УДК 62-59:629.113.001.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТУРА ЭЛЕКТРОННО-ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТОРМОЗНОГО ПРИВОДА С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ МОДУЛЯТОРОМ

**С.И. Ломака, профессор, к.т.н., Л.А. Рыжих, профессор, к.т.н.,
А.Н. Красюк, аспирант, ХНАДУ**

Аннотация. *Разработана математическая модель контура электронно-пневматического тормозного привода с пропорциональным модулятором, позволяющая оценивать быстродействие и качество следящего действия пропорционального модулятора.*

Ключевые слова: *математическая модель контура, электронно-пневматический тормозной привод, пропорциональный модулятор, шаговый двигатель.*

Введение

Электронно-пневматический тормозной привод (ЭПТП) появился в начале 80-х и в настоящее время применяется на автопоездах зарубежного производства [1]. Достоинством ЭПТП является то, что, обеспечивая высокое быстродействие, на базе его без дополнительного оборудования выполняются новые различные сочетания функции активной безопасности транспортного средства. Например, такие как электронно-пневматической тормозной привод – регулирование тормозных сил между осями, антиблокировочная тормозная система и другие.

Анализ публикаций

В современных ЭПТП следящее действие обеспечивается по-разному. На автомобилях «Scania» [1] следящее действие, т.е. пропорциональность между нажатием электрического подпедального модуля и давлением в исполнительных органах (тормозной камере), достигается за счет установки датчика давления после модулятора. Такое конструктивное исполнение позволяет иметь обратную связь по давлению и достигать высокого быстродействия. Однако в таких ЭПТП появляется эффект значительного перерегулирования, что существенно влияет на качество следящего действия.

Цель и постановка задачи

В настоящее время широко внедряются пропорциональные модуляторы на базе электромагнитов шаговых электродвигателей [2], которые не требуют обратной связи по датчику давления. Целью данной работы является создание математической модели контура ЭПТП, позволяющей оценивать быстродействие и качество следящего действия пропорционального модулятора.

Математическая модель контура ЭПТП

На рис. 1 представлена принципиальная схема ЭПТП.

Пропорциональный модулятор 3 состоит из следующих элементов: 7 – корпус; 8 – шаговый электродвигатель с шестерней; 9 – золотник, совмещенный с выпускным клапаном; 10 – пружина выпускного клапана; 11 – пневмопоршень; 12 – пружина пневмопоршня; 13 – впускной клапан; 14 – пружина впускного клапана; 15 – крышка с выпускным окном. Пропорциональный модулятор 3 работает следующим образом: при нажатии на педаль тормоза от подпедального электрического модуля 1 электрический сигнал поступает на электронный блок управления 2, который определяет и передает необходимое число импульсов на шаговый двигатель 8.

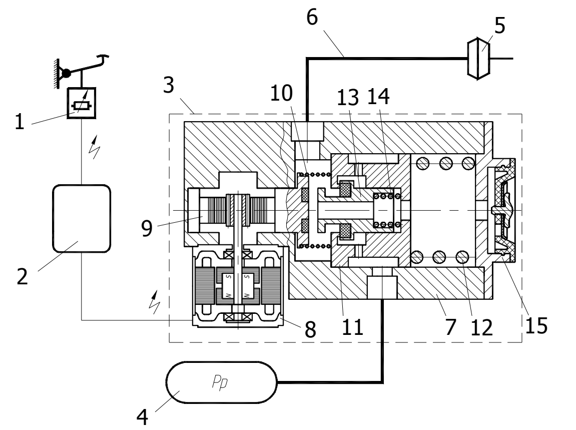

Рис. 1. Принципиальная схема ЭПТП: 1 – подпедальный электрический модуль; 2 – электронный блок управления; 3 – пропорциональный модулятор; 4 – ресивер, 5 – тормозная камера тип 20; 6 – соединительный трубопровод длиной 1 м

