

сов 3-й международной научно-практической конференции (Гомель, 3–4 окт. 2019 г.). – Гомель : Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2019. – С. 104–105.

6. Жданович, Ч. И. Реализация тяговых возможностей трактора с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 1(54). – С. 4–5.

7. Стенд для испытания трансмиссий / Режим доступа: <http://ytoblr.by/Стендовое-оборудование/> – Дата доступа: 12.05.2021.

Представлено 15.05.2021

УДК 629.114

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПИТАЮЩЕЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА ТОРМОЗОВ**

### **MATHEMATICAL MODEL OF THE FEEDING PART ELECTROPNEUMATIC BRAKE DRIVE**

**А. И. Рахлей**, канд. техн. наук, доц.,

**А. С. Поварехо**, канд. техн. наук, доц.,

Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

A. Pavarekha, PhD in Engineering, Associate Professor,

A. Rakhley, PhD in Engineering, Associate Professor

Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*Приведены некоторые результаты теоретического исследования динамических характеристик питающей части электропневматической тормозной системы, где в качестве управляющего элемента, регулирующего давление используется неследящий электроклапан.*

*Some results of a theoretical study of the dynamic characteristics of the supply part of an electropneumatic brake system, where a non-icing electric valve is used as a control element regulating the pressure, are presented.*

*Ключевые слова: пневмопривод тормозов, электропневмоклапан, динамические характеристики, конструктивные параметры.*

*Key words: pneumatic brake drive, electric pneumatic valve, dynamic characteristics, design parameters.*

## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение средних скоростей движения тракторных поездов обуславливает, в первую очередь, повышение требований ко всем элементам их тормозных систем.

Для оценки эффективности предлагаемого решения и выбора параметров электропневматической цепи системы подготовки сжатого воздуха были получены динамические характеристики исследуемого пневмопривода, с помощью разработанной математической модели.

Математическая модель питающей части электропневмопривода тормозов составлена с использованием основных законов теории электрических цепей, преобразованных применительно к пневматическим цепям [1].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При составлении математической модели приняты следующие допущения, позволяющие упростить расчеты и в то же время получить достаточно корректные результаты:

- характеристики сопротивления в коммуникациях питающей части для пульсирующего потока воздуха применяются такими же, как и для стационарного потока;

- силы инерции подпружиненных элементов реальной системы малы по сравнению с силами давления сжатого воздуха и не оказывают влияния на динамику пневмосистемы;

- элементы исполнительной части пневмосистемы не оказывают влияние на качественную сторону динамических процессов в питающей части, а их влияние на количественную сторону динамических характеристик задано постоянным наибольшим расходом воздуха;

- в питающей части отсутствуют резонансные явления, возникающие при совпадении частот собственных колебаний столба воздуха в коммуникациях с частотой гармонического возмущающего воздействия, генерируемого поршневым компрессором;

– температура сжатого воздуха перед местными сопротивлениями и за ними равна.

Кроме того, приняты дополнительные упрощения и допущения, позволяющие избежать изменений детализации схем и усложнения расчетных уравнений. Так, элементы с распределенными параметрами заменены элементами с сосредоточенными характеристиками, так как в данном случае распределение давления по длине трубопровода не представляет практического интереса.

Для математического описания динамических процессов в питающей части (рисунок 1) были разработаны ее математические модели, позволяющие наглядно представить полный цикл регулирования давления в ресивере. При этом период работы питающей части между двумя срабатываниями электропневмоклапана на верхнем пределе регулирования разделен на четыре фазы:

1 фаза – наполнение ресивера сжатым воздухом.

2 фаза – срабатывание электропневмоклапана на верхнем пределе регулирования (переключение компрессора на холостой ход).

3 фаза – снижение давления сжатого воздуха в ресивере вследствие расхода его потребителями (компрессор работает в режиме выпуска воздуха в атмосферу под минимальным давлением).

4 фаза – срабатывание электропневмоклапана на нижнем пределе регулирования (включение компрессора на накачивание воздуха в ресивер).

