки размерами 30х25х10 мм. Датчики имеют плоскую чувствительную систему, аналоговую выходную характеристику и при подключении их к выходу струйного усилителя СТ46 и дискретного элемента СТ41 системы "Волга" расстояние их переключения при давлении питания от 3,5 до 20 кШа составляет соотвественно I-I,5 мм.

Значительная кривизна стержней замка и сложная его конфигурация потребовали разработки для межоперационных транспортных конвейеров датчика с конической расходящейся кольцевой струей расстоянием переключения IO мм, обладающей дискретным характером работы и малым гистерезисом по смещению поверхности объекта измерения. При разработке и настройке датчика использовались принципы регулировки параметров выходных характеристик датчиков, изложенные в [4].

Для обработки сигналов пневматических датчиков использовались пневматические струйные элементы системы "Волга", хорошо зарекомендовавшие себя как надежные, нечувствительные к эксплуатационным условиям средства для построения систем управления [5].

Но с применением пневматических струйных датчиков сразу же встает вопрос о переходе на каком-то уровне преобразований сигналов датчиков на электрический сигнал, поскольку подавляющее большинство систем управления промышленными роботами электронные. В обоих разработанных РТК использовались пульты управления ЭЦПУ-6030. Для стыковки пневматической СТИ с пультом управления ЭЦПУ-6030 потребовалось выработать сигнал с потенциалом 24 В. Поскольку самым дорогим

и дефицитным элементом в пневматическом СТИ является пневмоэлектрический преобразователь, то целесообразнее выработать один общий сигнал блокировки, а распознавание причин остановки оставить за пневматическими индикаторами типа СТІ96. Это, конечно, невозможно, если робот сам должен устранять причину неисправности (например, удалять неправильно ориентированную деталь) или если СТИ используется также для управления межоперационными конвейерами-накопителями.

Как правило, динамика робота ограничивает темп работы СТИ настолько, что при обработке сигналов датчиков струйными элементами быстродействию пневмоэлектрического преобразования не предъявляется строгих требований. На первом РТК использовались простые мембранные преобразователи с индуктивными датчиками БК-5-0 прибора ДМ-3. Для следующего робототехнического комплекса были разработаны аэродинамические преобразователи на базе индуктивных датчиков КВД-6М, пропускающие выходной сигнал струйных элементов, питаемых давлением 3,5 кПа, с частотой до 20 Гц. Уже разработаны более дешевые быстродействующие аэродинамические фотоэлектрические преобразователи.

Система струйных датчиков РТК

Как правило, детали в штампах РТК фиксируются по наружному контуру при помощи трафаретов и комплектов штифтов, а также по отверстиям. Для более точной установки используются встроенные в пуансоны ловители. Промышленные работы, предназначенные для штамповки, имеют точность позиционирования от ±0,05 до ±0,3 мм. Но из-за вибрации робота во время захвата и отпускания деталей и колебания размеров детали, полученных из различных штампов, деталь иногда не попадает в трафарет. Датчики в штампах должны дать сигнал, блокирующий дальнейшую работу этой части комплекса до устранения неправильного положения детали.

Робототехнический комплекс штамповки ушка ремня безопасности состоит из вибробункера для подачи вырезанной по наружному контуру заготовки, пробивного пресса для пробивки всех отверстий в ней и гибочного пресса, обслуживаемых двухманипуляторным промышленным роботом 7605. Из-за отсутствия третьего манипулятора и существенного изменения формы детали после гибки удобнее удалить ушко с гибочного штампа выдуванием. Сначала контроль за удалением ушка из гибочного штампа был осуществлен пневматическими датчиками на базе прерывания струй, однако, экономичнее оказалось устанавливать на лоток, направляющий ушко в тару, акустический микрофонный датчик. Перед пробивкой отверстий происходит смазка заготовки пульверизатором, который включается Импульсно от пульта управления роботом.

Датчик неправильно ариентированной детали на выходном лотке 91,2,3 Д-ДЗ вибробункера	Датчик в гибочном штатпе
41H 41 91A (92,3)	Ač'3) w
У1 Датчик на Д1 Выходном лотке	63±0.
установочный Kr струйный	У у1,2,3 Датчик 6 пробивном штампе

Фиг. 1. Совмещенная схема расположения датчиков при штамповке ушка ремня безопасности.

На фиг. I показана совмещенная схема базирования и размещения датчиков при штамповке ушка ремня безопасности. Номера на установочных элементах показывают, какие из них используются для ориентации деталей при работе определенного датчика.

Робототехнический комплекс изготовления стержня замка ремня безопасности включает 6 позиций технологического оборудования, обслуживаемых 8 промышленными роботами типа МП9С. Автоматизировать процесс изготовления стержня классическим путем трудно, поскольку на линии требуется изготовить 7 модификаций стержня, отличающихся длиной. Стержень замка из-



фиг. 2. Схемы операции и расположения датчиков при изготовлении стержня замка ремня безопасности. готавливается из ленты и последующие операции его изготовления, схемы размещения датчиков и установки стержня в штампы показаны на фиг. 2. Поскольку линия изготовления стержня замка сравнительно длинная, то необходимо контролировать не только правильное положение стержня в штампах, но и наличие всех элементов стержня, чтобы предупредить заблаговременно аварии штампов. Контроль наличия элементов стержня замка нужно провести без введения дополнительных датчиков, что в большинстве операций возможно путем использования дополнительных установочных элементов, не допускающих установку деталей, которые не имеют штампуемых на предыдущих операциях отверстий или зазубрин. Только на последней позиции придется осуществить контроль наличия отверстий перед зенковкой специальными струйными датчиками. Все штампы проектированы в соответствии с требованиями обслуживания роботом, но предусмотрена также возможность ручной подачи заготовок. Учитывая различную длину стержней замка, характер их допусков и возможности крепления роботов к прессу, придется в трех позил иях (П, У, УІ) прижать стержень с торцевой поверхностью к установочным элементам, для чего используется пневматический толкатель. Следовательно, требуются датчики и у входа детали в штамп и у толкающего штыря, фиксирующие правильное положение стержня для проталкивания его в штамп.

Отдельные позиции РТК связаны между собой с конвейерами-накопителями, которые позволяют сглаживать временные остановки отдельных позиций из-за неправильной установки деталей в штампах. В конце конвейера находятся два датчика ДІ и Д2 (см. фиг. 3), один из которых фиксирует поступление стержня на позицию захвата, а другой останавливает конвейер при достижении следующим стержнем минимально допустимого расстояния до позиции захвата. В начале конвейера находится пара датчиков Д6 и Д7, которые контролируют отсутствие предыдущего стержня в позиции разгрузки робота и обеспечивают требуемое расстояние между стержнями. Как видно из фиг. 2, на любой из позиций РТК изготовления стержня замка не требуется больше 7 датчиков.





Фиг. 3. Схема универсального пневматического блока системы технологической информации РТК.
Универсальный пневматический блок системы технологической информации РТК

При разработке блока ставилась задача, чтобы он подходил для любых позиций РТК и выполнял свои функции при временном переходе на ручное обслуживание отдельных позиций линии в случае отказа робота или его системы управления.

Количество датчиков в штампе (см. фиг. 2) не превышает 3, а максимальное количество датчиков на конвейерах – 4. Часть функций СТИ, как контроль конечных положений манипуляторов робота и пневмоцилиндра толкателя, а также верхнего мертвого положения ползуна пресса, где датчики работают в нормальных условиях, можно оставить за индуктивными конечными выключателями.

