

Н.Ф. Метлюк, В.П. Автушко, П.Р. Бартош

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЗВЕННОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ТОРМОЗНОГО ПРИВОДА

В современных пневматических и пневмогидравлических тормозных приводах отдельные пневматические цепи представляют собой различные соединения простейших динамических звеньев. Значительное место в тормозных системах занимают двухзвенные пневматические цепи с последовательным соединением ДЕ-звеньев (Д — дроссель, Е — емкость). Многие аппараты и контуры тормозных приводов в динамической схеме приводятся к двухзвенной пневматической цепи, причем емкость первого ДЕ-звена этой цепи является проточной.

Рассмотрим динамику двухзвенной пневматической цепи (рис. 1, а), которая включает проточную камеру емкостью $\frac{V_1}{RT}$, глухую камеру емкостью $\frac{V_2}{RT}$, дроссели 1 и 2 с удельными проходимостями α_1 и α_2 . Под дросселем понимается местное сопротивление любого вида, выполненное в виде отверстия в стенке, клапана, трубопровода и т.д.

В проточной камере V_1 возможны четыре различных сочетания режимов истечения воздуха через дроссели 1 и 2: а) докритическое истечение через дроссели 1 и 2 (Д—Д); б) надкритическое истечение через дроссель 1 и докритическое — через дроссель 2 (Н—Д); в) докритическое истечение через дроссель 1 и надкритическое — через дроссель 2 (Д—Н); г) надкритическое истечение через дроссели 1 и 2 (Н—Н).

Составляя для каждого узла пневматической цепи уравнения баланса мгновенных массовых расходов [3], можно получить дифференциальные уравнения, описывающие переходные характеристики двухзвенной пневматической цепи. Следует отметить, что сложность полученной системы уравнений будет зависеть от применяемых выражений для мгновенных массовых расходов. Так, если использовать зависимости [1], то при допущении постоянной температуры воздуха ($T = \text{const}$) и при скачкообразном входном воздействии после преобразований по-

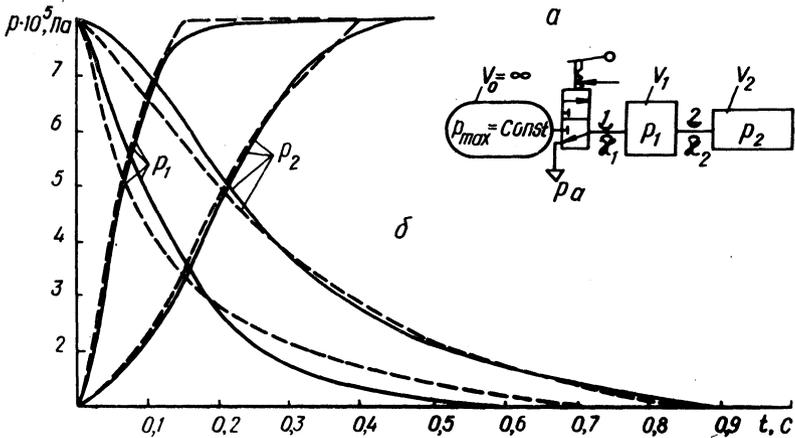


Рис. 1. Схема двухзвенной пневматической цепи (а); динамические характеристики двухзвенной пневматической цепи (— экспериментальные кривые; - - - расчетные кривые) для $V_1 = 2,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $V_2 = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $p_{\text{max}} = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $\alpha_1 = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $\alpha_2 = 6,26 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (б).

лучим следующую систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процесс наполнения емкостей V_1 и V_2 из ресивера:

а) для режима Д-Д ($\frac{p_1}{p_{\text{max}}} > 0,5$; $\frac{p_2}{p_1} > 0,5$):

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\sqrt{2RT}}{V_1} \left[\mu_1 f_1 p_{\text{max}} \sqrt{\frac{p_1}{p_{\text{max}}} \left(1 - \frac{p_1}{p_{\text{max}}}\right)} - \mu_2 f_2 p_1 \sqrt{\frac{p_2}{p_1} \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\mu_2 f_2}{V_2} p_1 \sqrt{2RT \frac{p_2}{p_1} \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)}; \quad (2)$$

б) для режима Д-Н ($\frac{p_1}{p_{\text{max}}} > 0,5$; $\frac{p_2}{p_1} \leq 0,5$):

$$\frac{d p_1}{d t} = \frac{\sqrt{2 R T}}{V_1} \left[\mu_1 f_1 p_{\max} \sqrt{\frac{p_1}{p_{\max}} \left(1 - \frac{p_1}{p_{\max}} \right)} - \frac{\mu_2 f_2}{2} p_1 \right]; \quad (3)$$

$$\frac{d p_2}{d t} = \frac{\mu_2 f_2}{V_2} \sqrt{\frac{R T}{2}} p_1; \quad (4)$$