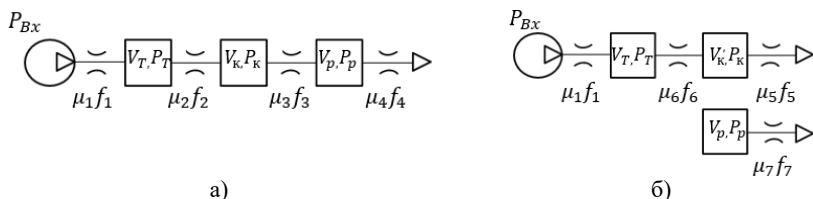


Рисунок 1 – Расчетная схема математической модели питающей части электропневмопривода тормозов

а – наполнение ресивера сжатым воздухом; б – снижение давления воздуха в ресивере (компрессор работает в режиме выпуска воздуха в атмосферу)

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику питающей части с электропневмоклапаном, составленная на основе закона узлов имеет вид:

I фаза. Наполнение ресивера сжатым воздухом.

$$U_r = -\frac{1}{2} \cdot f'(z) \cdot (r^2 - R_0^2) / r;$$

$$\frac{dp_\kappa}{dt} = \frac{A \cdot V_{\kappa p} \cdot k}{V_\kappa} \left[ \mu_2 f_2 \cdot p_T \frac{p_T - p_\kappa}{B \cdot p_T - p_\kappa} - \mu_3 f_3 \cdot p_\kappa \frac{p_\kappa - p_p}{B \cdot p_\kappa - p_p} \right];$$

$$\frac{dp_p}{dt} = \frac{A \cdot V_{\kappa p} \cdot k}{V_\kappa} \left[ \mu_3 f_3 \cdot p_\kappa \frac{p_\kappa - p_p}{B \cdot p_\kappa - p_p} - \mu_4 f_4 \cdot p_p \frac{p_p - p_a}{B \cdot p_p - p_a} \right].$$

II фаза. Срабатывание электропневмоклапана на верхнем пределе регулирования. Условие срабатывания:

$$p_{pi} > p_{pi-1} \text{ и } p_{pi} \geq p_{max}.$$

III фаза. Снижения давления воздуха вследствие расхода его потребителями.

$$\frac{dp_T}{dt} = \frac{A \cdot V_{\kappa p} \cdot k}{V_T} \left[ \mu_1 f_1 \cdot p_{ex} \frac{p_{ex} - p_T}{B \cdot p_{ex} - p_T} - \mu_6 f_6 \cdot p_T \frac{p_T - p_\kappa}{B \cdot p_T - p_\kappa} \right];$$

$$\frac{dp_\kappa}{dt} = \frac{A \cdot V_{\kappa p} \cdot k}{V_{\kappa 1}} \left[ \mu_6 f_6 \cdot p_T \frac{p_T - p_\kappa}{B \cdot p_T - p_\kappa} - \mu_5 f_5 \cdot p_\kappa \frac{p_\kappa - p_a}{B \cdot p_\kappa - p_a} \right];$$

IV фаза. Срабатывание электропневмоклапана на нижнем пределе регулирования. Условия срабатывания:

$$p_{pi} < p_{pi-1} \text{ и } p_{pi} \leq p_{min},$$

где  $p_T$  – давление сжатого воздуха в емкости, эквивалентной трубопроводу от компрессора до электропневмоклапана, МПа;

$$\varphi_{\text{вын}} = \arccos \left[ 1 - 2 \cdot \left( \frac{1 + a_m}{\frac{1}{\varepsilon^m}} - a_m \right) \right] - \text{давление в соединении нагнетательного трубопровода с цилиндром компрессора, МПа;}$$

– давление в полости электропневмоклапана, МПа;  $p_p$  – давление в ресивере, МПа;  $V_T$  – объем трубопровода, соединяющего компрессор с электропневмоклапаном, м<sup>3</sup>;  $V_K$ ,  $V_{K1}$  – объемы полостей электропневмоклапана, сообщающих компрессор с ресивером и с атмосферой соответственно, м<sup>3</sup>;  $V_p$  – объем ресивера, м<sup>3</sup>;  $A$ ,  $B$  – постоянные гиперболической функции расхода [1];  $V_{KP}$  – критическая скорость сжатого воздуха, м/с;  $k$  – показатель адиабаты [1];  $\mu_1 f_1 \dots \mu_7 f_7$  – пропускные способности пневмосопротивлений, м<sup>2</sup>;  $p_{\min}$ ,  $p_{\max}$  – верхний и нижний пределы регулирования давления сжатого воздуха в ресивере, МПа.