В результате происходит перемещение золотника 9 вправо; это приводит к закрытию выпускного клапана, при этом происходит отсоединение тормозной камеры 5 от атмосферы. Дальнейшее перемещение золотника 9 приводит к открытию впускного клапана 13 и перепуска сжатого воздуха от ресивера 4 через полости пропорционального модулятора 3 в тормозную камеру 5. Отработав необходимые импульсы, поданные от электронного блока управления, шаговый двигатель останавливается, при этом золотник 9 и впускной 13 также останавливаются, а пневмопоршень 11 продолжает движение, под действием давления сжатого воздуха, до тех пор, пока не закроется впускной клапан 13. Так перемещение запорно-регулирующего устройства приводит к установлению давления воздуха в тормозной камере 5 пропорционально нажатию на педаль тормоза, тем самым обеспечивая повышение качества регулирования процесса торможения транспортных средств, оборудованных электронно-пневматическим приводом тормозов.

При математическом моделировании были использованы параметры шагового электродвигателя, использованного при создании опытного образца пропорционального модулятора, имеющего следующую характеристику:

Наименование двигателя –	Fulling motor FL57STH76-2804B
Тип –	гибридный, четырехфазный, универсальный
Напряжение фазы, В	4,17
Ток фазы, А	2,8
Сопротивление фазы, Ом	1,5
Индуктивность фазы, мГн	6,8
Напряжение питания, В	12
Погрешность, %	5
Масса электродвигателя, кг	1,4
Момент на валу электродвигателя, кг.с	31,0

Математическая модель шагового электродвигателя состоит из уравнений (1), (2), (3) и условий (4) для каждой обмотки статора. Управлением являются сигналы: ga(t), gb(t). Основным выходным сигналом является угловое положение ротора β, которое имеет ряд устойчивых положений, находящихся друг от друга на один шаг. Начало отсчета угла β совмещено с осью статора.

В общем случае шаговый двигатель может быть описан с помощью модели электрической машины с двумя обмотками на статоре и одной обмоткой на роторе рис. 2.

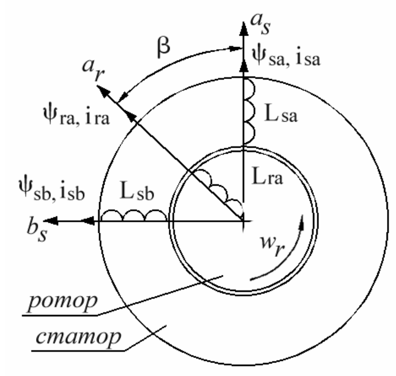

Рис. 2. Расчетная модель шагового двигателя

Уравнения математической модели такой электрической машины могут быть записаны в виде (1)

$$\begin{cases} \dfrac{di_{sa}}{dt} = \dfrac{1}{L_{sa}} \cdot (u_{sa} - r_{sa} \cdot i_{sa} - \\ -C \cdot M \cdot \cos(\beta) + M \cdot i_{ra} \cdot \sin(\beta) \cdot w_r); \\ \dfrac{di_{sb}}{dt} = \dfrac{1}{L_{sb}} \cdot (u_{sb} - r_{sb} \cdot i_{sb} - \\ -Kr(*) \cdot M \cdot \cos(\beta) - M \cdot i_{ra} \cdot \sin(\beta) \cdot w_r); \\ \dfrac{di_{ra}}{dt} = Kr(*); \\ \dfrac{d\beta}{dt} = w_r; \\ \dfrac{dw_r}{dt^2} = \dfrac{p}{J}\left(M_e - M_c - k \cdot w_r\right), \end{cases} \quad (1)$$

где i_{sa}, i_{sb}, i_{ra} – токи в обмотках статора и ротора по осям a_s, b_s, a_r; u_{sa} ,u_{sb} ,u_{ra} – напряжения на обмотках по осям a_s, b_s, a_y; r_{sa} , r_{sb} , r_{ra} – активные сопротивления обмоток по осям a_s, b_s, a_r; L_{sa}, L_{sb}, $L_{ra} = L_{r0} + L_{r1} \times \cos(4 \times \beta)$ – индуктивности обмоток по осям a_s, b_s, a_r; M – взаимная индуктивность; β – угловое положение ротора; wr – угловая скорость; M_c – момент сопротивления; M_e – электромагнитный момент; J – момент инерции ротора; p – число пар полюсов.