На фиг. З приведена схема универсального пневматического блока СТИ, собранного для операции Ш - отрубки сторон стержня (см. фиг. 2). Датчики ДІ, Дб, Д7 с конической расходяще ся кольцевой струей, в основу работы которых заложено отражение струи от объекта. Датчики Д2-Д5 специальные датчики ощупывания края детали. Подающий конвейер управляется двумя датчиками: датчик Д2 дает сигнал о поступлении следующей детали на позицию захвата, а датчик ДІ препятствует скоплению деталей. В нормальном режиме работы РТК характер работы конвейера шаговый - конвейер включается после снятия стержня роботом и выключается при условии поступления следующего стержня на позицию захвата и последующего на исходное положение. Конвейер работает до тех пор (стержень в позиции захвата в это время, упираясь в упор, скользит на стальной ленте конвейера), пока последующий стержень включает датчик ДІ.

Сигнал о готовности детали к штамповке выдается только при положительных сигналах от обоих датчиков: Д4 и Д5. При отсутствии одной или обеих зазубрин деталь из-за контрольных ограничителей (показаны на схеме пунктиром) не может быть точно установлена в штамп, и один из двух датчиков у большой головки стержня не дает разрешающего сигнала. При операциях П, У и УI соединения элементов блока СТИ частично изменяются (показаны пунктирными линиями). Датчикам ДЗ и Д5 дается функция выдачи сигнала о поступлении стержня на питатель и правильности его установки на штыре для толкания в штамп. В этом случае для определения правильности расположения стержня в штампе достаточно только датчика Д4, поскольку боковые направляющие и съемная плита сверху оставляют стержню возможность только продольного перемещения и некоторого вертикального подъема. При отсутствии отверстий в большой головке стержень на операции У не опускается на матрицу и датчик Д4 разрешающего сигнала не дает. Отсутствие отверстия в малой головке обнаруживается датчиком Д5, поскольку в этом случае стержень не может быть установлен на палец толкателя.

Пара датчиков Дб и Д7 на начальном участке выходного конвейера блокирует установку стержня на конвейер, если предыдущая деталь находится еще в позиции выгрузки. На операции УІ, где готовые стержни закладывают в тару, датчики Дб и Д7 используются для проверки наличия пробиваемых на операции У отверстий в большой головке стержня. В качестве датчиков в этом случае использованы дроссельные эжекторные датчики. Соответствующие соединения в блоке показаны штрих-пунктирной линией.

На основе сигналов датчиков логическая схема (см. фиг. 3), собранная на базе случайных элементов системы "Волга", вырабатывает блокировочные сигналы, которые через пневмоэлектрические преобразователи ПЭП передаются на каналы опроса пульта управления промышленным роботом.

Конструктивно блок СТИ представляет собой поворотную панель в общем шкафу управления позицией РТК. На панели закреплены три дроссельных системы питания - 3,5 кПа для струйных элементов, 10 кПа для датчиков ощупывания края детали и 25 кПа для датчиков с конической расходящейся кольцевой струей и дроссельных датчиков. На панель можно монтировать до 5 пневмоэлектрических преобразователей и до 15 струйных элементов системы "Волга".

Для очистки воздуха питания использовались стандартный фильтр-влагоотделитель и фильтр тонкой очистки на базе ткани Петрянова.

Каждой позицией РТК управляет самостоятельная система управления, состоящая из пультов управления роботов и системы технологической информации, координирующей работу роботов и управляющей конвейером питания. Связь между соседними позициями РТК осуществляется через движение конвейера. Вся технологическая информация дублируется светодиодами на центральном пульте оператора РТК, что дает возможность оперативно установить причину неисправности.

Выводы и рекомендации

Во время испытания макетов и эксплуатации промышленных вариантов РТК штамповки пневматические системы технологической информации оказались самыми надежными звеньями комплекса и не дали до сих пор ни одного отказа. Это свидетельствует о высокой функциональной надежности пневматических струйных датчиков и систем управления. Видимо, в таких трудных условиях работы, как РТК штамповки, пневматические струйные датчики пока вне конкуренции со стороны других типов датчиков и следует обращать большее внимание на их исследование и разработку.

Литература

I. Солин Ю.В. Организационно-технологические основы совершенствования производства на базе использования промышленных роботов. Обзор. М., НИИМАШ, 1982. 46 с.

2. Хориков Е.П., Дмитриев В.П., Габриелян И.М. Автоматизация листоштамповочного производства на основе промышленных роботов. Обзор. М., НИИМАШ, 1982. 56 с.

3. Хорьков Н.А. и др. Система внешней информации робототехнического комплекса холодной листовой штамповки. - Кузнечно-штамповочное производство, 1981, № II, с. 25-28.

4. Реэдик В.И. Анализ точностных характеристик струйных датчиков. - В сб.: Ausgewählte Vorträge VII Jablonna Fluidik Konferenz, B7. Dresden, DDR, 1978. 10 S.

5. Применение струйных датчиков внешней информации для комплексов пресс-робот. Методические рекомендации. Воронеж, ЭНИНМАШ, 1979. 50 с.

V. Reedik, A. Unt

Pneumatic Fluidic Technological Information Systems for the Robot Aided Cold-Stamping Complex

Summary

The problems and experience of working out the system of pneumatic jet sensors for coordinating the work of industrial robots with cold-stamping presses, manufacturing locking clasp and rod of the safety belt, are analyzed. In more details the matters of locating sensors in stamps and elaborating the universal fluidic system for connecting the sensor system to electronic system of the robot are discussed.

₩ 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.646.001.55

Г.Т. Гроссшицт, Я.А. Пахапилль

МНОГОПОЛЮСНЫЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЯТОРА ПОТОКА ГИДРОПРИВОДОВ

Гидромеханическим системам привода и управления свойственна цепная структура. Такие системы кроме передачи воздействий в прямом направлении имеют реакцию и в обратном направлении. Поэтому при гидромеханических системах наиболее естественно, просто и наглядно иметь многополюсные модели гидравлических, механических и гидромеханических элементов, учитывающих передачу возмущений в нескольких направлениях [I, 2, 3, 8].



Фиг. 1. Функциональная схема регулятора потока.

Рассмотрим построение модели динамики двухходового регулятора потока жидкости. В качестве первого этапа выбираем на функциональной схеме (фиг. I) сосредоточенные элементы и все переменные попарно. Для данного аппарата: К – золотник редукционного клапана; R_K – гидравлическое сопротивление клапанной щели; R₁, R₂, R₄ – гидравлическое сопротивления каналов; G₃ – гидравлическая проводимость перетечек; C₃ – объемная упругость жидкости в надзолотниковой полости; G_D, R_D – гидравлическая проводимость и гидравлическое сопротивление дроссельной щели. Переменными гидравлических элементов принимаем пару – рабочее давление р и объемный расход Q., а для золотника редукционного клапана (гидромеханический элемент) - усилие F и перемещение у. Стрелками обозначим принятые положительные направления переменных.



Фиг. 2. Структурная схема регулятора потока.

На базе функциональной схемы построим структурную схему регулятора потока (фиг. 2) с указанием всех элементов, расположенных в порядке стационарного потока в гидравлических элементах. Пунктиром изображаем зависимость сопротивления клапанной щели R_к от перемещения золотника у



Фиг. 3. Блок-схемы регулятора потока из многополюсных элементов: а - четырехполюсная модель формы Y; б - четырехполюсная модель формы H; в - четырехполюсная модель формы G.

B

б

Математическая модель регулятора потока может быть представлена в виде четырехполюсника формы Y, H и G. Для этих вариантов модели составляем блок-схемы из многополюсных элементов (фиг. 3). На блок-схемах укажем типы многополюсных элементов, а также все переменные и направления связей. При выборе типов многополюсных элементов руководствуемся правилами их объединения [I, 2, 3] и требованием, чтобы



Фиг. 4. Развернутый сигнальный граф динамики регулятора потока формы Y .



