

УДК 629.45-592

Э. И. ГАЛАЙ, доктор технических наук, А. В. ДЕНИСЕНКО, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЕ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТОРМОЗА

Рассмотрены газодинамические процессы в тормозах пассажирского вагона. Реальный процесс наполнения рабочей камеры и тормозного цилиндра моделируется без учета стохастичности исходных и влияющих факторов и без учета изменения газодинамических параметров сжатого воздуха в переходных процессах. Задача по определению времени повышения давления в тормозных цилиндрах решается методом Рунге-Кутты для дифференциальных уравнений с учетом фактора наличия двух видов истечения – сверхкритического и подкритического.

Реальные физические процессы, протекающие при электропневматическом торможении (ЭПТ) в процессе наполнения сжатым воздухом рабочей камеры (РК) и тормозного цилиндра (ТЦ), целесообразно моделировать более простыми процессами стохастичности исходных и влияющих факторов, а также без учета изменения газодинамических параметров сжатого воздуха как рабочего тела в переходных процессах.

В процессе торможения давление в ТЦ и РК электровоздухораспределителя (ЭВР) повышается за счет сжатого воздуха из запасного резервуара. Калиброванное дроссельное отверстие диаметром 1,8 мм в седле тормозного вентиля ЭВР позволяет создать в камере РК, а значит и в тормозном цилиндре, давление 0,3 МПа за 2,5–3,5 с. При торможении с разрядкой тормозной магистрали (ТМ) запасной резервуар (ЗР), из которого достаточно быстро происходит наполнение камеры РК и ТЦ, отключен от ТМ, поэтому можно пренебречь теплообменом воздуха с окружающей средой. Процесс истечения воздуха из ЗР принимаем адиабатическим.

Задача газодинамического расчета при действии ЭПТ заключается в идентификации временных зависимостей $p_{рк}(t)$ или $p_{тц}(t)$, позволяющих определить величину давления в РК и тормозных цилиндрах при торможении и отпуске тормоза. Поэтому работу электропневматического тормоза пассажирского вагона рассмотрим при напряженном состоянии – экстренное торможение (ЭТ) с разрядкой ТМ. В такой ситуации прекращается питание ЗР сжатым воздухом, однако давление в нем оказывается несколько выше давления в магистрали ТМ, ввиду её быстрой разрядки.

В случаях истечения сжатого воздуха при наполнении и опорожнении РК и ТЦ для упрощения применим линейную аппроксимацию расходных характеристик нелинейных сопротивлений, которыми являются калиброванные отверстия и клапаны. Для этого целесообразно экспериментально определить коэффициент расхода μ или эффективное проходное сечение дросселя μf (f – площадь поперечного сечения канала).

Задача по определению времени повышения давления в камере РК, которое определяет и время повышения давления в тормозном цилиндре, может быть решена численным методом Рунге-Кутты для дифференциальных уравнений [1].

На основе этого метода построим разностную схему четвертого порядка точности, время наполнения t каме-

ры РК разбивается на n интервалов одинаковой продолжительности $t = nh$. Число n интервалов по времени может быть определено с учетом необходимой точности расчета, в частности для оптимального значения $\Delta p = \Delta p_{\min}$ возрастания давления в рабочей камере на каждом шаге (интервале)

$$n = \frac{p_{\max} - p_a}{\Delta p_{\min}}, \quad (1)$$

где p_{\max} – абсолютное максимальное давление в рабочей камере; p_a – атмосферное давление; 0,0981 МПа.

Продолжительность процесса τ принимается несколько превышающей время наполнения РК, известное из характеристики ЭВР. Тогда

$$\Delta t = h = \frac{\tau}{n}. \quad (2)$$

Значение p_{\max} принимается равным максимальному давлению в ТЦ. Учитывая, что зарядное давление в тормозной системе пассажирского поезда составляет 0,5–0,52 МПа (избыточное), можно принять $p_{\max} = 0,38$ МПа (избыточное). Время наполнения РК ориентировочно принимаем 3,5 с [2, 3]. Фактически $p_{тц} = p_{\max}$ зависит от объема запасного резервуара.

Опыт показывает, что наполнение камеры РК и ТЦ, то есть срабатывание тормозов в различных вагонах по длине поезда, происходит за время, отличающееся от средних значений. Это вызвано некоторым различием в величине давления в ТМ и ЗР на удалении от локомотивного компрессора и крана машиниста, а также допусками на диаметр отверстия в клапане и на усилие пружины клапана.

