

А.И. БОНДАРЕНКО, аспирант

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТОРМОЗНОГО ПРИВОДА, РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведені математичні моделі пневматичного гальмівного приводу автомобіля КрАЗ-6510, складені з використанням методів Герца Е.В. і Метлюка Н.Ф. Представлені і проаналізовані результати моделювання.

The mathematical models of pneumatic brake drive of car of КрАЗ-6510, made with the use of methods Hertza E. V. and Metlyka N.F. Presented and analysis results of design, are resulted.

Введение. При проектировании тормозных систем особое значение приобретает автоматизация процесса исследования, которая позволяет существенно сократить его сроки и стоимость. Экспериментальное исследование, как правило, является длительным и дорогостоящим процессом. Корректно составленные математические модели и соответствующие программные продукты позволяют получить и проанализировать результаты на стадии проектирования, внести необходимые коррективы.

Анализ последних достижений и публикаций. Вопрос разработки метода, описывающего переходные процессы в пневматическом тормозном приводе (ПТП), и математической модели функции расхода затронут во многих работах как отечественных, так и иностранных ученых [1-3]. Однако на данный момент наиболее распространены и известны среди инженеров, занимающихся динамикой ПТП методы Герца Е.В. и Метлюка Н.Ф. Основное отличие этих двух методов заключается в различных функциях расхода [4].

Цель и постановка задачи. В данной работе была поставлена задача, заключающаяся в составлении математической модели ПТП с использованием различных методов, сравнении между собой результатов, полученных в следствии моделирования для выбора метода наиболее корректно описывающего переходные процессы в ПТП.

Математическая модель пневматического тормозного привода, результаты моделирования. Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих с различными допущениями реальные процессы, протекающие в физической системе.

В математических моделях контуров ПТП были приняты следующие допущения:

- давление воздуха на входе в двухсекционный тормозной кран не изменяется за время переходного процесса и равно P_{\max} ;
- отсутствуют утечки воздуха из системы;
- температура воздуха в полостях аппаратов тормозного привода не изменяется;

– в процессе наполнения и опорожнения теплообмен с окружающей средой отсутствует;

– пневмосопротивления клапанов и трубопроводов принимаем сосредоточенными;

– объем исполнительных аппаратов принимаем постоянным после достижения давления $P_{om} = 0,15 \dots 0,18 \text{ МПа}$. Величина P_{om} необходима для выборки всех зазоров и преодоления сил трения в механизме и стягивающих колодок пружин;

– течение газа – невязкое;

– режим течения газа – докритический;

– режим течения воздуха – смешанный, турбулентный режим возможен в течении малого промежутка времени в момент открытия дросселей при наполнении и опорожнении емкостей;

ПТП КрАЗ-6510 состоит из двух независимых контуров, связанных с тормозным краном: верхняя секция с контуром заднего моста – 1-й контур, нижняя с контуром среднего и переднего мостов – 2-й контур.

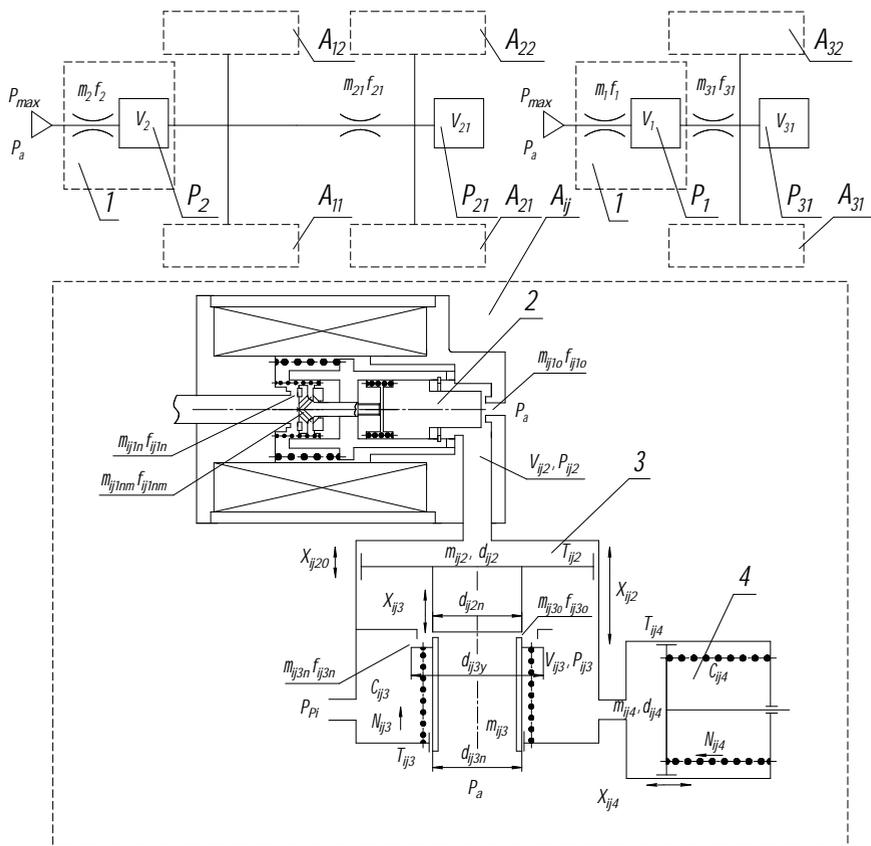
Расчетная схема ПТП с АБС (в качестве исполнительных аппаратов тормозные цилиндры), приведена на рис. 1.