Фиг. 5. Преобразованный сигнальный граф динамики регулятора потока формы У .

модель динамики изображала также статику как предельный случай, при котором члены динамики могут быть приняты равными нулю без распада модели. На всех блок-схемах (фиг. За,б,в) общей является подсистема Y_{kL}, которая определяет движение золотника редукционного клапана.

По блок-схемам построим развернутые сигнальные графы динамики регулятора потока с переменными и передачами в изображениях Лапласа (S - оператор Лапласа). При этом используем таблицы сигнальных графов элементов [I, 2, 3].Поскольку изменения переменных рассматриваются от статического положения, то все переменные динамики записываются в виде отклонений (с Λ).

На сигнальном графе четырехполюсника формы Y (фиг. 4) изображены передачи:

$$W_{F} = -(mS^{2} + hS), \quad W_{y} = \frac{1}{c+r},$$
 (I)

где m - приведенная масса золотника [4];

- h эквивалентный коэффициент вязкого трения [4];
- с жесткость пружины;
- коэффициент, учитывающий действие на золотник гидродинамической силы.

Следующим этапом является упрощение (исключение вершин) графа с использованием правил преобразования сигнального графа. Целесообразно исключить те вершины, между которыми имеются дуги с чисто линейными передачами и вершины, имеющие единичные входящие дуги. Сигнальный граф по фиг. 4 после упрощения показан на фиг. 5, на котором имеются полученные при преобразовании передачи:

$$W_{y_1} = \frac{1}{mS^2 + (R_1f_1^2 + R_2f_2^2 + h)S + c + r},$$

$$W_3 = \frac{G_3}{1 + G_3R_2}$$
(2)

Для расчета характеристик по сигнальному графу выписываются итерационные уравнения. Для этого необходимо в сигнальном графе расщепить некоторые вершины так, чтобы были разрезаны все контуры, чтобы некоторые нелинейные функции имели независимые аргументы, и чтобы можно было выделить некоторые подсистемы. Тогда образуются новые источники (с индексом И) и новые стоки (с индексом С). На сигнальном графе фиг. 5 целесообразно расцепить вершины Δp_2 , Δp_{K3} , Δy , ΔQ_2 , ΔQ_{R4} . Тогда могут быть выписаны итерационные уравнения, общие для четырехполюсных моделей Y, H и C (уравнения подсистемы Y_{k1}),

$$\begin{cases} \Delta y_{c} = W_{y_{1}} [-(f_{1} + f_{2}) \Delta p_{2N} + f_{3} \Delta p_{K3N}], \\ \Delta p_{K3c} = \Delta p_{3} + R_{4} \Delta Q_{R4N}, \\ \Delta Q_{R4c} = \Delta Q_{G3} - f_{3} S \Delta y_{N} - C_{3} S \Delta p_{K3N}, \\ \Delta Q_{G3} = W_{3} (\Delta p_{2N} - \Delta p_{K3N}). \end{cases}$$

$$(3)$$

где

Отличающиеся итерационные уравнения и выходные переменные следующие:

для четырехполюсных моделей формы Y (входные переменные Др. и Др.)

$$\Delta p_{2c} = \Delta p_1 - R_{\kappa} \Delta Q_{2n} + K_y \Delta y_n,$$

$$\Delta Q_{2c} = \Delta Q_D + \Delta Q_{G3} - (f_1 + f_2) S \Delta y_n,$$

$$(4)$$

где

$$1Q_{\rm D} = G_{\rm D}(\Delta p_{\rm 2N} - \Delta p_{\rm 3});$$

выходные переменные определяются

$$\Delta Q_{1} = \Delta Q_{2N},$$

$$\Delta Q_{3} = \Delta Q_{D} + \Delta Q_{R4N};$$

$$(5)$$

для четырехполюсных моделей формы H (входные переменные ΔQ, и Δp₃)

$$\begin{array}{l} \Delta p_{2C} = \Delta p_3 + R_D \Delta Q_{DN}, \\ \Delta Q_{DC} = \Delta Q_4 - \Delta Q_{G3} + (f_1 + f_2) S \Delta y_N, \\ \Delta Q_2 = \Delta Q_4; \end{array}$$

$$(6)$$

выходные переменные определяются

для четырехполюсных моделей формы G (входные переменные Др, и ДQ₃)

где

$$\Delta Q_{\rm D} = \Delta Q_{\rm 3} - \Delta Q_{\rm R4N};$$

выходные переменные определяются

При расчете статических характеристик из уравнений исключаются члены динамики, вводятся абсолютные значения переменных и нелинейные зависимости. Таким образом, итерационные уравнения статики для четырехполюсной модели формы и получаются

$$p_{20C} = p_{40} - F_{P}(y_{0N}) Q_{20N}^{2},$$

$$p_{K30C} = p_{30} + R_{4}Q_{G30},$$

$$y_{0C} = \frac{4}{C + \Gamma_{0}} [F_{C0} - (f_{4} + f_{2}) P_{20N} + f_{3}P_{K30N} + F_{R0}],$$

$$Q_{20C} = Q_{D0} + Q_{G30},$$
(10)

в которых

 $F_{P}(y_{0N}) = \frac{P}{2(\alpha_{K}\pi \, d_{K})^{2}y_{0N}^{2}}, \quad r_{0} = 2\alpha_{K}\pi \, d_{K}(p_{10} - p_{20N})\cos\alpha,$

$$\begin{aligned} & Q_{D0} = k_{D} f_{D} \sqrt{p_{20N} - p_{30}}, \ k_{D} = \sqrt{\frac{2}{\xi_{D} \rho}}, \ Q_{G30} = W_{3} (p_{20N} - p_{K30N}), \\ & R_{2} = \frac{8 \mu l_{2}}{\pi r_{2}^{4}}, \qquad G_{3} = \frac{12 \delta_{3}^{3} d_{3} k_{3}}{\pi \mu l_{3}}, \qquad R_{4} = \frac{8 \mu l_{4}}{\pi r_{4}^{4}}, \end{aligned}$$

где F_{co} - сила сжатия пружины при y_o = 0.;

F_{во} - сила трения покоя;

«к - коэффициент расхода золотниковой щели;

d_к - диаметр золотниковой щели;

ч - угол между струей жидкости и осью золотника;

f_D - площадь проходного сечения дроссельной щели;

ξ_D - коэффициент сопротивления дросселя;

53, d3, b3 - радиальный зазор, диаметр и длина круговой щели у грибка золотника;

k 3 - экспериментальный коэффициент;

µ - абсолютная вязкость масла;

l2, l4 - длины каналов;

r2, r4 - радиусы каналов.