Сигнал на входе питающей части ( $p_{\text{ex}}$ ) можно представить, как импульс давления, генерируемого компрессором, распространяющийся в трубопроводе со скоростью, равной местной скорости звука, при этом в момент начала нагнетания воздух, заключенный в системе, находится в состоянии покоя. По мере открытия нагнетательного клапана и выхода воздуха в нагнетательный трубопровод, давление в системе возрастает на конечную величину, и к началу очередного такта нагнетания равно номинальному значению, соответствующему показаниям манометров с инерцией, достаточной чтобы не реагировать на колебания давления.

Таким образом, давление на выходе из компрессора можно описать системой уравнений [2]

$$p_{\text{ex}}(t) = \begin{cases} P_T \left( 1 + \frac{V_{\text{кр}} \cdot V_{\text{раб}} \cdot \omega_{\kappa} \cdot \lambda_{\kappa}}{2 \cdot f \cdot R \cdot T} \cdot \sin \omega_{\kappa} t \right) & \text{при } \frac{\pi(2n+1) + \varphi_{\text{вын}}}{\omega_{\kappa}} \leq t \leq \frac{\pi(2n+1)}{\omega_{\kappa}}, \\ P_T & \text{при } \frac{\pi(2n+1)}{\omega_{\kappa}} \leq t \leq \frac{\pi(2n+3) - \varphi_{\text{вын}}}{\omega_{\kappa}}, \end{cases}$$

где  $V_{\text{раб}}$  – рабочий объем компрессора,  $\text{м}^3$ ;  $\omega_{\kappa}$  – частота вращения вала компрессора,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  – время,  $\text{с}$ ;  $f$  – площадь сечения трубопровода на выходе из цилиндра компрессора,  $\text{м}^2$ ;  $R$  – газовая постоянная,  $\text{м}^2 / (\text{с}^2 \text{К})$ ;  $T$  – температура воздуха,  $\text{К}$ ;  $\lambda_{\kappa}$  – коэффициент производительности компрессора [3],  $\lambda_{\kappa} = a - b \cdot p_u$ ; ;  $p_u$  – избыточное давление в системе,  $\text{МПа}$ ;  $\varphi_{\text{вын}}$  – угол, соответствующий началу открытия нагнетательного клапана компрессора, рад.

$$\varphi_{\text{вын}} = \arccos \left[ 1 - 2 \cdot \left( \frac{1 + a_m}{\varepsilon^{\frac{1}{m}}} - a_m \right) \right].$$

где  $a_m$  – относительная величина метрового пространства компрессора;  $\varepsilon$  – отношение давлений в цилиндре компрессора, равное отношению давления нагнетания к давлению всасывания;  $m$  – показатель политропы сжатия [3].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель позволяет оценить эффективность предлагаемого решения, и выбрать параметры электропневматической цепи системы подготовки сжатого воздуха на основе рассчитанных динамических характеристик исследуемого пневмопривода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Метлюк, Н. Ф., Автушко, В. П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М. : Машиностроение, 1980.

2. Баргашевич, Л. В. Исследование питающей части пневмосистемы трактора класса 14 кН. Канд. дисс. – Минск, 1979.

3. Френкель, М. И. Поршневые компрессоры. – Л. : Машиностроение, 1969.

Представлено 1.04.2021

УДК 629.01

**КОНЦЕПЦИЯ, ЗАДАЧИ, СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ  
СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ  
БЕСПИЛОТНОГО ТРАМВАЯ**

CONCEPT, TASKS, STRUCTURE AND ALGORITHMS OF THE  
COLLISION PREVENTION SYSTEM OF AN UNMANNED TRAM

**В. Д. Майстренко**, инж., **Г. А. Таяновский**, канд. техн. наук, доц.,

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Беларусь

V. Mystrenko, engineer,

G. Tayanousky, Ph.D. in Engineering, Associate Professor

Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*Выбрана концепция и изложены результаты изысканий в области разработки комплекса задач, структуры и алгоритмов системы предотвращения столкновения беспилотного трамвая.*

*The concept was chosen and the results of research in the field of developing a set of tasks, structure and algorithms of the unmanned tram collision prevention system were presented.*

*Ключевые слова: трамвай беспилотный, компоновка, безопасность, концепция.*

*Keywords: unmanned tram, layout, safety, concept.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Блочное-модульное построение современных беспилотных трамваев предполагает появление новых компоновочных схем машин, предназначенных для специфики конкретных сфер эксплуатации,