Уравнения расходов для первого контура (рис. 1) при торможении имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{dm}{dt} \right)_1 - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\beta_{31}} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{E_{31}} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\beta_{31}} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\beta_{321}} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\beta_{311}} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{E_{31}} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\beta_{321}} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{E_{322}} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\beta_{323n}} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{E_{323}} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\beta_{311}} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{E_{312}} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\beta_{313n}} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{E_{313}} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\left(\frac{dm}{dt} \right)_{D_i}$ – уравнение для определения мгновенного массового расхода воздуха через местное сопротивление (дроссель);

$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{E_i}$ – уравнение состояния воздуха в емкости.



i – номер оси; j – номер борта; 1 – тормозной кран; 2 – модулятор давления; 3 – ускорительный клапан; 4 – тормозной цилиндр.

Рисунок 1 – Расчетная схема исследуемого ПТП

Уравнения расходов для первого контура (рис. 1) при растормаживании:

$$\begin{cases}
 \left(\frac{dm}{dt}\right)_{31} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_1 - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E1} = 0; \\
 \left(\frac{dm}{dt}\right)_{321} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{311} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{31} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E31} = 0; \\
 \left(\frac{dm}{dt}\right)_{321} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E322} = 0;
 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{dm}{dt}\right)_{323o} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E\ 323} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt}\right)_{311} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E\ 312} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt}\right)_{313o} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E\ 313} = 0. \end{cases}$$

Запишем уравнение для определения мгновенного массового расхода воздуха через местное сопротивление (дроссель):

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Di} = m \cdot f \cdot V_{kp} \cdot P_0 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_0 - P_1}{B \cdot P_0 - P_1}, \quad (3)$$

где m – коэффициент расхода через дроссель;
 f – площадь проходного сечения дросселя, м²;
 V_{kp} – критическая скорость истечения воздуха, м/с;
 P_0 – давление воздуха перед дросселем, Па;
 A – постоянный коэффициент [1];
 R – газовая постоянная для воздуха, равная 287,14;
 T – температура воздуха перед дросселем, К;
 P_1 – давление воздуха за дросселем, Па;
 B – постоянный коэффициент [1].

$$V_{kp} = \sqrt{k \cdot R \cdot T}, \quad (4)$$

где k – показатель адиабаты, равный 1,4.

Запишем уравнение состояния воздуха в емкости:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Ei} = \frac{P_E}{R \cdot T} \cdot \frac{dV_E}{dt} + \frac{V_E}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_E}{dt}, \quad (5)$$

где P_E – давление в емкости, Па;

V_E – объем емкости, м³.

Раскрывая уравнения (1, 2), используя гиперболическую функцию расхода [1], уравнение для определения мгновенного массового расхода воздуха через местное сопротивление (3), уравнение состояния воздуха (5) получим систему уравнений (6, 7), составленную по методу Н.Ф. Метлюка.