При расчете частотных характеристик, при несимметричных нелинейных зависимостях, средние значения колебаний смещаются. Расчет средних значений переменных в гармонических колебаниях (обозначены индексом Н) выполняется по итерационным уравнениям статики, в которые введены выражения средних значений колебаний (сила трения здесь не учитывается):

$$\begin{array}{l} p_{2Hc} = p_{10} - F_{y}^{\circ}(A_{y}, y_{Hu}) F_{Q2}^{\circ}(A_{Q2} Q_{2Hu}), \\ p_{K3Hc} = p_{30} + R_{4}Q_{G3H}, \\ y_{Hc} = \frac{1}{C + r_{H}} \left[F_{co} - (f_{1} + f_{2})p_{2Hu} + f_{3}p_{K3Hu} \right], \\ Q_{2Hc} = F_{QD}^{\circ}(A_{P2}, p_{2Hu}) + Q_{G3H}, \\ \textbf{TOPEX} \qquad Q_{G3H} = W_{3}(p_{2Hu} - p_{K3Hu}), \\ r_{H} = 2\alpha_{K}\pi d_{K}(p_{10} - p_{2Hu}) \cos\alpha. \end{array}$$

Постоянные значения гармонических колебаний определяются:

$$F_{y}^{o}(A_{y}, y_{HM}) = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho}{2(\alpha_{k}\pi d_{k})^{2}} \int_{0}^{2\pi} \frac{d\psi}{(y_{HM} + A_{y}\sin\psi)^{2}}, \\ F_{Q2}^{o}(A_{Q2}, Q_{2HM}) = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} (Q_{2HM} + A_{Q2}\sin\psi)^{2} d\psi, \\ F_{QD}^{o}(A_{P2}, p_{2HM}) = \frac{k_{D}f_{D}}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \sqrt{(p_{2HM} - p_{30}) + A_{P2}\sin\psi} d\psi,$$
 (I2)

где A_{p_2}, A_y, A_{q_2} - амплитуды давления Δp_2 , перемещения золотника Δy и объемного расхода ΔQ_2 .

Для расчета частотных характеристик методом гармонической линеаризации нелинейностей итерационные уравнения получаются для четырехполюсной модели формы У путем замены в уравнениях (3, 4) переменных Лапласа S на переменные Фурье і ω :

$$\begin{aligned} \Delta P_{2C} &= \Delta P_{1} - K_{Q2} \Delta Q_{2N} - K_{y1} \Delta y_{N} - K_{Q2y} \Delta Q_{2N} \Delta y_{N}, \\ \Delta P_{K3C} &= R_{4} \Delta Q_{R4N} + \Delta P_{3}, \\ \Delta y_{c} &= W_{y1} [-(f_{1} + f_{2}) \Delta P_{2N} + f_{3} \Delta P_{K3N}], \\ \Delta Q_{2C} &= \Delta Q_{D} + \Delta Q_{G3} - (f_{1} + f_{2}) j\omega \Delta y_{N}, \\ \Delta Q_{R4C} &= \Delta Q_{G3} - f_{3} j\omega \Delta y_{N} - C_{3} j\omega \Delta P_{K3N}, \end{aligned}$$
(I3)

в которых

B KO

$$\begin{split} R_{4} &= \frac{\delta \mu \, \mathcal{C}_{4}}{\pi \, r_{4}^{4}}, \quad r = 2 \, \alpha_{\kappa} \pi \, d_{\kappa} (\varDelta \, p_{4} - \varDelta \, p_{2\nu}) \cos \alpha, \\ \varDelta \, Q_{D} &= G_{D} (A_{P2}, p_{2H\nu} - p_{30}) (\varDelta \, p_{2\nu} - \varDelta \, p_{3}), \\ \varDelta \, Q_{G3} &= W_{3} (\varDelta \, p_{2\nu} - \varDelta \, p_{K3\nu}), \\ C_{3} &= \frac{V_{3}}{E_{w}}, \end{split}$$

где l, r, - длина и радиус канала;

V3 - объем жидкости в надзолотниковой полости;

Е ж - модуль объемной упругости жидкости.

Нелинейные функции при гармонической линеаризации представлены в виде следующих выражений:

эквивалентный коэффициент вязкого трения

$$n(A_y) = \frac{4F_{RO}}{\pi\omega A_y}, \qquad (14)$$

где ω - частота вынужденных колебаний; проводимость дроссельной щели

$$G_{D}(A_{P2}, p_{2Hu} - p_{30}) = \frac{k_{D} f_{D}}{\pi A_{P2}} \int_{0}^{2\pi} \sqrt{(p_{2Hu} - p_{30}) + A_{P2} \sin \psi} \sin \psi d\psi; \quad (15)$$

коэффициенты, учитывающие сопротивление золотниковой

щели

$$\begin{cases} q_{2} = F_{yH}(y_{HN}) F_{Q2}(A_{Q2}, Q_{2HN}), \\ f_{y_{1}} = F_{Q2H}(Q_{2HN}) F_{y}(A_{y}, y_{HN}), \\ f_{Q2y} = F_{Q2}(A_{Q2}, Q_{2HN}) F_{y}(A_{y}, y_{HN}), \end{cases}$$
(16)

в которых средние значения функций

$$F_{yH}(y_{HN}) = \frac{P}{2(\alpha_{\kappa}\pi d_{\kappa})^{2} y_{HN}^{2}},$$

$$F_{Q2H}(Q_{2HN}) = Q_{2HN}^{2},$$
(I7)

и коэффициенты гармонической линеаризации

$$F_{y}(A_{y}, y_{Hu}) = \frac{1}{\pi A_{y}} \frac{\rho}{2(\alpha_{\kappa}\pi d_{\kappa})^{2}} \int_{0}^{2\pi} \frac{\sin\psi d\psi}{(y_{Hu} + A_{y}\sin\psi)^{2}},$$

$$F_{Q2}(A_{Q2}, Q_{2Hu}) = \frac{1}{\pi A_{Q2}} \int_{0}^{2\pi} (Q_{2Hu} + A_{Q2}\sin\psi)^{2}\sin\psi d\psi.$$
(18)

Выходными переменными являются объемные расходы

$$\Delta Q_{1}(j\omega) = \Delta Q_{2N}(j\omega),$$

$$\Delta Q_{2}(j\omega) = \Delta Q_{D}(j\omega) + \Delta Q_{R4N}(j\omega).$$
(19)

Вычислительная программа расчета статических и частотных характеристик регулятора потока составлена методом структурного синтеза программ, идеи которого реализованы в системе программирования ПРИЗ [6]. С помощью системы ПРИЗ создан пакет программ HYDRA для моделирования гидромеханических систем привода и управления, снабженный проблемно-ориентированным входным языком высокого уровня. Базовым языком пакета является входной язык системы ПРИЗ-УТОПИСТ, расширенный понятиями предметной области. Для синтеза вычислительной программы необходима информация об исследуемом объекте. Эта информация содержится в семантической модели объекта. На эту модель ссылаются в операторе постановки задачи, по которой и синтезируется рабочая программа. Общая вычислительная модель гидромеханической системы строится с соединением отдельных элементов на уровне входного языка. Отдельными элементами вычислительной модели регулятора REGUL-Q. являются:

модель	REGULØQ	-	описание уравнений статики;
модель	MIDLVAL	-	описание нахождения начальных приближе-
			ний для расчета динамического режима;
модель	FEEDBACK	-	описание систем нелинейных уравнений;
модель	REGULDO	-	описание уравнений расчета частотных
			характеристик.

Тип многополюсной модели регулятора (Y, H или G) задается заданием значения соответствующего ключа КЕҮҮ, КЕҮН или КЕҮС (фиг. 6).



Фиг. 6. Схема входов и выходов вычислительной модели для расчета частотных характеристик регулятора потока:

И входные, а С - выходные переменные;

PAR - входной вектор параметров и режимов работы регулятора потока; ω - частота вынужденных гармонических колебаний.

Для расчета частотных характеристик методом гармонической линеаризации нелинейности используется многоконтурная процедура итерации и метод Ньютона-Рафсона. В процедуру входят следующие блоки:

I блок – расчет статики для определения исходных значений итерируемых переменных;

П блок - расчет начальных приближений амплитуд колебаний А_ү, А_а и А_р, которые определяются как средние отклонения в обе стороны от статического значения;

П блок – расчет частотных характеристик (условия сходимости проверяются по амплитудам гармонических колебаний и по средним значениям переменных в гармонических колебаниях).