В общем случае газодинамический процесс при наполнении камеры РК и тормозного цилиндра из запасного резервуара с начальным давлением p_a описывается дифференциальным уравнением [4]

$$\frac{dp}{dt} = \frac{kRT}{V} G(\beta) - \frac{kpdV}{Vdt}, \quad (3)$$

с начальным условием $p(0) = p_a$, то есть в рабочей камере в начальный момент времени перед торможением имеется воздух атмосферного давления.

В уравнении (3) принято обозначение

$$G(\beta) = \frac{\mu f B p_p}{\sqrt{T}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_p}\right)^{\frac{k+1}{k}}}, \quad (4)$$

$$B = \sqrt{\frac{2k}{(k-1)R}},$$

где k – показатель адиабаты, V – наполняемый объем при ЭТ, м³; R – газовая постоянная $R = 287,14 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; T – абсолютная температура воздуха в запасном резервуаре; p – искомое давление в камере РК; μ – коэффициент расхода; μf – эффективное проходное сечение дросселя (f – площадь поперечного сечения канала), м²; $k = 1,403$; p_p – давление в запасном резервуаре, МПа.

Второй член в уравнении (3) учитывает изменение наполняемого объема $(V_{\text{рк}} + V_{\text{ц}}) = V$ при перемещении поршня ТЦ, причём это перемещение начинается через некоторый промежуток времени, представляющий собой подготовительный период от момента запуска тормоза до начала движения поршня тормозного цилиндра, в продолжение которого $dV = 0$.

Перетекание сжатого воздуха из запасного резервуара в рабочую камеру и тормозной цилиндр сопровождается изменением термодинамических характеристик воздуха во всех соединенных объемах. При экстренном торможении происходит теплообмен с окружающей средой, а давление во всех объемах выравнивается. Установившаяся величина давления может быть определена из условия $pV = \text{const}$, в предположении, что процесс является адиабатическим.

При расчете зависимостей $p_{\text{рк}}(t)$, $p_{\text{ц}}(t)$ в переходном процессе наполнения РК и ТЦ необходимо учитывать снижение давления в запасном резервуаре.

Температура в ЗР в процессе его разрядки может быть определена по известной зависимости

$$T_j = T_{(j-1)} \left(\frac{p_{pj}}{p_{p(j-1)}} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5)$$

Далее определяем значение постоянных величин, входящих в уравнение (3). В случае наполнения рабочей камеры сжатым воздухом, такими величинами являются: показатель адиабаты ($k = 1,403$), газовая постоянная R , диаметр отверстия в седле тормозного клапана $d = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м, давление в запасном резервуаре p_p (давление в тормозной магистрали поезда); объем рабочей камеры $V_{\text{рк}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м³; температура окружающей среды (T_a), коэффициент расхода воздуха (μ); атмосферное давление в рабочей камере (p_a).

При истечении воздуха из ЗР могут быть два вида истечения – надкритическое (или сверхкритическое), характеризующееся коэффициентом

$$\beta_i = p_i / p_p \leq 0,528,$$

где p_i – давление в резервуаре, в который происходит истечение. В нашем случае это рабочая камера, и затем РК и ТЦ, и подкритическое при $\beta_i = p_i / p_p > 0,528$.

Значение функции (4) для различных случаев истечения воздуха

$$G_1(\beta) = \frac{\mu f B p_p}{\sqrt{T_a}} \psi(\beta), \text{ если } \beta > \beta_k = 0,528;$$

$$G_1(\beta) = \frac{\mu f B p_p}{\sqrt{T_a}}, \text{ если } \beta \leq \beta_k = 0,528, \quad (6)$$

$$\psi(\beta) = \sqrt{\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}}; \beta_k = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k+1}} = 0,528; B_k = B\psi(\beta_k).$$