Торможение:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dP_1}{dt} &= \frac{V_{kp} \cdot A \cdot k \cdot (m_1 \cdot f_1 \cdot P_{\max} \cdot \frac{P_{\max} - P_1}{B \cdot P_{\max} - P_1} - m_{31} \cdot f_{31} \cdot P_1 \cdot \frac{P_1 - P_{31}}{B \cdot P_1 - P_{31}})}{V_1}; \\
\frac{dP_{31}}{dt} &= \frac{V_{kp} \cdot A \cdot k}{V_{31}} \cdot (m_{31} \cdot f_{31} \cdot P_1 \cdot \frac{P_1 - P_{31}}{B \cdot P_1 - P_{31}} - m_{321} \cdot f_{321} \cdot P_{31} \cdot \frac{P_{31} - P_{322}}{B \cdot P_{31} - P_{322}} - \\
&\quad - m_{311} \cdot f_{311} \cdot P_{31} \cdot \frac{P_{31} - P_{312}}{B \cdot P_{31} - P_{312}}); \\
\frac{dP_{3j2}}{dt} &= \frac{k \cdot (m_{3j1} \cdot f_{3j1} \cdot V_{kp} \cdot P_{31} \cdot A \cdot \frac{P_{31} - P_{3j2}}{B \cdot P_{31} - P_{3j2}} - P_{3j2} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt})}{V_{3j20} + X_{3j2} \cdot S_{3j2}}; \\
\frac{dP_{3j3}}{dt} &= \frac{k \cdot (m_{3j3n} \cdot f_{3j3n} \cdot V_{kp} \cdot P_{p3} \cdot A \cdot \frac{P_{p3} - P_{3j3}}{B \cdot P_{p3} - P_{3j3}} + P_{3j3} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt} - P_{3j3} \cdot S_{3j4} \cdot \frac{dX_{3j4}}{dt})}{V_{3j30} - X_{3j2} \cdot S_{3j2} + X_{3j4} \cdot S_{3j4}}, \\
&\text{если } P_{3j3} \leq P_{om}; \\
\frac{dP_{3j3}}{dt} &= \frac{k \cdot (m_{3j3n} \cdot f_{3j3n} \cdot V_{kp} \cdot P_{p3} \cdot A \cdot \frac{P_{p3} - P_{3j3}}{B \cdot P_{p3} - P_{3j3}} + P_{3j3} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt})}{V_{3j3} - X_{3j2} \cdot S_{3j2}}, \text{ если } P_{3j3} > P_{om}.
\end{aligned} \right\} (6)$$

Растормаживание:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dP_1}{dt} &= \frac{-V_{kp} \cdot A \cdot k \cdot (m_1 \cdot f_1 \cdot P_1 \cdot \frac{P_1 - P_a}{B \cdot P_1 - P_a} - m_{31} \cdot f_{31} \cdot P_{31} \cdot \frac{P_{31} - P_1}{B \cdot P_{31} - P_1})}{V_1}; \\
\frac{dP_{31}}{dt} &= \frac{-V_{kp} \cdot A \cdot k}{V_{31}} \cdot (m_{31} \cdot f_{31} \cdot P_{31} \cdot \frac{P_{31} - P_1}{B \cdot P_{31} - P_1} - m_{321} \cdot f_{321} \cdot P_{322} \cdot \frac{P_{322} - P_{31}}{B \cdot P_{322} - P_{31}} - \\
&\quad - m_{311} \cdot f_{311} \cdot P_{312} \cdot \frac{P_{312} - P_{31}}{B \cdot P_{312} - P_{31}}); \\
\frac{dP_{3j2}}{dt} &= \frac{k \cdot (-m_{3j1} \cdot f_{3j1} \cdot V_{kp} \cdot P_{3j2} \cdot A \cdot \frac{P_{3j2} - P_{31}}{B \cdot P_{3j2} - P_{31}} - P_{3j2} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt})}{V_{3j20} + X_{3j2} \cdot S_{3j2}}; \\
\frac{dP_{3j3}}{dt} &= \frac{k \cdot (-m_{3j3o} \cdot f_{3j3o} \cdot V_{kp} \cdot P_{3j3} \cdot A \cdot \frac{P_{3j3} - P_a}{B \cdot P_{3j3} - P_a} + P_{3j3} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt} - P_{3j3} \cdot S_{3j4} \cdot \frac{dX_{3j4}}{dt})}{V_{3j30} - X_{3j2} \cdot S_{3j2} + X_{3j4} \cdot S_{3j4}}, \\
&\text{если } P_{3j3} \leq P_{om}; \\
\frac{dP_{3j3}}{dt} &= \frac{k \cdot (-m_{3j3o} \cdot f_{3j3o} \cdot V_{kp} \cdot P_{3j3} \cdot A \cdot \frac{P_{3j3} - P_a}{B \cdot P_{3j3} - P_a} + P_{3j3} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt})}{V_{3j3} - X_{3j2} \cdot S_{3j2}}, \text{ если } P_{3j3} > P_{om}.
\end{aligned} \right\} (7)$$