в) для режима Н-Д ($\frac{p_1}{p_{\max}} \leq 0,5$; $\frac{p_2}{p_1} > 0,5$):

$$\frac{d p_1}{d t} = \frac{\sqrt{2 R T}}{V_1} \left[\frac{\mu_1 f_1}{2} p_{\max} - \mu_2 f_2 p_1 \times \sqrt{\frac{p_2}{p_1} \left(1 - \frac{p_2}{p_1} \right)} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{d p_2}{d t} = \frac{\mu_2 f_2}{V_2} p_1 \sqrt{2 R T \frac{p_2}{p_1} \left(1 - \frac{p_2}{p_1} \right)}; \quad (6)$$

г) для режима Н-Н ($\frac{p_1}{p_{\max}} \leq 0,5$; $\frac{p_2}{p_1} \leq 0,5$):

$$\frac{d p_1}{d t} = \frac{1}{V_1} \sqrt{\frac{R T}{2}} (\mu_1 f_1 p_{\max} - \mu_2 f_2 p_1); \quad (7)$$

$$\frac{d p_2}{d t} = \frac{\mu_2 f_2}{V_2} \sqrt{\frac{R T}{2}} p_1, \quad (8)$$

где f_1 и f_2 — проходные сечения дросселей 1 и 2; R — универсальная газовая постоянная для воздуха; T — абсолютная температура воздуха; p_{\max} , p_1 и p_2 — давление воздуха в ресивере, емкостях V_1 и V_2 ; μ_1 и μ_2 — коэффициенты расхода дросселей 1 и 2.

Получить аналитические зависимости для p_1 и p_2 из приведенной системы уравнений (1)–(8) не представляется возможным. Исследование такой системы весьма сложно и возможно только с применением ЭВМ.

Следует отметить, что применение в качестве исходной формулы Сен-Венана и Ванцеля для мгновенного массового расхода дает еще более сложную систему уравнений.

Учитывая сказанное, практический интерес представляет возможность получить простые аналитические выражения, позволяющие проводить анализ двухзвенных пневматических цепей и оценивать их быстродействие в зависимости от конструктивных параметров звеньев.

Применяя линейные дифференциальные уравнения для массовых расходов [2,3] при допущении постоянной температуры воздуха ($T = \text{const}$) и при скачкообразном входном воздействии, после преобразований получаем следующую систему уравнений, описывающих процесс наполнения емкостей V_1 и V_2 из ресивера с постоянным давлением p_{max} :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d p_1}{d t} &= \frac{1}{V_1} \left[\alpha_1 \alpha_1 p_{\text{max}} - (\alpha_1 + \alpha_2 \alpha_2) p_1 + \alpha_2 p_2 \right]; \\ \frac{d p_2}{d t} &= \frac{\alpha_2}{V_2} (\alpha_2 p_1 - p_2). \end{aligned} \right\} (9)$$

Давления p_1 и p_2 , определяемые по уравнениям (9), должны быть ограничены: $p_{\text{нач}} \leq p_1 \leq p_{\text{max}}$; $p_{\text{нач}} \leq p_2 \leq p_1$.

Так же получается система линейных дифференциальных уравнений, описывающих опораживание емкостей V_1 и V_2 в атмосферу с давлением p_a :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d p_1}{d t} &= \frac{1}{V_1} \left[\alpha_2 \alpha_2 p_2 - (\alpha_1 \alpha_1 + \alpha_2) p_1 + \alpha_1 p_a \right]; \\ \frac{d p_2}{d t} &= \frac{\alpha_2}{V_2} (p_1 - \alpha_2 p_2). \end{aligned} \right\} (10)$$

При этом $p_{\text{max}} \geq p_1 \geq p_a$; $p_1 \geq p_2 \geq p_a$, где α_1 и α_2 — аппроксимирующие коэффициенты соответственно для первого и

второго звена; $\alpha_1 = 1,5$; значение α_2 выбирается в зависимости от $\gamma = \frac{V_2}{V_1}$ и значения p_{\max} .

Решая систему (9), после преобразований получим зависимости, определяющие p_2 и p_1 для случая наполнения емкостей V_1 и V_2 :

$$p_2 = \alpha_1 \alpha_2 p_{\max} + \frac{1}{2} (p_{\text{нач}} - \alpha_1 \alpha_2 p_{\max}) e^{-ht} \times \left[\left(1 + \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}}\right) e^{\sqrt{h^2 - k^2} t} + \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}}\right) \times e^{-\sqrt{h^2 - k^2} t} \right]; \quad (11)$$

$$p_1 = \alpha_1 p_{\max} + \frac{1}{2\alpha_2} (p_{\text{нач}} - \alpha_1 \alpha_2 p_{\max}) e^{-ht} \times \left\{ \left[\left(1 + \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}}\right) e^{\sqrt{h^2 - k^2} t} + \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}}\right) \times e^{-\sqrt{h^2 - k^2} t} \right] \left(1 - \frac{h V_2}{\alpha_2}\right) + \frac{V_2 \sqrt{h^2 - k^2}}{\alpha_2} \times \left[\left(1 + \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}}\right) e^{\sqrt{h^2 - k^2} t} - \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}}\right) \times e^{-\sqrt{h^2 - k^2} t} \right] \right\}, \quad (12)$$