Расчеты характеристик регулятора потока выполнялись на ЭЕМ ЕС-1052. Время синтеза рабочей программы составляло ~3 мин, а время вычисления одного пункта характеристик ~4 с. Графики выводились на графопостроитель ЕС-7051.

Приняты следующие исходные параметры регулятора потока III 55-24 (для удобства выполнения расчетов используются единицы кгс, см, с).

Конструктивные параметры: $d_{\kappa} = I_{4}$; $f_{1} = I_{5}4$; $f_{2} = 8,06$; $f_{3} = 9,6$; $l_{4} = 4$; $r_{1} = 0,I$; $l_{2} = 0,9$; $r_{2} = 0,055$; $l_{3} = 0,8$; $d_{3} = 3,5$; $\delta_{3} = 0,0025$; $l_{4} = 2,5$; $r_{4} = 0,25$; c = I9,2; $F_{co} = I5,4$; $m = I_{1}I \cdot I0^{-4}$; $V_{3} = I0$.

Параметры жидкости и истечения жидкости: $\rho = 0,86 \cdot 10^{-6}$; $E_{\pi} = 100$ (при относительном содержании воздуха $V_{\rho} = 0,04$ и при давлении $\rho_{30} = 1$); $\alpha_{\kappa} = 0,7$; $\alpha = 1,2$ рад; $\xi_{D} = 2$; $k_{3} = 2$.

Заданы следующие условия и режимы работы регулятора потока: $p_{10} = 10$; 30; 50 кгс/см²; $f_{\rm D} = 0.02$; 0,1; 0.5 см²; $\mu = 0.2 \cdot 10^{-6}$; 0,4 · 10⁻⁶; 0.8 · 10⁻⁶; 1.6 · 10⁻⁶ кгс · с/см² ($\gamma = 23$; 46,5; 93; 186 сСт, например, вязкость масла "Индустриальное И20А" при $t^{\circ} \approx 45$; 30; 20; 10 °C). Расчеты выполнены при значениях силы трения $F_{\rm R0} = \pm 0$; 0,3; 0,5 кгс и амплитудах колебаний входного давления $A_{\rm P4} = 3$; 6 кгс/см².

В качестве примеров полученных результатов расчета приводим некоторые графики статических характеристик и вычерченные графопостроителем графики логарифмических амплитудночастотных (ЛАЧХ) и фазочастотных характеристик (ЛФЧХ) передачи $T_{44} = \Delta Q_4(j\omega)/\Delta p_4(j\omega)$ см⁵/с.кгс четырехполюсной модели формы Y регулятора потока ПГ 55-24.

Полученные статические характеристики (фиг. 7) свидетельствуют о небольшом падении объемного расхода с увеличением давления на входе. Кроме того, определенное влияние



Фиг. 7. Статические характеристики регулятора потока ПГ 55-24 (давление р₁₀ кгс/см², объемный расход Q₂₀ см³/с).

имеет величина и направление силы трения регулирующего клапана, вследствие которого линии статической характеристики смещаются.

Общий характер ЛАЧХ и ЛФЧХ рассматриваемой передачи на всех графиках (фиг. 8-II) одинаков. Горизонтальные участки ЛАЧХ при низких частотах соответствуют статическим характеристикам. При вязкости жидкости $\mu = 1,6\cdot 10^{-6} {\rm krc}\cdot {\rm c/cm}^2$, начиная с частоты $\omega_i \approx I$ рад/с (первая частота среза), возникает запаздывание регулятора потока, с которым связано увеличение амплитуды объемного расхода. При частотах

 $\omega_2 > 100$ рад/с (вторая частота среза) регулятор своих функций практически не выполняет, его характеристика переходит к характеристике гидравлического сопротивления. Соответственно изменяются и ЛФЧХ. При силе трения регулирующего золотника $F_{R0} = 0$ с увеличением частоты, начиная с очень низких частот, опережение по фазе ϕ° увеличивается (или отставание по фазе $360^\circ - \phi^\circ$ уменьшается) от нуля до $\phi = 70...80^\circ$. Дальнейшее увеличение частоты снова приводит к уменьшению опережения по фазе ϕ до нуля.



Фиг. 8. ЛАФЧХ передачи $T_{11} = \Delta \Omega_{4}(j\omega)/\Delta p_{4}(j\omega) \text{ см}^{5}/\text{с.кгс четырех$ полюсной моделя формы Y регулятора потока ПГ 55-24 (fp = 0,1 см²; $<math>p_{40} = 10 \text{ кгс/см}^{2}; A_{P4} = 3 \text{ кгс/см}^{2}; \mu = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{кгс.c/cm}^{2});$ A1, F1 - F_{R0} = 0; A2, F2 - F_{R0} = ±0,3 кгс; A3, F3 - F_{R0} = ±0,5 кгс.

Сила трения регулирующего золотника F_{Ro} значительно повышает амплитуду и смещает фазу на низких частотах (см. фиг. 8).

С увеличением вязкости жидкости µ уменьшаются частоты среза ω, и ω₂ (см. фиг. 9).

ЛАЧХ для различных давлений статики р₁₀ параллельны, причем более высокому давлению р₁₀ соответствует меньшая амплитуда (см. фиг. IO).

При более высоких амплитудах входного колебания давления А_{р1} ЛАЧХ имеют более низкие значения (см. фиг. II).

Полученные результаты свидетельствуют о большом разбросе характеристик регулятора потока в зависимости от условий и режимов работы.



Y-RXIS : RMPL. & PHASE DLG & DEG X-RXIS : FREQUENCY 1/S

Фиг. 9. ЛАФЧХ передачи $T_{11} = 4Q_{4}(j\omega)/4p_{4}(j\omega) cm^{5}/c \cdot кгс четырех$ $полюсной молеля формы У регулятора потока ПГ 55-24 (<math>f_{D} = 0,1cm^{2}$; $p_{10} = 10 \text{ кгc/cm}^{2}$; $F_{00} = 0$; $A_{P1} = 3 \text{ кгc/cm}^{2}$; A1, F1 - $\mu = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ кгc} \cdot c/cm^{2}$; A2, F2 - $\mu = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ кrc} \cdot c/cm^{2}$; A3, F3 - $\mu = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ кrc} \cdot c/cm^{2}$; A4, F4 - $\mu = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ кrc} \cdot c/cm^{2}$.



Фиг. 10. ЛАФЧХ передачи Т $= \Delta Q_4(j\omega) / \Delta p_4(j\omega) \text{ см}^5/\text{с.кгс для четы$ рехполюсной модели формы У регулятора потока ПГ 55-24, 22 $(<math>f_D = 0.1 \text{ см}^2$; $F_{R0} = 0; A_{P4} = 3 \text{ кгс/см}^2; \mu = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ кгс·с/см}^2$; A1, F1 - $p_{40} = 10 \text{ кгс/см}^2$; A2, F2 - $p_{40} = 30 \text{ кгс/см}^2$; A3, F3 - $p_{10} = 50 \text{ кгс/см}^2$.



Фиг. 11. ЛАФЧХ передачи $T_{11} = \Delta Q_4(j\omega) / \Delta p_4(j\omega) cm^5 / c.кгс для четырех$ полюсной модели формы У регулятора потока ПГ 55-24 $(<math>f_D = 0.1 cm^2$; $p_{40} = 30 \text{ кгс/cm}^2$; $F_{R0} = -0.3 \text{ кгс};$ $\mu = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ кгс.c/cm}^2$); A1, F1 - A_{P1} = 3 кгс/cm²; A2, F2 - A_{P1} = 6 кгс/cm².