Уравнения движения поршней описываются следующими выражениями:

$$\frac{d^2 X_{ij4}}{dt^2} = \frac{P_{ij3} \cdot S_{ij4} - C_{ij4} \cdot X_{ij4} - N_{ij4} - T_{ij4} \cdot \text{sign}(X_{ij4})}{m_{ij4}}; \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 X_{ij2}}{dt^2} = \frac{P_{ij2} \cdot S_{ij2} - P_{ij3} \cdot S_{ij2} - T_{ij2} \cdot \text{sign}(X_{ij2})}{m_{ij2}}, \text{ если } X_{ij2} < X_{ij20}; \\ \frac{d^2 X_{ij2}}{dt^2} = \frac{1}{m_{ij2} + m_{ij3}} \cdot (P_{ij2} \cdot S_{ij2} - P_{ij3} \cdot (S_{ij2} - S_{ij2n}) - P_{Pi} \cdot (S_{ij3y} - S_{ij3n}) - \\ - C_{ij3} \cdot (X_{ij2} - X_{ij20}) - N_{ij3} - T_{ij3} \cdot \text{sign}(X_{ij3}) - T_{ij2} \cdot \text{sign}(X_{ij2})), \text{ если } X_{ij2} \geq X_{ij20}. \end{array} \right. \quad (9)$$

Уравнение движения поршня (8), в случае установки тормозной камеры вместо тормозного цилиндра, примет следующий вид:

$$\frac{d^2 X_{ij4}}{dt^2} = \frac{P_{ij3} \cdot S_{ij4} - C_{ij4} \cdot X_{ij4} - N_{ij4}}{m_{ij4}}. \quad (10)$$

Предложенная в [2] газодинамическая функция для смешанного дросселя записывается в виде следующего уравнения для докритического режима течения:

$$G = 0,156 \cdot m \cdot f \cdot \frac{P_0}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\frac{P_1^{\frac{2}{k}}}{P_0} - \frac{P_1^{\frac{k+1}{k}}}{P_0}}. \quad (11)$$

На основании рис. 1 и выражения (11) составлена математическая модель первого контура исследуемого ПТП (метод Герца Е.В.):

Торможение:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dP_1}{dt} \cdot V_1 = k \cdot R \cdot T \cdot [G(P_{\max}, P_1) - G(P_1, P_{31})]; \\
\frac{dP_{31}}{dt} \cdot V_{31} = k \cdot R \cdot T \cdot [G(P_1, P_{31}) - G(P_{31}, P_{322}) - G(P_{31}, P_{312})]; \\
\frac{dP_{3j2}}{dt} \cdot (V_{3j20} + X_{3j2} \cdot S_{3j2}) + k \cdot P_{3j2} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt} = k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{31}, P_{3j2}); \\
\frac{dP_{3j3}}{dt} \cdot (V_{3j30} + X_{3j4} \cdot S_{3j4} - X_{3j2} \cdot S_{3j2}) + k \cdot P_{3j3} \cdot S_{3j4} \cdot \frac{dX_{3j4}}{dt} - k \cdot P_{3j3} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt} = \\
= k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{p3}, P_{3j3}), \text{ если } P_{3j3} \leq P_{om}; \\
\frac{dP_{3j3}}{dt} \cdot (V_{3j3} - X_{3j2} \cdot S_{3j2}) - k \cdot P_{3j3} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt} = k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{p3}, P_{3j3}), \text{ если } P_{3j3} > P_{om};
\end{array} \right. \quad (12)$$

Растормаживание:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dP_1}{dt} \cdot V_1 = k \cdot R \cdot T \cdot [-G(P_1, P_a) + G(P_{31}, P_1)]; \\
\frac{dP_{31}}{dt} \cdot V_{31} = k \cdot R \cdot T \cdot [-G(P_{31}, P_1) + G(P_{322}, P_{31}) + G(P_{312}, P_{31})]; \\
\frac{dP_{3j2}}{dt} \cdot (V_{3j20} + X_{3j2} \cdot S_{3j2}) + k \cdot P_{3j2} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt} = -k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{3j2}, P_{31}); \\
\frac{dP_{3j3}}{dt} \cdot (V_{3j30} + X_{3j4} \cdot S_{3j4} - X_{3j2} \cdot S_{3j2}) + k \cdot P_{3j3} \cdot S_{3j4} \cdot \frac{dX_{3j4}}{dt} - k \cdot P_{3j3} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt} = \\
= -k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{3j3}, P_a), \text{ если } P_{3j3} \leq P_{om}; \\
\frac{dP_{3j3}}{dt} \cdot (V_{3j3} - X_{3j2} \cdot S_{3j2}) - k \cdot P_{3j3} \cdot S_{3j2} \cdot \frac{dX_{3j2}}{dt} = -k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{3j3}, P_a), \text{ если } P_{3j3} > P_{om}.
\end{array} \right. \quad (13)$$

На основании рис. 1 и выражений (3-5) составлена математическая модель второго контура исследуемого ПТП (метод Метлюка Н.Ф.):

