

**Ю.В. МАКАРЕНКО**, НТУ «ХПИ» (г. Харьков)

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ВАГОНА, ОБОРУДОВАННОГО ПНЕВМАТИЧЕСКИМ РЕССОРНЫМ ПОДВЕШИВАНИЕМ**

У статті наведено результати комп'ютерного моделювання динаміки вагона, який обладнано пневматичним ресорним підвішуванням. Досліджена спільна робота пневморесори та пристрою для живлення її стислим повітрям.

In article results of computer modelling of dynamics of the car equipped with pneumatic spring suspension are resulted. Teamwork of a pneumospring and the device for a food by its compressed air is investigated.

Для металлических систем рессорного подвешивания транспортных средств характерен ряд недостатков: ограниченность величины статического прогиба, необходимость применения гасителей колебаний, слабая фильтрация вибраций и шума, проникающего в кузов и т.д. Реальные возможности его совершенствования практически исчерпаны.

Указанные обстоятельства актуальны для пригородного железнодорожного подвижного состава, где характеристики существующих конструкций металлического рессорного подвешивания налагают значительные ограничения на показатели повышения производительности и комфорта перевозок пассажиров.

Применение пневматического рессорного подвешивания является одним из перспективных направлений решения задачи улучшения эксплуатационных качеств подвижного состава. Оно обеспечивает получение больших статических прогибов, т.е. собственную частоту вертикальных колебаний кузова в окрестности 1 Гц наиболее комфортную для пассажиров, обладает демпфирующими и виброизолирующими свойствами, стабилизирует уровень пола вагона и автосцепки при изменении загрузки вагона и снижает динамическое воздействие на путь. Опыт эксплуатации систем пневматического рессорного подвешивания, получивших широкое распространение за рубежом (Япония, Франция, Англия, Италия), как на автомобильном, так и на железнодорожном транспорте показывает экономическую целесообразность его применения.

Однако, несмотря на значительные успехи практического применения пневматического рессорного подвешивания, отдельные вопросы динамики экипажей с пневморессорами (ПР) имеют недостаточное теоретическое обоснование. Например, в технической литературе недостаточно освещены вопросы совместной работы пневморессоры и устройства для питания ее сжатым воздухом, которое одновременно регулирует уровень автосцепки относительно рельсов (высоторегулирующий клапан – ВК [1]). Например,

при неисправности демпфирующего устройства ВК, он будет осуществлять спонтанную подачу или выпуск сжатого воздуха из пневморессоры, что изменит давление воздуха в них, т.е. приведет к появлению возмущающей силы. Эта сила может вызвать появление режима вынужденных колебаний кузова, т.е. автоколебания. В связи с этим необходимо продолжить теоретические исследования в этом направлении.

Целью статьи является исследование режимов вынужденных колебаний, т.е. автоколебаний кузова вагона на пневматических рессорах, которые установлены между поперечной балкой и боковиной рамы тележки (рис.1). Пневморессора соединена трубопроводом, содержащим дроссель с дополнительным воздушным резервуаром и ВК.

Каждая тележка вагона оборудована двумя пневматическими рессорами, которые установлены на правой и левой боковинах ее рамы.

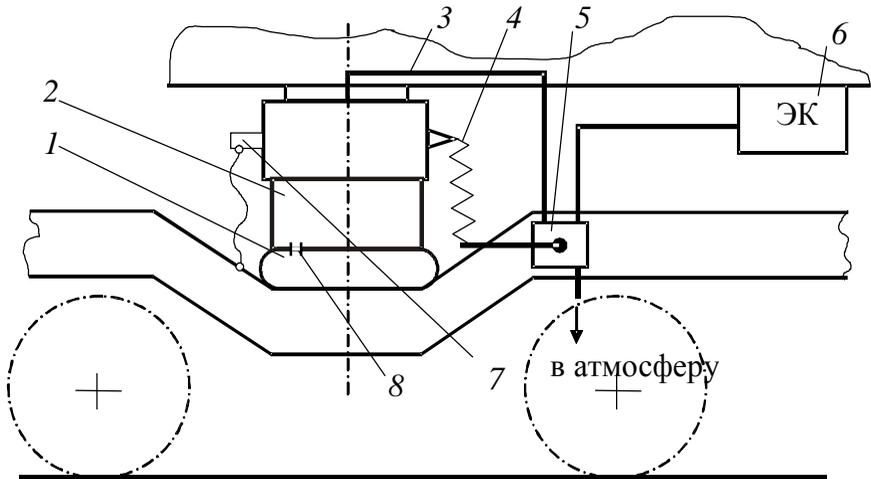


Рисунок 1 – Схема пневматического рессорного подвешивания задней тележки  
 1 – пневморессора, 2 – дополнительный резервуар, 3 – соединительный трубопровод,  
 4 – привод высоторегулирующего клапана, 5 – высоторегулирующий клапан,  
 6 – электрокомпрессор, 7 – срывной клапан с тросиком, 8 – дроссель.

