Волков И.В., Булавин Ю.П., Коновалов П.Ю.
**Уточнение динамической модели пневматического элемента рессорного
подвешивания рельсового экипажа**

*Ростовский государственный университет путей сообщения
(Россия, Ростов-на-Дону)*

doi: 10.18411/lj-01-2019-126

idsp: ljournal-01-2019-126

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы уточнения формализованного описания динамических деформаций пневматических элементов (пневморессор), установленных в рессорном подвешивании скоростных рельсовых экипажей.

Ключевые слова: Пневморессора, рельсовый экипаж, рессорное подвешивание, динамическая модель.

Abstract

The article addresses the issues of clarifying the formalized description of the dynamic deformations of pneumatic elements (pneumatic springs) installed in the spring suspension of high-speed rail vehicles.

Keywords: Pneumatic spring, rail vehicle, spring suspension, dynamic model.

Динамические модели широко используются не только для прогнозирования показателей динамических качеств подвижного состава [1, 2, 3, 4, 5, 6], но и показателей его сцепных свойств [7, 8, 9, 10]. Особый интерес здесь представляет корректное математическое описание работы нелинейных элементов рессорного подвешивания, в частности, пневморессор [11, 12].

Составим уточненные уравнения динамических деформаций пневморессоры. Для этого сначала запишем первый закон термодинамики для полости переменного объема, заполненную газом постоянной массы

$$dQ = dU + AdL, \quad (1)$$

где Q – количество тепла, подведенного к системе; U – внутренняя энергия газа; A – термический эквивалент работы; L – работа, совершаемая системой.

В отличие от идеализированной расчетной схемы, реальная пневморессора соединена с дополнительным резервуаром, имеет возможности для подпитки воздухом из магистрали и его стравливания [11]. Особенностью этих процессов является необходимость учета, во-первых, переменной массы газа и, во-вторых, энергии, подводимой с поступающим газом или отводимой с вытекающим. Поскольку количество поступившего или отведенного газа является функцией времени t , то при переменной массе газа термодинамические процессы приобретают выраженную динамическую составляющую, что требует некоторых преобразований уравнения (1). Для этого выделим из энергетической составляющей dQ количество тепла, подведенного вместе с газом. В этом случае можно записать уравнение

$$dQ + \Pi_s dW_s = dU + AdL + \Pi dW, \quad (2)$$

где Π_s , Π – удельное количество энергии, поступившего в полость газа и вытекающего из нее; W_s , W – количество газа, поступающего в полость и вытекающего из нее; здесь dQ – количество тепла, поступающего из окружающей среды или отводимого из полости.

Для процесса наполнения объема V_{0l} без теплообмена с окружающей средой сжатым воздухом из магистрали в уравнении (2) следует принять

$$dQ = 0; \quad dW = 0; \quad dU = c_v d(T_{0l} W); \quad dL = p_{0l} dV_{0l}; \quad \Pi_s = i_s,$$

где c_v – теплоемкость газа при постоянном объеме; T_{0l}, p_{0l} – температура и давление в наполняемом объеме; i_s – удельное теплосодержание газа.

В результате получаем следующее уравнение:

$$kRT_{sl} dW_s = V_{0l} dp_{0l} + kp_{0l} dV_{0l}, \quad (3)$$

где k – показатель адиабаты; для воздуха $k \approx 1,4$; R – газовая постоянная; T_{sl} – абсолютная температура воздуха в магистрали.

Рассмотрим теперь истечение газа из ограниченного объема без теплообмена с окружающей средой. Положим, что истечение является адиабатическим процессом. Для этого в (3) следует принять, что $dQ=0$ и $\Pi_s dW_s=0$. В этом случае уравнение принимает вид

$$-dU = AdL + i dW.$$

Положим, что, в отличие от параметров ограниченного объема, параметры среды, куда истекает воздух: давление p_{0l} , абсолютная температура T_{0l} и удельный объем v_{0l} остаются постоянными. Тогда, принимая, что

$$dU = c_v d(T_{0l} W); \quad dL = p_{0l} dV_{0l}; \quad \Pi = i,$$

получаем следующее уравнение термодинамического процесса истечения газа:

$$-kRT_{0l} dW = kp_{0l} dV_{0l} + V_{0l} dp_{0l}. \quad (4)$$

Используя формулу Сен-Венана и Ванцеля, введем в рассмотрение массовый расход воздуха из неограниченного объема

$$G = \mu S_{0l} p_{0l} \sqrt{\frac{2}{RT_{0l}} \frac{k}{k-1} \left\{ \left(\frac{p_{sl}}{p_{0l}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{sl}}{p_{0l}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\}}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент расхода; обычно принимают, что $\mu=0,75$; S_{0l} – площадь проходного сечения отверстия.