Торможение:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dP_2}{dt} = \frac{V_{kp} \cdot A \cdot k}{V_2} \cdot (m_2 \cdot f_2 \cdot P_{\max} \cdot \frac{P_{\max} - P_2}{B \cdot P_{\max} - P_2} - m_{121} \cdot f_{121} \cdot P_2 \cdot \frac{P_2 - P_{122}}{B \cdot P_2 - P_{122}} - \\
- m_{111} \cdot f_{111} \cdot P_2 \cdot \frac{P_2 - P_{112}}{B \cdot P_2 - P_{112}} - m_{21} \cdot f_{21} \cdot P_2 \cdot \frac{P_2 - P_{21}}{B \cdot P_2 - P_{21}}); \\
\frac{dP_{21}}{dt} = \frac{V_{kp} \cdot A \cdot k}{V_{21}} \cdot (m_{21} \cdot f_{21} \cdot P_2 \cdot \frac{P_2 - P_{21}}{B \cdot P_2 - P_{21}} - m_{221} \cdot f_{221} \cdot P_{21} \cdot \frac{P_{21} - P_{222}}{B \cdot P_{21} - P_{222}} - \\
- m_{211} \cdot f_{211} \cdot P_{21} \cdot \frac{P_{21} - P_{212}}{B \cdot P_{21} - P_{212}}); \\
\frac{dP_{1j2}}{dt} = \frac{k \cdot (m_{j1} \cdot f_{j1} \cdot V_{kp} \cdot P_2 \cdot A \cdot \frac{P_2 - P_{1j2}}{B \cdot P_2 - P_{1j2}} - P_{1j2} \cdot S_{1j2} \cdot \frac{dX_{1j2}}{dt})}{V_{1j20} + X_{1j2} \cdot S_{1j2}};
\end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dP_{2j2}}{dt} &= \frac{k \cdot (m_{2j1} \cdot f_{2j1} \cdot V_{kp} \cdot P_{21} \cdot A \cdot \frac{P_{21} - P_{2j2}}{B \cdot P_{21} - P_{2j2}} - P_{2j2} \cdot S_{2j2} \cdot \frac{dX_{2j2}}{dt})}{V_{2j20} + X_{2j2} \cdot S_{2j2}}; \\
\frac{dP_{ij3}}{dt} &= \frac{k \cdot (m_{ij3} \cdot f_{ij3} \cdot V_{kp} \cdot P_{Pi} \cdot A \cdot \frac{P_{Pi} - P_{ij3}}{B \cdot P_{Pi} - P_{ij3}} + P_{ij3} \cdot S_{ij2} \cdot \frac{dX_{ij2}}{dt} - P_{ij3} \cdot S_{ij4} \cdot \frac{dX_{ij4}}{dt})}{V_{ij30} - X_{ij2} \cdot S_{ij2} + X_{ij4} \cdot S_{ij4}}, \\
\text{если } P_{ij3} &\leq P_{om}; \\
\frac{dP_{ij3}}{dt} &= \frac{k \cdot (m_{ij3n} \cdot f_{ij3n} \cdot V_{kp} \cdot P_{Pi} \cdot A \cdot \frac{P_{Pi} - P_{ij3}}{B \cdot P_{Pi} - P_{ij3}} + P_{ij3} \cdot S_{ij2} \cdot \frac{dX_{ij2}}{dt})}{V_{ij3} - X_{ij2} \cdot S_{ij2}}, \text{ если } P_{ij3} > P_{om}.
\end{aligned} \right\}$$