где

$$h = \frac{\gamma \alpha_1 + (\gamma \alpha_2 + 1) \alpha_2}{2V_2}; \quad k^2 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{V_1 V_2}.$$

Значения p_1 и p_2 для случая опораживания емкостей V_1 и V_2 в атмосферу определяются из решения системы (10):

$$p_2 = \frac{p_a}{\alpha_1 \alpha_2} + \frac{1}{2} \left(p_{\max} - \frac{p_a}{\alpha_1 \alpha_2} \right) e^{-ht} \times$$

$$\times \left[\left(1 + \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}} \right) e^{\sqrt{h^2 - k^2} t} + \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}} \right) \times \right.$$

$$\left. \times e^{-\sqrt{h^2 - k^2} t} \right]; \quad (13)$$

$$p_1 = \frac{p_a}{\alpha_1} + \frac{1}{2} \left(p_{\max} - \frac{p_a}{\alpha_1 \alpha_2} \right) e^{-ht} \left\{ \left[\left(1 + \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}} \right) \times \right. \right.$$

$$\times e^{\sqrt{h^2 - k^2} t} + \left. \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}} \right) e^{-\sqrt{h^2 - k^2} t} \left(\alpha_2 - \frac{hV_2}{\alpha_2} \right) + \right.$$

$$+ \frac{V_2 \sqrt{h^2 - k^2}}{\alpha_2} \left[\left(1 + \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}} \right) e^{\sqrt{h^2 - k^2} t} - \right.$$

$$\left. \left. - \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 - k^2}} \right) e^{-\sqrt{h^2 - k^2} t} \right] \right\}, \quad (14)$$

где

$$h = \frac{\gamma \alpha_1 \alpha_2 + (\alpha_2 + \gamma) \alpha_2}{V_2}; \quad k^2 = \alpha_1 \alpha_2 \frac{\alpha_1 \alpha_2}{V_1 V_2}.$$

Анализ уравнений (11) и (13) показывает, что вторые члены в квадратных скобках этих выражений при увеличении t уменьшаются. При достижении $t = t_H$, соответствующего $p_2 = 0,9 p_{\max}$ в случае наполнения, и $t = t_O$, соответствующего $p_2 = 0,213 p_{\max}$ в случае опораживания, эти члены становятся на несколько порядков меньше первых членов в квадратных скобках и ими можно пренебречь. Учитывая указанные обстоятельства, получаем выражения для определения t_H и t_O .

$$t_H = \frac{1}{\sqrt{h^2 - k^2} - h} \ln \left| \frac{2p_{\max} (0,9 - \alpha_1 \alpha_2) \sqrt{h^2 - k^2}}{(p_{\text{нач}} - \alpha_1 \alpha_2 p_{\max}) (h + \sqrt{h^2 - k^2})} \right|; (15)$$

$$t_0 = \frac{1}{\sqrt{h^2 - k^2} - h} \ln \left| \frac{2(0,213 \alpha_1 \alpha_2 p_{\max} - p_a) \sqrt{h^2 - k^2}}{(\alpha_1 \alpha_2 p_{\max} - p_a) (h + \sqrt{h^2 - k^2})} \right|. (16)$$

На рис. 1, б в качестве примера приведены расчетные динамические характеристики двухзвенной пневматической цепи, полученные по уравнениям (9) и (10) (пунктирные линии). Здесь же приведены экспериментальные данные для этой цепи (сплошные линии).

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования динамических характеристик для двухзвенной пневматической цепи при различных ее параметрах показывают, что полученные уравнения удовлетворительно описывают реальные динамические процессы, а выражения (15) и (16) позволяют с достаточной степенью точности (до 5%) оценить время наполнения и опораживания емкости V_2 цепи. Кроме того, разработанная методика позволяет выбрать оптимальные конструктивные параметры пневматических контуров тормозного привода автотранспортных средств.

Л и т е р а т у р а

1. Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М., 1973.
2. Метлюк Н.Ф., Автушко В.П., Горбачев М.И. Динамические характеристики пневматических звеньев тормозного привода автомобиля. - В сб.: Автомобиле- и тракторостроение. Автотракторные двигатели и техническая эксплуатация автомобилей. Минск, 1974, вып. 6.
3. Метлюк Н.Ф. Динамика и методы улучшения переходных характеристик тормозных приводов автомобилей и автопоездов. Автореф. докт. дис. Минск, 1973.