Разработанная методика, которая реализована в качестве вычислительной процедуры, позволяет весьма точно определить статические и частотные характеристики двухходовых регуляторов потока. Данная вычислительная процедура может быть использована для оптимизации параметров регуляторов потока. Приведенная вычислительная модель используется в качестве модуля в процедурах расчета статических и частотных характеристик гидросистем.

Литература

I. Гроссшмидт Г.Т. Составление сигнальных графов динамики гидравлических цепей объемных гидросистем. -Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1977, № 435, с. 3-II.

2. Гроссшмидт Г.Т. Составление сигнальных графов динамики механических цепей. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1977, № 435, с. 13-18.

3. Гроссшмидт Г.Т. Составление сигнальных графов динамики гидромеханических звеньев объемных гидросистем.- Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1977, № 435.с.19-26.

4. Гроссшмидт Г.Т., Сакариас А.А. Составление сигнального графа динамики для клапанов давления типа Г52-2. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1977, № 435, с. 27-38.

5. Коробочкин Б.Л. Динамика гидравлических систем станков. М., Машиностроение, 1976. 240 с.

6. Кахро М.И., Калья А.П., Тыугу Э.Х. Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ (ПРИЗ). М., Финансы и статистика, 1981. 156 с.

7. Backé W., Hamburg A.N., Riedel H.P. Untersuchungen über das dynamische Verhalten von Stromregelventilen. -Forschungsberichte des Landes Nordhein-Westfalen. Nr.2435. Westdeutscher Verlag, 1974, 91 S.

8. G r o ß s c h m i d t G. Anwendung der Mehrpol- und Signalflußgraphentheorien zur Berechnung des dynamischen Verhaltens der Ölhydrauliksysteme. - 3. Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge-Teil 1, Dresden 1979, S. 33-44.

9. Trudzinski R.M. Kennwerte für die Beurteilung des statischen und dynamischen Verhaltens von 2-Wege-Stromregelventilen. -O+P, Ölhydraulik und Pneumatik, (23), 1979, Nr. 7, S. 525-528.

10. H o f f m a n n W., H e s s e K. Digitale Simulation des dynamischen Verhaltens hydraulischer Geräte. - 0+P "Ölhydraulik und Pneumatik", (24), 1980, Nr. 3, S. 159-166.

11. B a c k é W. Vorausbestimmung des statischen und dynamischen Verhaltens hydraulischer Geräte und Systeme.
- 0+P, Ölhydraulik und Pneumatik, (24), 1980, Nr. 5,
S. 390-395.

G. Großschmidt, J. Pahapill

Mehrpolmodelle für Kennlinienberechnung des Stromregelventils der Hydroantriebe

Zusammenfassung

Aus Mehrpolelementen zusammengestellten Signalflußgraphen werden mathematische Modelle für Kennlinienberechnung ausgestaltet. Diese Berechnungsmodelle der Statik und Frequenzlinien gestatten uns, die Berechnungen mit Iterationsverfahren durchzuführen. Das Berechnungsmodell, welches auf Basis des Programmiersystems PRIZ aufgebaut ist, wird beschrieben. Die Berechnungsergebnisse werden besprochen. № 553

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.646.001.55

Г.Т. Гроссшмидт, Я.А. Пахапилль

ИТЕРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

Статической характеристикой (статической жесткостью) гидравлического следящего привода является зависимость

$$F_{\mu o} = F(x_{\mu o}),$$

где

F_{шо} - статическая сила на штоке поршня гидроцилиндра (выходное переменное);

X_{шо} - статическое смещение штока поршня гидроцилиндра (входное переменное).



Фиг. 1. Функциональная схема гидравлического следящего привода.

Для построения математических моделей гидравлический следящий привод делится на многополюсные элементы (I, 3,4). На функциональной схеме (фиг. 1) указываются все принятые переменные попарно и стрелками положительные их направления. Модель всего привода необходимо составить так, чтобы она соответствовала принципу функционирования привода. Гидравлический следящий привод с четырехкромочным золотником является системой с переменной структурой: могут работать все четыре золотниковые щели одновременно, либо две рабочие щели попарно. Математические модели при этом имеют дополнительные варианты в зависимости от способа питания (от источника постоянного давления или от источника постоянного расхода) и от варианта обеспечения давлений в полостях гидроцилиндра (через определенную щель золотника или через сопротивление в поршне). Варианты математических моделей изображаются графически в виде структурных схем.

В вариантах структурных схем следящего привода требуется иметь различные варианты функционирования многополюсных элементов, отличающихся по принятым независимым и зависимым переменным. Для каждого варианта функционирования элемента разработана модель в виде сигнального графа, которая изображает переменные (вершины графа) с направленными связями между ними (дуги графа). По сигнальным графам элементов выписываются итерационные уравнения с учетом нелинейных зависимостей между переменными. Учтены следующие нелинейные зависимости: квадратичные зависимости между перепадом давления и объемным расходом в рабочих щелях следящего золотника при трехзонной (зоны открытых, перекрытых и переходных щелей) аппроксимации зависимости между перепадом давления и объемных расходов от перемещения золотника; квадратичные зависимости между перепадом давления и объемным расходом в отверстии поршня и в соединительных трубах, люфт крепления гидроцилиндра. знакопеременность сил трения.

Привод в целом при данном варианте функционирования описывается итерационными уравнениями элементов. Методика позволяет составить подсистемы объединением моделей элементов или групп элементов.

Для описания математических моделей статики гидравлического следящего привода с питанием от источника постоянного давления используются, например, следующие элементы и подсистемы.

- КРГКО подсистема, в которую входят упругости крышки е_{кр}, гильзые_г, фланца е_ф и крепления гидроцилиндра е_к, люфт крепления гидроцилиндра К_{ло} (фиг. 2), где F_{тушшо} – сила трения уплотнения штока; F_{тупго} – сила трения уплотнения поршня:
 - АШО элемент, учитывающий упругость штока поршня е (фиг. 3), где к – передаточное отношение обратной связи;



Фиг. 2. Сигнальный граф крышки, гильзы, фланца, люфта и креплёния гидроцилиндра – подсистемы КРГКО.

- АПО поршень в качестве гидромеханического элемента (фиг. 4);
- ПТО перетечки через отверстие в поршне с проводимостью G_{пто} (фиг. 5);
- БППТО, ВППТО поршень с сопротивлением перетечек R_{пто} и неразрывностью потока в гидроцилиндре (БППТО-фиг. 6);
- GQU10, HQU20 неразрывности потока в полостях гидроцилиндра;
- АГЦО подсистема-гидроцилиндр, в которую входят: поршень АШО, шток поршня АПО, перетечки ПТО, полости гидроцилиндра GQU10, HQU20; подсистема-крышка, гильза, фланец, крепление и люфт крепления гидроцилиндра КРГКО (фиг. 7);

варианты моделей подсистемы ТЦО (гидроцилиндр) приведены в таблице I;





GRT10, HRT20, HRT10, GRT20 - элементы, учитывающие сопротивления R_{ти}, R_{т20} соединительных труб GRT10, HRT20 (фиг. 8);

АГЦТО - подсистема, в которую входят гидроцилиндр АГЦО и соединительные трубы GRT10, НКТ20 (фиг. 9);

варианты моделей подсистемы гидроцилиндр с соединительными трубами приведены в таблице 2:



элемента АПО.



Фиг. 5. Сигнальный граф проводи-. мости перетечек в поршнеэлементе ПТО.