Растормаживание:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dP_2}{dt} &= \frac{-V_{kp} \cdot A \cdot k}{V_2} \cdot (m_2 \cdot f_2 \cdot P_2 \cdot \frac{P_2 - P_a}{B \cdot P_2 - P_a} - m_{21} \cdot f_{121} \cdot P_{122} \cdot \frac{P_{122} - P_2}{B \cdot P_{122} - P_2} - \\
&- m_{111} \cdot f_{111} \cdot P_{112} \cdot \frac{P_{112} - P_2}{B \cdot P_{112} - P_2} - m_{21} \cdot f_{21} \cdot P_{21} \cdot \frac{P_{21} - P_2}{B \cdot P_{21} - P_2}); \\
\frac{dP_{21}}{dt} &= \frac{-V_{kp} \cdot A \cdot k}{V_{21}} \cdot (m_{21} \cdot f_{21} \cdot P_{21} \cdot \frac{P_{21} - P_1}{B \cdot P_{21} - P_1} - m_{221} \cdot f_{221} \cdot P_{222} \cdot \frac{P_{222} - P_{21}}{B \cdot P_{222} - P_{21}} - \\
&- m_{211} \cdot f_{211} \cdot P_{212} \cdot \frac{P_{212} - P_{21}}{B \cdot P_{212} - P_{21}}); \\
\frac{dP_{1j2}}{dt} &= \frac{k \cdot (-m_{1j1} \cdot f_{1j1} \cdot V_{kp} \cdot P_{1j2} \cdot A \cdot \frac{P_{1j2} - P_2}{B \cdot P_{1j2} - P_2} - P_{1j2} \cdot S_{1j2} \cdot \frac{dX_{1j2}}{dt})}{V_{1j20} + X_{1j2} \cdot S_{1j2}}; \\
\frac{dP_{2j2}}{dt} &= \frac{k \cdot (-m_{2j1} \cdot f_{2j1} \cdot V_{kp} \cdot P_{2j2} \cdot A \cdot \frac{P_{2j2} - P_{21}}{B \cdot P_{2j2} - P_{21}} - P_{2j2} \cdot S_{2j2} \cdot \frac{dX_{2j2}}{dt})}{V_{2j20} + X_{2j2} \cdot S_{2j2}}; \\
\frac{dP_{ij3}}{dt} &= \frac{k \cdot (-m_{ij30} \cdot f_{ij30} \cdot V_{kp} \cdot P_{ij3} \cdot A \cdot \frac{P_{ij3} - P_a}{B \cdot P_{ij3} - P_a} + P_{ij3} \cdot S_{ij2} \cdot \frac{dX_{ij2}}{dt} - P_{ij3} \cdot S_{ij4} \cdot \frac{dX_{ij4}}{dt})}{V_{ij30} - X_{ij2} \cdot S_{ij2} + X_{ij4} \cdot S_{ij4}}, \\
\text{если } P_{ij3} &\leq P_{om}; \\
\frac{dP_{ij3}}{dt} &= \frac{k \cdot (-m_{ij30} \cdot f_{ij30} \cdot V_{kp} \cdot P_{ij3} \cdot A \cdot \frac{P_{ij3} - P_a}{B \cdot P_{ij3} - P_a} + P_{ij3} \cdot S_{ij2} \cdot \frac{dX_{ij2}}{dt})}{V_{ij3} - X_{ij2} \cdot S_{ij2}}, \text{ если } P_{ij3} > P_{om}.
\end{aligned} \right\} \quad (15)$$

На основании рис. 1 и выражения (11) составлена математическая модель второго контура исследуемого ПТП (метод Герца Е.В.):

Торможение:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dP_2}{dt} \cdot V_2 = k \cdot R \cdot T \cdot [G(P_{\max}, P_2) - G(P_2, P_{122}) - G(P_2, P_{112}) - G(P_2, P_{21})]; \\
 \frac{dP_{21}}{dt} \cdot V_{21} = k \cdot R \cdot T \cdot [G(P_2, P_{21}) - G(P_{21}, P_{222}) - G(P_{21}, P_{212})]; \\
 \frac{dP_{1j2}}{dt} \cdot (V_{1j20} + X_{1j2} \cdot S_{1j2}) + k \cdot P_{1j2} \cdot S_{1j2} \cdot \frac{dX_{1j2}}{dt} = k \cdot R \cdot T \cdot G(P_2, P_{1j2}); \\
 \frac{dP_{2j2}}{dt} \cdot (V_{2j20} + X_{2j2} \cdot S_{2j2}) + k \cdot P_{2j2} \cdot S_{2j2} \cdot \frac{dX_{2j2}}{dt} = k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{21}, P_{2j2}); \\
 \frac{dP_{ij3}}{dt} \cdot (V_{ij30} + X_{ij4} \cdot S_{ij4} - X_{ij2} \cdot S_{ij2}) + k \cdot P_{ij3} \cdot S_{ij4} \cdot \frac{dX_{ij4}}{dt} - k \cdot P_{ij3} \cdot S_{ij2} \cdot \frac{dX_{ij2}}{dt} = \\
 = k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{pi}, P_{ij3}), \text{ если } P_{ij3} \leq P_{om}; \\
 \frac{dP_{ij3}}{dt} \cdot (V_{ij3} - X_{ij2} \cdot S_{ij2}) - k \cdot P_{ij3} \cdot S_{ij2} \cdot \frac{dX_{ij2}}{dt} = k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{pi}, P_{ij3}), \text{ если } P_{ij3} > P_{om}.
 \end{array} \right. \quad (16)$$