Введем обозначение в виде функции

$$f(t, p) = \frac{kRT_a}{V_{\text{рк}} + V_{\text{ц}}} G(\beta).$$

Для определения временной характеристики наполнения РК и ТЦ воспользуемся численным интегрированием дифференциального уравнения (3) методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Согласно разностной схеме четвертого порядка точности вычисляем вспомогательные функции вида [4]:

$$K_1(t, p, h) = f(t, p),$$

$$K_2(t, p, h, h_a) = f[(t + h_a p) + h_a k_1(t, p, h)],$$

$$K_3(t, p, h, h_a) = f[(t + h_a p) + h_a k_2(t, p, h)],$$

$$K_4(t, p, h, h_a) = f[(t + h_a p) + h_a k_3(t, p, h)],$$

$$[K_1(t, p, h) + 2K_2(t, p, h, h_a) + 2K_3(t, p, h, h_a) + 2K_4(t, p, h, h_a)],$$

$$r(t, p, h, h_a) = K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4, \quad (7)$$

где $h_a = 0,5h$. Моменты времени $t_0 = 0$; $t_j = (t_0 + jh)$, в которые определяется решение при $j = 1 \dots n$.

Затем последовательно рассчитываются значения величин давления в моменты времени, соответствующие окончанию каждого интервала по формуле

$$p_j = p_{j-1} + \frac{h}{6} r(t_{j-1}, p_{j-1}, h, h_a), \text{ при } j = 1, 2 \dots h.$$

Значение p_0 находится из начального условия $p_0 = p_a$.

При выводе решения данного уравнения использован закон сохранения энергии, поэтому результат его решения умножен на показатель адиабаты $k = 1,403$.

Временные характеристики наполнения объема $V_{\text{рк}}$ и ТЦ, полученные в результате решения дифференциального уравнения методом Рунге-Кутты, приведены на рисунке 1.

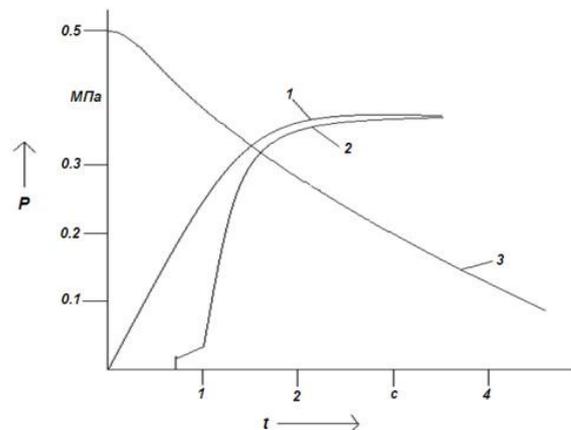


Рисунок 1 – Диаграмма изменения давления в рабочих объемах при экстренном торможении

Здесь кривая 1 – расчётное давление в рабочей камере РК в зависимости от времени t . Кривая 2 показывает фактическое изменение давления в тормозном цилиндре.

ре. Изменение давления в магистрали ТМ при экстренном торможении показано линией 3.

Выводы. Задача газодинамического расчета при действии ЭПТ в случае экстренного торможения заключается в идентификации временных зависимостей $p_{рк}(t)$ и $p_{ц}(t)$, позволяющих определить величину давления в рабочей камере и тормозном цилиндре в процессе торможения. Для этого применена линейная аппроксимация расходных характеристик нелинейных сопротивлений, которыми являются калиброванные отверстия и клапаны электровоздухораспределителя.

Получено 10.10.2011

E. I. Galay, A. V. Denisenok. Gas dynamic processes in passenger car brake system at electropneumatic brake work.

There were considered gas dynamic processes in the passenger car brake system. Real process of work chamber and brake cylinder filling is modeled without taking into consideration stochasticity of initial and influencing factors and without taking into account the change of compressed air gas dynamic parameters in transient processes. The problem of determination of pressure increase time in brake, cylinders is solved by the Runge-Kutta method for differential equations taking into account the factor of availability of two kinds of efflux – supercritical and subcritical.

Список литературы

- 1 **Корн, Г.** Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 830 с.
- 2 **Крылов, В. Н.** Автоматические тормоза подвижного состава / В. Н. Крылов, В. В. Крылов. – М. : Транспорт, 1983. – 360 с.
- 3 **Галай, Э. И.** Тормозные системы железнодорожного транспорта. Конструкция тормозного оборудования / Э. И. Галай, Е. Э. Галай. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 315 с.
- 4 **Галай, Э. И.** Повышение эффективности электропневматических тормозов поезда / Э. И. Галай. – Гомель : БелГУТ, 2002. – 182 с.