В модели (1) используется следующее обозначение

$$
\begin{aligned}
&Kr(*) = (L_{sa} \cdot L_{sb} \cdot (L_{r0} + L_{r1} - 2 \cdot L_{r1} \times \\
&\times \sin^2(2 \cdot \beta)) - M^2 \cdot L_{sa} + M^2 \cdot \cos^2(\beta) \times \\
&\times (L_{sa} - L_{sb}))^{-1} \times [L_{sa} \cdot L_{sb} \cdot (u_{ra} - r_{ra} \cdot i_{ra}) + \\
&+4 \cdot L_{r1} \cdot w_r \cdot i_{ra} \cdot L_{sa} \cdot L_{sb} \cdot \sin(4 \cdot \beta) + M \times \\
&\times \sin(\beta) \cdot L_{sa} \cdot (r_{sb} \cdot i_{sb} - u_{sb}) + \\
&+M \cdot \cos(\beta) \cdot L_{sb} \cdot (r_{sa} \cdot i_{sa} - u_{sa})].
\end{aligned}
\tag{2}
$$

Электромагнитный момент определен уравнением

$$
\begin{aligned}
&M_e = i_{ra} \cdot (M \cdot i_{sb} \cdot \cos(\beta) - M \cdot i_{sa} \times \\
&\times \sin(\beta) - 2 \cdot i_{sa} \cdot L_{r1} \cdot \sin(4 \cdot \beta)).
\end{aligned}
\tag{3}
$$

Напряжения u_{sa}, u_{sb} на обмотках статора шагового двигателя, как правило, формируют с помощью специальной электронной системы управления, выходные каскады которой строятся по мостовой или полумостовой схемам. Использование электронных схем отражается на переходных процессах в шаговом двигателе. Поэтому в модели (1) для каждой обмотки шагового двигателя необходимо учитывать условия (4) (для краткости условия приведены для одной обмотки, так как для второй – аналогичны).

В соотношениях (4) приняты следующие обозначения: $ga(t)$ – задание для формирователя импульсов ($ga(t) = 1$ – на обмотке положительный импульс тока или напряжения; $ga(t) = 0$ – обмотка обесточена; $ga(t) = –1$ – на обмотке отрицательный импульс тока или напряжения); h – шаг интегрирования при решении уравнений модели (1); U – напряжение источника электропитания; UD – прямое падение напряжения на диоде; $R_{ON} << R_{OFF}$ – сопротивления открытого и закрытого транзисторного ключа (при этом считается время переключения транзисторов и диодов пренебрежимо малым по сравнению с длительностью управляющих импульсов).

$$
\begin{cases}
\text{если} \quad ga(t) = 1, \ \text{то} \ u_{sa} = U; \quad r_{sa} = r + 2 \cdot R_{ON}; \\
\text{если} \quad (ga(t) = 0) \ \ \&(ga(t-h) = 1), \\
\text{то} \ \begin{cases} \text{если} \quad i_{sa} > 0, \ \text{то} \ \ u_{sa} = -(E + 2 \cdot U_D); \\ r_{sa} = r + 2 \cdot R_{ON}; \\ \text{если} \quad i_{sa} \le 0, \ \text{то} \ \ u_{sa} = 0; \ \ r_{sa} = R_{OFF}; \end{cases} \\
\text{если} \quad ga(t) = -1, \ \text{то} \ \ u_{sa} = -U; \quad r_{sa} = r + 2 \cdot R_{ON}; \\
\text{если} \quad (ga(t) = 0) \ \ \&(ga(t-h) = -1), \\
\text{то} \ \begin{cases} \text{если} \quad i_{sa} < 0, \ \text{то} \ \ u_{sa} = E + 2 \cdot U_D; \\ r_{sa} = r + 2 \cdot R_{ON}; \\ \text{если} \quad i_{sa} \ge 0, \ \text{то} \ \ u_{sa} = 0; \ \ r_{sa} = R_{OFF}. \end{cases}
\end{cases}
\tag{4}
$$

При математическом описании динамики переходного процесса ЭПТП принят ряд допущений:
– пневматическая цепь рассматривается как система с сосредоточенными параметрами;
– температура воздуха в емкостях принимается одинаковой и постоянной за время переходного процесса;
– давление воздуха в ресивере $p0$ не изменяется за время переходного процесса;
– отсутствуют утечки из пневмосистемы;
– открытие клапанов происходит мгновенно.