Таблица І

Элементы, входящие в состав вариантов подсистемы ГЦО

	Элементы					A state
ГЦО	Ш0	по	пто	Q.410	Q420	KPTKO
АГЦО	цо]	АПО	пто	GQ410	HQ420	
АБГЦО АВГЦО	} АШО		} KPFK0			

Таблица 2

Элементы, входящие в состав вариантов подсистемы -ГЦТО (гидроцилиндр ГЦО с соединительными трубами ТІ и Т2)

	Элементы			
гцто .	ГЦО	T1	Т2	
АГЦТО	АГЦО	GRT10	HRT20	
АБГЦТО	АБГЦО	GRT10	GRT20	
АВГЦТО	АВГЦО	HRT10	HRT20	



Фиг. 6. Сигнальный граф поршня, сопротивления перетечек, неразрывности полостей - подсистемы БППТО.



Фиг. 7. Структурная схема подсистемы АГЦО.

РИQ30 - подсистема – пара рабочих щелей и условие неразрывности, в которую входят рабочая щель Щ10, определяющая давление р₄₀, рабочая щель Щ30, определяющая объемный расход Q₃₀, условие неразрывности потока Q₄₀ + Q₄₀ + Q₃₀ (фиг. IO);



Фиг. 8. Сигнальные графы сопротивления соединительных труб элементов GRT10, HRT20.









варианты моделей подсистемы, пара рабочих щелей и условие неразрывности, приведены в таблице 3;

Таблица З

Элементы, входящие в состав вариантов подсистемы пара рабочих щелей Щ1Щ30 и Щ2Щ40-с условием неразрывности потока

	Элементы			
щ1Щ30	Щ10	Щ30	Неразрывн.	
P11Q30	DP110	DQ30	EQ10	
Q1P130	DQ10	DP130	EQ30	
Q1Q30	DQ10	DQ30	EQT10	
	Элементы			
щ2щ40	Щ20	Щ40	Неразрывн.	
P22Q40	DP220	DQ40	EQ.20	
Q2P240	DQ20	DP240	EQ40	
Q2Q40	DQ20	DQ40	EQT20	

ПИТО - система питания с передачей К_{пито} и условием неразрывности потока Q_{пито} = Q₄₀ + Q₂₀;

сло - система слива с передачей К_{сло} и условием неразрывности потока Q_{сло} = Q₃₀ + Q₂₀;

АЗОЛО – услозие перемещения следящего золотника z_o относительно корпуса (фиг. II), где z_{F0} – смещение золотника от среднего положения относительно корпуса золотника в исходном состоянии привода (X₁₀₀= 0, силы трения равняются нулю).

Рассматриваемый гидравлический следящий привод для расчета статической характеристики имеет 6 вариантов функционирования (табл. 4, вариант 3 - фиг. 12).

В вариантах № 5 и 6 давление в противоположной полости гидроцилиндра обеспечивается через сопротивление в поршне. Области применения вариантов математических моделей указаны в таблице 5.



Фиг. 11. Сигнальный граф смещения золотника – элемента АЗОЛО.

Таблица 4

Варианты построения математических моделей гидравлического следящего привода для расчета статической характеристики

Вариан-	Модули					
.т.ы	пито	այ1ա,30	ГЦТО	щ2щ40	сло	золо
I	} пито	P11Q30]	P22Q40]	Азоло
2		Q1P130	АГЦТО	Q2P240	сло	
3		Q1P130		P22Q40		
4		P11Q30]	Q2P240		
5		P11Q30	АБГЦТО	Q2Q40		
6		Q1Q30	АВГЦТО	P22040		



Фиг. 12. Структурная схема гидравлического следящего привода (вариант математической модели № 3).

Таблица 5

Области применения вариантов математических моделей для расчета статической характеристики гидравлического следящего привода

Вариан-	Области Zo для золотника				
ты	с ОРЩ с ПРЩ				
I, 2	Все цели открыты —				
3	открыты щели Щ 2 и Щ 3				
4	открыты щели щ1 и щ4				
5,6	- все щели перекрыты				

ОРЩ - с открытыми рабочими щелями ;

прщ - с перекрытыми рабочими щелями.

Для описания моделей используется пакет прикладных программ, который создан на базе инструментальной системы программирования ПРИЗ [2]. Входным языком пакета является язык высокого уровня УТОПИСТ, который расширен понятиями из предметной области. Общая вычислительная модель привода строится с соединением моделей отдельных элементов и подсистем привода на уровне входного языка. Модели включают в себя описания переменных и описания программных модулей, которые реализуют функциональные отношения. Модули хранятся в архиве. Совокупность модулей образует модель предметной области.

Вычислительная модель для расчета статической характеристики следящего гидропривода состоит из следующих модулей.

Модуль для расчета начальных приближений

Расчет начальных приближений выполняется по простейшей модели следящего привода при отсутствии внешнего воздействия (x_{що}=0).

Давления в полостях дифференциального гидроцилиндра определяются

$$p_{4F0} = (p_{\Pi UT0} + p_{CAD}) \frac{f_2}{f_4 + f_2},$$
(I)
$$p_{2F0} = (p_{\Pi UT0} + p_{CAD}) \frac{f_4}{f_4 + f_2},$$

$$p_{\Pi UT0}, p_{CAD} - давления питания и слива;$$

где

f1, f2 - площади поршня.

Положение золотника Z FO определяется итерационным методом по уравнению -

$$\sigma_{z_1}(z_{F_0})\sqrt{p_{\Pi H T_0} - p_{1F_0}} - \sigma_{z_3}(z_{F_0})\sqrt{p_{1F_0} - p_{C,T_0}} - \sigma_{\Pi T_0}\sqrt{p_{1F_0} - p_{2F_0}} = 0, \quad (2)$$

где

 σ_{Z1}(Z₀), σ_{Z3}(Z₀) - экспериментальные функции, аппроксимируемые по трем участкам (линейные модели для участков открытых и перекрытых щелей и модель в виде степенного многочлена, аппроксимируемого с помощью сплайнов, для переходного участка);

Опто - проводимость перетечек.

По положению золотника z_{F0} и перепадам давления рассчитываются начальные значения объемных расходов $Q_{1F0}, Q_{2F0}, Q_{3F0}, Q_{4F0}$ через рабочие щели золотника.

Модуль гидроцилиндра с соединительными трубами

В данный модуль входят гидроцилиндр ГЦО (см. табл. I) с элементами АШО, АПО, ПТО, БППТО, ВППТО, GQU10, HQU20, КРГКО и соединительными трубами ТІ и Т2 (см. табл. 2). В модуле используются следующие нелинейные зависимости:

смещение фланца гидроцилиндра с учетом люфта крепления

$$X_{\Phi 0} = \begin{cases} (e_{\Phi} + e_{\kappa}) F_{\Phi 0} + \frac{c_{\Lambda}}{2} \operatorname{sign} F_{\Phi 0} & \operatorname{npu} F_{\Phi 0} \neq 0, \\ 0 & \operatorname{npu} F_{\Phi 0} = 0, \end{cases}$$
 (3)

где е, е, - упругость фланиа и крепления гидроцилиндра; F_{ФО} - сила, действующая на фланец гидроцилиндра;

с. - величина осевого люфта крепления гидроцилиндра;

объемный расход и давления, определяемые отверстием поршня

$$\begin{array}{l} Q_{n\tau 0} = \sigma_{n\tau} \sqrt{p_{u10} - p_{u20}} \operatorname{sign}(p_{u10} - p_{u20}), \\ p_{u20} = p_{u10} - \frac{1}{\sigma_{n\tau}^{2}} Q_{n\tau 0}^{2} \operatorname{sign} Q_{n\tau 0}, \\ p_{u10} = p_{u20} + \frac{1}{\sigma_{n\tau}^{2}} Q_{n\tau 0}^{2} \operatorname{sign} Q_{n\tau 0} : \end{array}$$

$$(4)$$

давления в концах труб

$$p_{u_{10}} = p_{10} - \tau_{\tau_1} Q_{u_{10}}^2 \operatorname{sign} Q_{u_{10}}, p_{u_{20}} = p_{20} + \tau_{\tau_2} Q_{u_{20}}^2 \operatorname{sign} Q_{u_{20}}, p_{10} = p_{u_{10}} + \tau_{\tau_1} Q_{\tau_{10}}^2 \operatorname{sign} Q_{\tau_{10}}, p_{20} = p_{u_{20}} - \tau_{\tau_2} Q_{\tau_{20}}^2 \operatorname{sign} Q_{\tau_{20}},$$

$$(5)$$

где т_{т1}, т_{т2} - сопротивления труб.