Указанная формула справедлива при подкритическом режиме истечения газа, который наблюдается при соблюдении неравенства $\frac{p_{sl}}{p_{0l}} \geq 0,528$. Именно этим

режимом характеризуется истечение воздуха из пневморессор подвижного состава в дополнительные резервуары и обратно [12].

С учетом динамики наполнения (опорожнения) резервуаров можно записать, что $dW=Gdt$ и $dW_s=G_s dt$. Подставляя эти соотношения в выражения (4) и (5), получаем дифференциальные уравнения, описывающие процессы наполнения газом объема и истечения газа из него.

Воспользовавшись уравнением Клапейрона, выразим давления газа в резервуарах через соответствующие значения плотностей в следующем виде:

$$p_{0l} = \rho_{0l} RT_{0l}; \quad p_{sl} = \rho_{sl} RT_{sl},$$

где ρ_{0l} – плотность воздуха в пневморессоре; ρ_{sl} – плотность воздуха в дополнительном резервуаре.

Тогда, полагая, в первом приближении, что $T_{0l}=T_{sl}=T_0$, с учетом физической взаимосвязи процессов опорожнения и наполнения воздухом объемов пневморессоры и

дополнительного резервуара окончательно получим следующие уравнения, характеризующие колебания подпрыгивания элементов механической части и динамические процессы в пневматических системах:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{0l}}{dt} = & -\frac{P(\rho_{0l}, \rho_{sl})\sigma}{V_{0l} - S_{el}(z_l - z_0)} \sqrt{\rho_{0l}^{1 + \text{sign}(\rho_{0l} - \rho_{sl})} \rho_{sl}^{1 + \text{sign}(\rho_{0l} - \rho_{sl})}} - \\ & - \frac{kS_{el}}{V_{0l} - S_{el}(z_l - z_0)} \rho_{0l} \frac{d}{dt}(z_l - z_0); \\ \frac{d\rho_{sl}}{dt} = & \frac{P(\rho_{0l}, \rho_{sl})\sigma}{V_{sl}} \sqrt{\rho_{sl}^{1 + \text{sign}(\rho_{0l} - \rho_{sl})} \rho_{0l}^{1 + \text{sign}(\rho_{0l} - \rho_{sl})}}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$m_{ml} \frac{l}{n_{pn}} \frac{d^2 z_{ml}}{dt^2} = RT_0 S_{el} \left(\rho_{0l} - \frac{P_{00l}}{RT_0} \right) + \Delta R_{1l} \left(z_{ml}, \frac{dz_{ml}}{dt}, z_0, \frac{dz_0}{dt} \right);$$

$$\frac{m_k}{n_{pn}} \frac{d^2 z_0}{dt^2} = -RT_0 S_{el} \left(\rho_{0l} - \frac{P_{00l}}{RT_0} \right) + \Delta R_{2l} \left(z_0, \frac{dz_0}{dt}, z_{ml}, \frac{dz_{ml}}{dt} \right),$$

где P_{00l} – начальное давление воздуха в пневморессоре; V_{sl} – объем дополнительного резервуара; n_{pn} – общее количество пневморессор в 2-ой ступени подвешивания;

$\Delta R_{1l} \left(z_{ml}, \frac{dz_{ml}}{dt}, z_0, \frac{dz_0}{dt} \right)$ – силы в связях 1-ой и 2-ой ступеней рессорного подвешивания l -ой тележки; m_k, m_{ml} – массы; z_0, z_{ml}, z_l – перемещения;