На основе принципиальной схемы ЭПТП (рис. 1) составлена расчетная схема ЭПТП с пропорциональным модулятором, представленная на рис. 3.

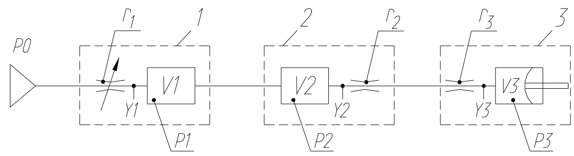

Рис. 3. Расчетная схема ЭПТП с пропорциональным модулятором: 1 – пропорциональный модулятор; 2 – соединительный трубопровод; 3 – тормозная камера; $V1$ – объем управляющей полости модулятора; $V2$ – объем полости соединительного трубопровода; $V3$ – объем тормозной камеры; $p0$ – давление в ресивере; $p1$ – давление в управляющей полости модулятора; $p2$ – давление в полости соединительного трубопровода; $p3$ – давление в тормозной камере

Динамическая характеристика наполнения звеньев дроссель-емкость (ДЕ) описывается системой дифференциальных уравнений газодинамических функций, которая в общем случае имеет вид

$$\left\{\begin{aligned}
&\frac{dp_1}{dt}=\frac{k\cdot\mu_1\cdot f_1\cdot V_{\text{кр}}\cdot p_0}{V_1}\cdot\frac{A(p_0-p_1)}{B\cdot p_0-p_1}-\\
&-\frac{k\cdot\mu_2\cdot f_2\cdot V_{\text{кр}}\cdot p_1}{V_1}\cdot\frac{A(p_1-p_2)}{B\cdot p_1-p_2}-\\
&-\frac{k\cdot\mu_3\cdot f_3\cdot V_{\text{кр}}\cdot p_2}{V_1}\cdot\frac{A(p_2-p_3)}{B\cdot p_2-p_3};\\
&\frac{dp_2}{dt}=\frac{k\cdot\mu_2\cdot f_2\cdot V_{\text{кр}}\cdot p_1}{V_2}\cdot\frac{A(p_1-p_2)}{B\cdot p_1-p_2}-\\
&\frac{k\cdot\mu_3\cdot f_3\cdot V_{\text{кр}}\cdot p_2}{V_2}\cdot\frac{A(p_2-p_3)}{B\cdot p_2-p_3};\\
&\frac{dp_3}{dt}=\frac{\mu_3\cdot f_3\cdot V_{\text{кр}}\cdot p_2\cdot\dfrac{A(p_2-p_3)}{B\cdot p_2-p_3}}{\dfrac{F^2}{C_{\text{пр}}}\left(1+\dfrac{1}{k}\right)\cdot p_3+\left(V_0-\dfrac{F^2}{C_{\text{пр}}}\cdot p_3\right)};\\
&\frac{df_1}{dt}=\pi D_{\text{вп}}\cdot\left(\frac{\pi\cdot r_{\text{ш}}}{180^\circ}\cdot\frac{d\beta}{dt}-\frac{d^2h_{\text{п}}}{dt^2}\right);\\
&\frac{d^2h_{\text{п}}}{dt^2}=\frac{(p_1-p_{\text{нач}})+F_{\text{зол}}-F_{\text{тр}}}{C_{\text{пр}}},
\end{aligned}\right. \qquad (5)$$