Растромаживание:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dP_2}{dt} \cdot V_2 = k \cdot R \cdot T \cdot [-G(P_2, P_a) + G(P_{122}, P_2) + G(P_{112}, P_2) + G(P_{21}, P_2)]; \\
 \frac{dP_{21}}{dt} \cdot V_{21} = k \cdot R \cdot T \cdot [-G(P_{21}, P_2) + G(P_{222}, P_{21}) + G(P_{212}, P_{21})]; \\
 \frac{dP_{1j2}}{dt} \cdot (V_{1j20} + X_{1j2} \cdot S_{1j2}) + k \cdot P_{1j2} \cdot S_{1j2} \cdot \frac{dX_{1j2}}{dt} = -k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{1j2}, P_2); \\
 \frac{dP_{2j2}}{dt} \cdot (V_{2j20} + X_{2j2} \cdot S_{2j2}) + k \cdot P_{2j2} \cdot S_{2j2} \cdot \frac{dX_{2j2}}{dt} = -k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{2j2}, P_{21}); \\
 \frac{dP_{ij3}}{dt} \cdot (V_{ij30} + X_{ij4} \cdot S_{ij4} - X_{ij2} \cdot S_{ij2}) + k \cdot P_{ij3} \cdot S_{ij4} \cdot \frac{dX_{ij4}}{dt} - k \cdot P_{ij3} \cdot S_{ij2} \cdot \frac{dX_{ij2}}{dt} = \\
 = -k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{ij3}, P_a), \text{ если } P_{ij3} \leq P_{om}; \\
 \frac{dP_{ij3}}{dt} \cdot (V_{ij3} - X_{ij2} \cdot S_{ij2}) - k \cdot P_{ij3} \cdot S_{ij2} \cdot \frac{dX_{ij2}}{dt} = -k \cdot R \cdot T \cdot G(P_{ij3}, P_a), \text{ если } P_{ij3} > P_{om}.
 \end{array} \right. \quad (17)$$

Блок-схема математической модели, описывающей переходные процессы в ПТП в случае рабочего торможения, представлена на рис. 2 а)

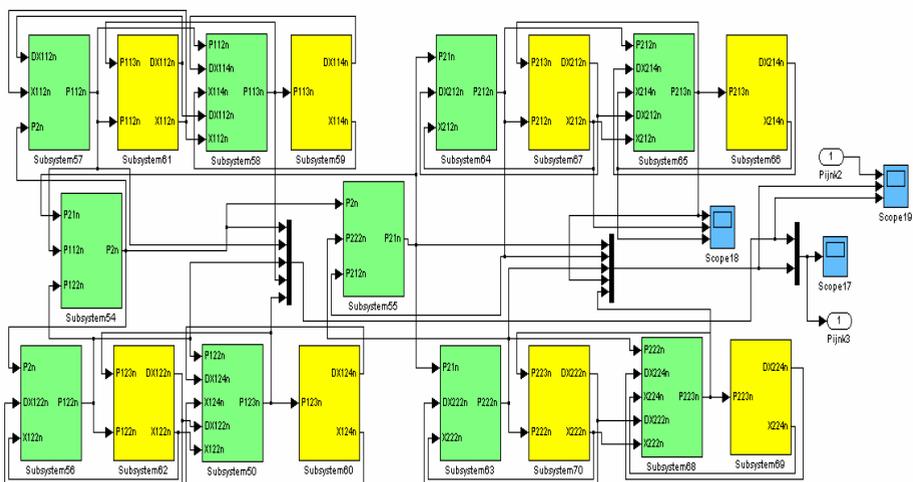
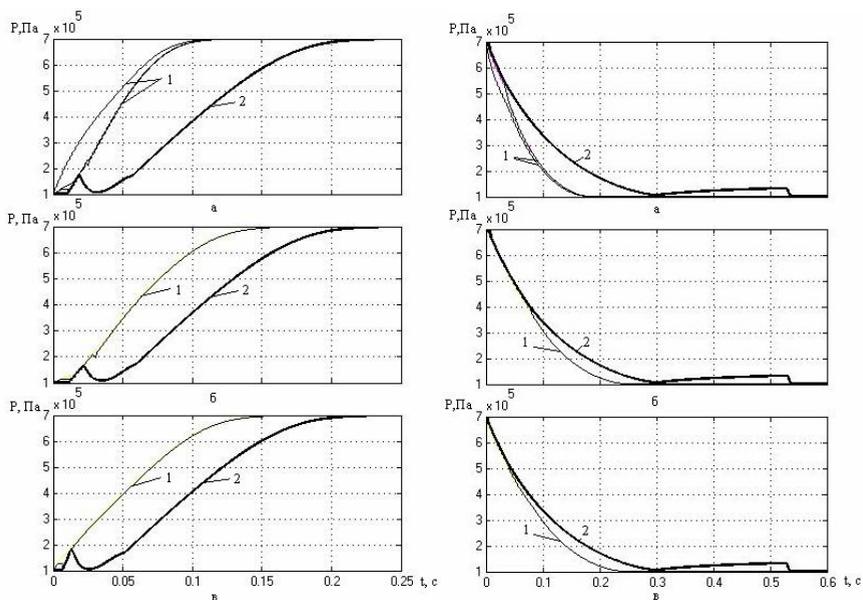


Рисунок 2 – Блок-схема математической модели (метод Метлюка Н.Ф.), описывающая растормаживание 2-го контура ПТП

В результате математического моделирования для обоих контуров ПТП получены кривые изменения давления в емкостях ПТП как при торможении, так и растормаживании (см. рис. 3, 4).