$\Delta R_{2l} \left(z_0, \frac{dz_0}{dt}, z_{ml}, \frac{dz_{ml}}{dt} \right)$ – силы в связях кузова и l -ой тележки;

$$P(\rho_{0l}, \rho_{sl}) = \text{sign}(\rho_{0l} - \rho_{sl}) \sqrt{\left(\frac{\rho_{sl}}{\rho_{0l}} \right)^{2 \text{sign}(\rho_{0l} - \rho_{sl})} - \left(\frac{\rho_{sl}}{\rho_{0l}} \right)^{(1+k) \text{sign}(\rho_{0l} - \rho_{sl})}};$$

$$\sigma = \mu S_{el} k \sqrt{2RT_0 \frac{k}{k-1}}; \text{ здесь } S_{el} - \text{эффективная площадь пневморессоры.}$$

Переход от системы переменных "перемещение - давление газа" к системе "перемещение - плотность газа" позволяет сократить различие в значениях переменных на пять порядков, что положительно сказывается на устойчивости вычислительных процессов при численном интегрировании как относительно простых дифференциальных уравнений моделей рельсовых экипажей, так и более сложных систем уравнений, содержащих в качестве составных блоков рассмотренные динамические модели пневморессор.

Качественное отличие рассмотренной динамической модели пневмоподвешивания, например, от известных работ [12] состоит в появлении в первом уравнении системы (6) демпфирующего члена, пропорционального разности скоростей сопредельных дискретных масс.

Таким образом, в данной модели рассеяние энергии связано не только с дросселированием воздуха в дополнительный резервуар, но и с затратами энергии, согласно первому закону термодинамики, на изменение объема пневморессоры в процессе колебаний. Это обеспечивает, в отличие от [12], некоторое демпфирование колебаний даже при отсутствии дополнительного резервуара и соответственно эффекта

дросселирования воздуха, что существенно уточняет динамическую модель пневмоэлемента.

1. Ворон, О.А. Моделирование колебаний вагона с тележками КВЗ-И2 и текстропным приводом подвагонного генератора / О.А. Ворон, Ю.П. Булавин, И.В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3 (63). – С. 14-22.
2. Волков, И.В. Прогнозирование динамических характеристик перспективного рефрижераторного подвижного состава / И.В. Волков, Ю.П. Булавин, Е.А. Булавина // Международный конгресс «Механика и трибология транспортных систем». – Ростов н/Д: РГУПС, 2003. – С. 205-206.
3. Волков, И.В. Применение пакета MathCAD при расчете механической части локомотивов / И.В. Волков, В.Г. Рубан, А.М. Матва, Р.Х. Уразгильдеев: учеб. пособие. – Ростов н/Д: РГУПС, 2000. – 64 с.
4. Волков, И.В. Применение метода прогонки для исследования упругих колебаний кузовов подвижного состава / И.В. Волков // Межвузовский тематический сборник трудов «Некоторые проблемы высокоскоростного наземного транспорта». – Ростов н/Д: РИИЖТ, 1980. – С. 20-24.
5. Волков, И.В. Динамическая модель деформируемого кузова рельсового экипажа / И.В. Волков, Ю.П. Булавин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (65). – С. 47-54.
6. Волков, И.В. Прогнозирование динамических характеристик подвижного состава на основе математического моделирования / И.В. Волков: монография. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. – 136 с.
7. Волков, И.В. Вопросы прогнозирования и особенности реализации сцепных свойств тягового подвижного состава / И.В. Волков, Ю.П. Булавин, П.Ю. Коновалов : монография. – Ростов н/Д: РГУПС, 2007. – 110 с.
8. Волков, И.В. Преобразование зависимостей расчетного коэффициента сцепления электровозов от скорости / И.В. Волков // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта и подготовки специалистов: тезисы докладов научно-техн. конференции. – Ростов н/Д: РГУПС, 1998. – С. 178-179.
9. Волков, И.В. К вопросу прогнозирования уровня сцепления колес локомотивов с рельсами, находящимися в различных климатических условиях / И.В. Волков, Ю.М. Лужнов, С.А. Кондратенко // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – М.: Транспорт, 1991. – № 7. – С. 42-44.
10. Волков, И.В. Применение метода Монте-Карло для анализа сцепных свойств электровозов на основе погоднo-климатических данных / И.В. Волков, П.Ю. Коновалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 2 (46). – С. 57-66.
11. Волков, И.В. Механическая часть электрического подвижного состава / И.В. Волков, Ю.П. Булавин, В.Г. Рубан, П.Ю. Коновалов : учеб. пособие. – Ростов н/Д: РГУПС, 2007. – 92 с.
12. Бирюков, И.В. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.