где k – показатель адиабаты, k = 1,4; μ_1 – коэффициент расхода пневмосопротивления клапана модулятора; μ_2 – коэффициент расхода пневмосопротивления трубопровода; μ_3 – коэффициенты расхода пневмосопротивления тормозной камеры; f_1 – площадь поперечного сечения клапана модулятора; f_2 – площадь поперечного сечения трубопровода; f_3 – площадь поперечного сечения тормозной камеры; $V_{\text{кр}}$ – критическая скорость, $V_{\text{кр}}=\sqrt{kRT}$, R – газовая постоянная, для воздуха R = 287,14 м^2/(с^2·К); T – абсолютная температура воздуха перед дросселем; A и B – коэффициенты аппроксимации газодинамических функций, A = 0,654, B = 1,13; F_2 – функция площади диафрагмы тормозной камеры; $C_{\text{пр}}$ – жесткость пружины; V_0 – начальный объем тормозной камеры; $D_{\text{вп}}$ – диаметр впускного клапана; $r_{\text{ш}}$ – радиус шестерни; $h_{\text{п}}$ – перемещение пневмопоршня; $p_{\text{нач}}$ – давление, при котором начинает перемещаться пневмопоршень; $F_{\text{зол}}$ – сила, действующая на пневмопоршень от золотника; $F_{\text{тр}}$ – сила трения между пневмопоршнем и корпусом.

Динамическая характеристика в случае опорожнения описывается аналогичной системой дифференциальных уравнений газодинамических функций

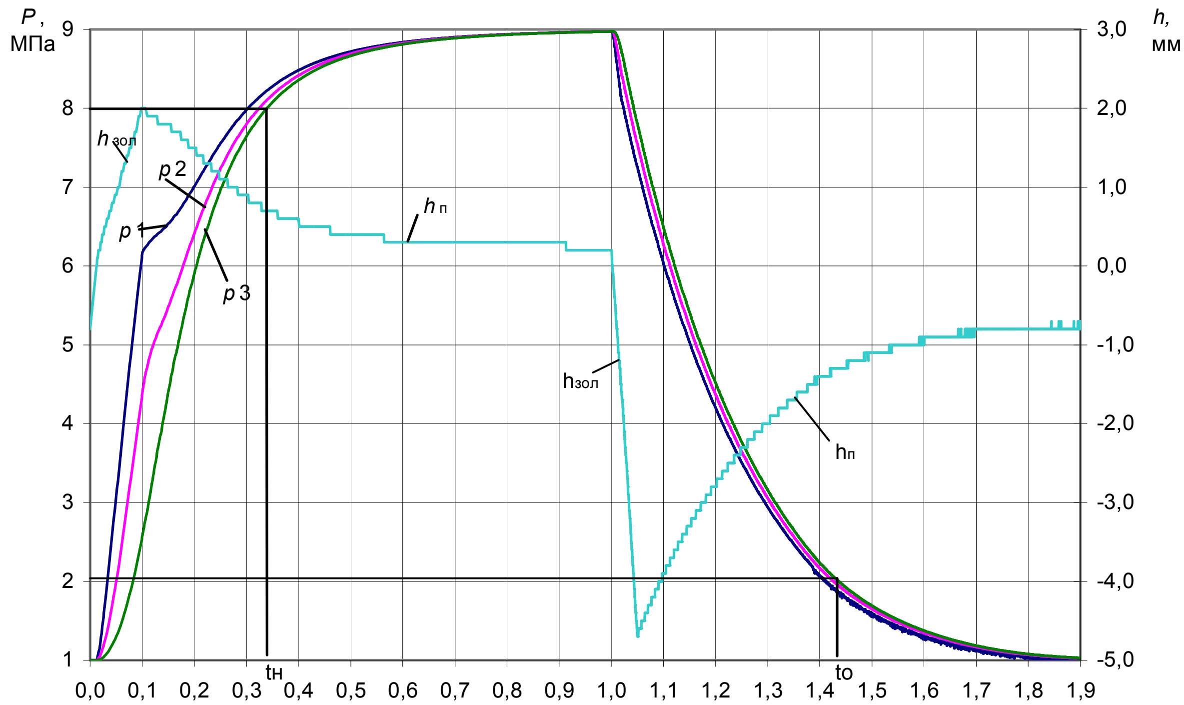

Рис. 4. Расчетная динамическая характеристика контура ЭПТП с пропорциональным модулятором