Модуль рабочих щелей, условий неразрывности и смещения следящего золотника

Описываются уравнение объемного расхода и уравнение перепада давления в рабочей щели в общем виде

$$\begin{array}{l} Q_{0} = \sigma(z_{0})\sqrt{\Delta p} ,\\ \Delta p = \frac{1}{[\sigma(z_{0})]^{2}}Q_{0}^{2}. \end{array} \end{array}$$

$$(6)$$

Для определения объемного расхода через отдельные цели задаются для уравнения расхода (6) соответствующие перепады **Давлени**я

$$(\Delta p)_{1,2} = p_{\Pi \mu \tau 0} - p_{10,20},$$

$$(\Delta p)_{3,4} = p_{10,20} - p_{cn0}.$$

$$(7)$$

По уравнению перепада давления (6) определяются управляемые следящим золотником давления

$$p_{10,20} = p_{\Pi N T 0} - (\Delta p)_{1,2},$$

$$p_{10,20} = p_{C \Lambda 0} + (\Delta p)_{3,4}.$$
(8)

Вариант математической модели рабочих щелей (см. табл. 4) выбирается в зависимости от величины и направления смещения золотника Z₀ (см. табл. 5).

Общая вычислительная модель гидравлического следящего привода строится с соединением отдельных модулей (I-3).Соединение модулей производится на уровне входного языка, например:

ASS' ЗОЛОТНИК. ХГО := ГИДРОЦИЛИНДР. ХГО.

Постановка задачи на входном языке оформляется в виде: НА ГИДРОПРИВОД ВЫЧИСЛИТЬ ДАВЛЕНИЯ, РАСХОДЫ, СИЛЫ, (9) СМЕЩЕ ИЯ ПО ХШО,

```
где ГИДРОПРИВОД – имя вычислительной модели следящего
привода;
ДАВЛЕНИЯ, РАСХОДЫ, СИЛЫ, СМЕЩЕНИЯ – имена искомых вели-
чин, причем
ДАВЛЕНИЯ = {Р1С, Р2С, Рц10С, Рц20С},
РАСХОДЫ = {Р1С, Q2С, Q3С, Q4С, QПТ},
СИЛЫ = {FШ0, FП0, FФ0},
СМЕЩЕНИЯ = {XF0, XФ0, Z0C},
```

в которых индексом С обозначены стоки итерируемых переменных;

XWO - смещение штока поршня (входная переменная).

Если предложение (9) семантически правильное (т.е. задача разрешима), то система автоматически синтезирует алгоритм решения.

Система итерационных уравнений решается методом Ньютона-Рафсона. Заданная относительная погрешность итераций принята 10⁻⁴. Расчеты выполнялись на ЭВМ ЕС-1052. Время синтеза рабочей программы составляло 5 минут, а расчет одной точки статической характеристики 1-2 секунды. В качестве примера выполнен расчет статической характеристики гидравлического следящего привода со следующими основными параметрами: давления питания и слива $p_{nитo} = 200 \text{ krc/cm}^2$, $p_{cno} = 10 \text{ krc/cm}^2$, площади поршня $f_2 = \pi \times 9^2/4 \text{ cm}^2$, $f_4 = f_2 - \pi \cdot 4^2/4 \text{ cm}^2$, диаметр отверстия в поршне $d_{n\tau} = 0, \text{I cm}$, упругости элементов $e_{\Phi} = 10^{-6} \text{ cm/krc}$, $e_{\kappa P} = 10^{-7} \text{ cm/krc}$, $e_{\Gamma} = 10^{-5} \text{ cm/krc}$, $e_{\kappa} = 0, 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm/krc}$, передаточное отношение рычажной передачи обратной связи k = 0, 3, следящий золотник с перекрытыми рабочими щелями.

На фиг. 13 показана статическая характеристика для следящего привода с приведенными параметрами, без учета люфта крепления и сил трения. в области малых входных смещений × Характеристика разбита на зоны, которые рассчитаны с использованием различных вариантов моделей (на рис. IЗ указаны номера вариантов, при которых расчеты сходятся). Из фиг. ІЗ видно, что статическая характеристика данного привода может быть рассчитана по вариантам № 3, 4 и 5. Полная статическая характеристика привода показана на фиг. 14.

Полученные результаты показывают, что разработанная



Фиг. 13. Статическая характеристика гидравлического следящего привода при малых входных воздействиях (номерами указаны варианты моделей, при которых итерации сходятся).

методика успешно решает задачу расчета статической характеристики гидравлического следящего привода с учетом нелинейных зависимостей и что применяемая вычислительная система является эффективным средством ее практической реализации.



Фиг. 14. Полная статическая характеристика гидравлического следящего привода.

Литература

I. Гроссшмидт Г.Т. Статыи (6) в сборнике "Гидравлика и пневматика металлорежущих станков". — Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1977, № 435, с. 3-63.

2. Кахро М.И., Калья А.П., Тыугу Э.Х. Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ (ПРИЗ). М., Финансы и статистика, 1981. 156 с.

3. G r o ß s c h m i d t G. Anwendung der Mehrpolund Signalflußgraphentheorien zur Berechnung des dynamischen Verhaltens der Ölhydrauliksysteme. - 3.Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge-Teil 1. Dresden, DDR, 1979. S.33-44.

4. G r o ß s c h m i d t G. Matematische Modelle zur Berechnung des statischen und dynamischen Verhaltens des hydraulischen Servoantriebs. - 4.Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge-Teil 2. Magdeburg, DDR, 1981, S. 286-294.

5. Попов Д.Н., Ермаков С.А. и др. Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов. М., Машиностроение, 1978. 142 с. 6. Проектирование следящих гидравлических приводов летательных аппаратов/ Под ред. Н.С. Гамынина. М. Машиностроение, 1981. 312 с.

7. Bowns D.E., Mech M.J., Rolfe A.C. Computer simulation as a first step towards computer aided design of fluid power systems. - 5 th International Fluid Power Symposium. Sept. 13-15, 1978, vol. 1, paper A3. Durham, England, p. 29-46.

8. B a c k é W. Vorausbestimmung des statischen und dynamischen Verhaltens hydraulischer Geräte und Systeme. -O+P, Ölhydraulik und Pneumatik (24), 1980, Nr. 5, S. 390-395.

> G. Großschmidt, J. Pahapill

Iterationsberechnung der statischen Kennlinien des hydraulischen Servoantriebs

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird die Methodik des Modulaufbaus der mathematischen Modellenvariante der statischen Kennlinien des hydraulischen Servoantriebs ermittelt. Die nichtlinearen Beziehungen und die Berechnungsmodelle, welche auf Basis des Programmiersystems PRIZ aufgebaut sind, werden beschrieben.





Цена 80 коп.