Результаты моделирования, приведенные на рис. 3-4 показывают, что с течением времени, как при торможении, так и растормаживании происходит синхронное изменение давления в исполнительных аппаратах ПТП за счет установки ускорительных клапанов непосредственно перед исполнительными аппаратами.

Пневматический тормозной привод обладает наибольшим временем срабатывания по сравнению с гидравлическим, электрическим, механическим приводами. После установки ускорительного клапана в ПТП время до момента, когда давление в исполнительных аппаратах ПТП достигнет 90% от P_{max} , составляет $\approx 0,17$ с (по методу Метлюка Н.Ф. и Герца Е.В.). При растормаживании падение давления в исполнительных аппаратах ПТП осуществляется за время $\approx 0,22$ с до значения давления, составляющего 10% от P_{max} (по методу Метлюка Н.Ф. и Герца Е.В.).



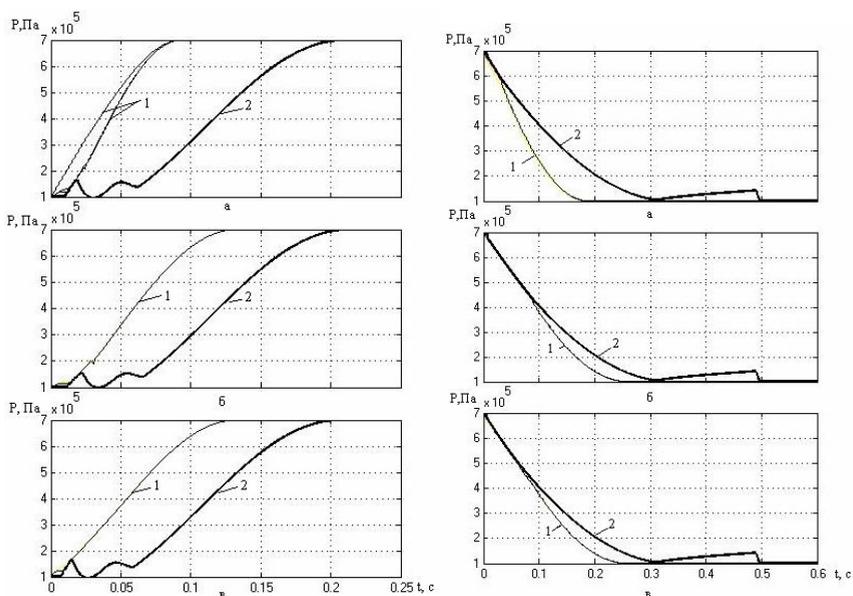
1 – давления в емкостях ПТП; 2 – давление в исполнительных аппаратах ПТП; а – 1-й контур; б, в – 2-й контур (исполнительные аппараты и емкости среднего и переднего моста соответственно)

Рисунок 3 – Изменение давления в емкостях ПТП с течением времени при торможении и растормаживании (метод Метлюка Н.Ф.)

Выводы. Составленные математические модели достаточно точно описывают процессы, происходящие в ПТП при рабочем торможении.

Размещение ускорительного клапана непосредственно перед исполнительными аппаратами позволяет осуществлять синхронное наполнение и опорожнение исполнительных аппаратов первого и второго контуров.

Результаты, полученные при моделировании, свидетельствуют о том, что при одних и тех же исходных данных, но при различных методах составления математических моделей ПТП (рассматривался метод Герца Е.В. и Метлюка Н.Ф.) время наполнения и опорожнения исполнительных аппаратов ПТП практически одинаково.



1 – давления в емкостях ПТП; 2 – давление в исполнительных аппаратах ПТП; а – 1-й контур; б, в – 2-й контур (исполнительные аппараты и емкости среднего и переднего моста соответственно)

Рисунок 4 – Изменение давления в емкостях ПТП с течением времени при торможении и растормаживании (метод Герца Е.В.)

Список литературы: 1. Метлюк Н.Ф., Автушко В.П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобиля. – М.: Машиностроение, 1980.– 231 с. 2. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с. 3. Туренко А.Н. Повышение эффективности торможения грузовых и пассажирских автотранспортных средств с пневматическим тормозным приводом. – Харьков: ХГАДТУ, 1997. – 353 с. 4. Крамской А.В. Совершенствование методов расчета динамики пневмоаппаратов и пневматического тормозного привода автотранспортных средств: Дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Харьков, 2006. – 191 с.

Поступила в редколлегию 21.05.08