$$
\begin{cases}
\dfrac{dp_1}{dt} = -\dfrac{k \cdot \mu_1 \cdot f_1 \cdot V_{\text{кр}} \cdot p_1}{V_1} \cdot \dfrac{A(p_1 - p_0)}{B \cdot p_1 - p_0} + \\
+\dfrac{k \cdot \mu_2 \cdot f_2 \cdot V_{\text{кр}} \cdot p_2}{V_1} \cdot \dfrac{A(p_2 - p_1)}{B \cdot p_2 - p_1} + \\
+\dfrac{k \cdot \mu_3 \cdot f_3 \cdot V_{\text{кр}} \cdot p_3}{V_1} \cdot \dfrac{A(p_3 - p_2)}{B \cdot p_3 - p_2}; \\
\dfrac{dp_2}{dt} = \dfrac{k \cdot \mu_3 \cdot f_3 \cdot V_{\text{кр}} \cdot p_3}{V_2} \cdot \dfrac{A(p_3 - p_2)}{B \cdot p_3 - p_2} - \\
-\dfrac{k \cdot \mu_2 \cdot f_2 \cdot V_{\text{кр}} \cdot p_2}{V_2} \cdot \dfrac{A(p_2 - p_1)}{B \cdot p_2 - p_1}; \\
\dfrac{dp_3}{dt} = -\dfrac{\mu_3 \cdot f_3 \cdot V_{\text{кр}} \cdot p_3 \cdot \dfrac{A(p_3 - p_2)}{B \cdot p_3 - p_2}}{\dfrac{F^2}{C_{\text{пр}}}\left(1 + \dfrac{1}{k}\right) \cdot p_3 + \left(V_0 - \dfrac{F^2}{C_{\text{пр}}} \cdot p_3\right)}; \\
\dfrac{df_1}{dt} = \pi D_{\text{вп}} \cdot \left(\dfrac{\pi \cdot r_{\text{ш}}}{180^\circ} \cdot \dfrac{d\beta}{dt} - \dfrac{d^2 h_{\text{п}}}{dt^2}\right); \\
\dfrac{d^2 h_{\text{п}}}{dt^2} = \dfrac{(p_1 - p_{\text{нач}}) + F_{\text{зол}} - F_{\text{тр}}}{C_{\text{пр}}}.
\end{cases}
\qquad (6)
$$

Расчетная динамическая характеристика пропорционального модулятора электронно-пневматической тормозной системы представлена на рис. 4.

Выполнение математического моделирования контура ЭПТП и сравнение с экспериментальными данными показало высокое схождение результатов. Применение в контуре ЭПТП разработанного пропорционального модулятора позволяет выполнить нормативные международные требования, обеспечить высокое быстродействие и качество следящего действия, а также реализовать различное сочетание функций (ЭПТП – РТС – АБС и т.д.) активной безопасности транспортного средства.

Выводы

Разработана математическая модель контура ЭПТП с пропорциональным модулятором. Проведенное с ее помощью математическое моделирование динамических процессов показало высокую степень адекватности данной математической модели. Сравнение экспериментальных исследований аналогичного контура ЭПТП и полученных с помощью математической модели обеспечивает погрешность не более 3%. Это позволяет на стадии проектирования ЭПТП определять его динамические характеристики по быстродействию и оценивать качество следящего действия такой системы активной безопасности.

Литература

1. Клюшкин Г.Г., Галамин В.А., Перфильев В.С., Кравцов Н.В. Электронная тормозная система Кнорр-Бремзе – шаг к новому уровню активной безопасности грузового автотранспорта // Грузовик. – Изд-во «Машиностроение». – 2002. – № 9. – С. 43 – 45.
2. Пат. 36321 Україна, МПК B60T 8/36 Пропорціональний модулятор електронно-пневматичної гальмівної системи: Пат. 36321 Україна, МПК B60T 8/36; Туренко А.Н., Ломака С.Й., Клименко В.І., Рижих Л.О., Тишковець С.В., Чебан А.А., Красюк О.М. – № 200805078; Заявл. 21.04.2008; Опубл. 27.10.2008. – 7 с.
3. Нейдорф Р.А., Солоха А.А. Исследование возможностей квазиоптимального по быстродействию управления шаговым двигателем // Детерминированные системы. – 2006. – №2(12). – С. 111 – 119.
4. Метлюк Н.Ф., Автушко В.П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М: Машиностроение, 1980. – 232 с.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2009 г.