Математическая модель, описывающая в виде системы дифференциальных уравнений динамику вагона, оборудованного пневматическим рессорным подвешиванием, составлена на базе фундаментальных положений теоретической механики термо- и газодинамики [2]. Ее исследование проведено методами численного интегрирования.

Рассмотрен колебательный процесс системы, состоящей из части массы кузова вагона, приходящейся на пневморессору, соединенную с дополнительным резервуаром трубопроводом с дросселем.

Введем следующие обозначения

$P_n$  – давление воздуха в пневморессоре определяется термодинамическими процессами;  $z$  – вертикальная координата.

Уравнение собственных колебаний массы

$$m \ddot{z} + K \frac{G}{f_d} \dot{z} + \frac{n(P_n + I)F^2}{V_n + V_{др}} z = 0, \quad (1)$$

где  $m$  – часть массы кузова вагона,  $K$  – коэффициент,  $G$  – масса воздуха, которая перетекала через дроссельное отверстие в течение полупериода колебаний;  $f_d$  – площадь проходного сечения дроссельного отверстия;  $F$  – эффективная площадь пневморессоры;  $V_n$ ,  $V_{др}$  – объем пневморессоры и дополнительного резервуара – соответственно;  $n$  – показатель политропы.

Второе слагаемое в (1) представляет собой диссипативную силу, а третье слагаемое – упругую силу, создаваемую пневморессорой.

Для описания термодинамических процессов введем следующие параметры:  $T$  – абсолютная температура воздуха;  $r$  – плотность воздуха;  $C_p$  – теплоемкость воздуха в процессе  $P = const$ ;  $C_v$  – теплоемкость воздуха в процессе  $V = const$ ;  $R$  – газовая постоянная,  $Q$  – количество теплоты.

Ввиду малого диапазона изменения температур в системе будем считать, что  $C_p$ ,  $C_v$  и  $R$  не зависят от температуры и от времени.

Первый закон термодинамики в дифференциальной форме

$$C_v T_i dG_i + C_v G_i dT_i + P_i dV_i = \Sigma dQ_i, \quad (2)$$

где  $dQ_i$  – количество теплоты отводимой (–) или подводимой (+) к элементу термодинамической системы через теплообмен с окружающей средой;  $i$  – индекс элемента системы:  $i=1$  для пневморессоры,  $i=2$  для трубопровода,  $i=3$  для дополнительного резервуара  $i=4$  для высоторегулирующего клапана.

Уравнение теплообмена элемента пневмосистемы с окружающей средой

$$dQ_i = K_i \cdot H_i (T_0 - T_i) dt$$

где  $K_i$  – стационарный усредненный коэффициент теплопередачи;  $H_i$  – площадь поверхности теплообмена;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $t$  – время теплообмена.

Для массы воздуха, перетекающей из одного объема в другой

$$dQ_i = C_p T_i dG_i.$$

После подстановки в уравнение (2) получим

$$C_v T_i dG_i + C_v G_i dT_i + P_i dV_i = C_p T_i dG_i + K_i H_i (T_0 - T_i) dt. \quad (3)$$

Состояние воздуха в системе описывается уравнением Клапейрона

$$P_i dV_i + V_i dP_i - K_i T_i dG_i - R_i G_i dt = 0 \quad (4)$$

Хотя масса воздуха в отдельных элементах пневматической системы при колебаниях груза на рессоре изменяется, суммарная масса воздуха в системе постоянна, если пренебречь утечками воздуха. Уравнение закона сохранения массы воздуха

$$dG_1 + dG_2 + dG_3 + dG_4 = 0 \quad (5)$$

Здесь последнее слагаемое представляет собой количество сжатого воздуха, подаваемое или выпускаемое из системы пневматического рессорного подвешивания через ВК. Оно может быть представлено в виде периодической функции, частота и амплитуда которой определяются величиной относительных перемещений верхнего и нижнего днищ пневморессоры в процессе колебаний элементов экипажа, а также зависят от параметров ВК, в частности от его зоны нечувствительности, в пределах которой она обращается в ноль.

Уравнение расхода воздуха через дроссель, если его скорость не превышает половины скорости звука

$$dG = \pm m f \sqrt{2 r_2 (P_1 - P_2)} dt, \quad (6)$$

Для воздушного тракта, соединяющего пневморессору и ВК

$$dG_4 = \pm m_4 f_4 \sqrt{2 r_r (p_r - p_1)} dt \quad (7)$$

здесь  $m$  – коэффициент истечения воздуха через дроссель.

При истечении воздуха из пневморессоры берется знак «+», а при возврате знак «-», в связи с чем, дифференциальные уравнения, описывающие термодинамические процессы в пневматической системе подвешивания будут различными для ходов сжатия и расширения пневморессоры.

Система дифференциальных уравнений (1–7), образующих математическую модель, исследовалась в среде математического

моделирования MatLab. В качестве объекта исследования был выбран пассажирский вагон с номинальной загрузкой.

На рис. 2 приведена осциллограмма собственных вертикальных колебаний массы вагона на пневморессорах при отключенном по воздуху ВК.

Как видно из осциллограммы, колебания носят затухающий характер при частоте около 1 Гц.

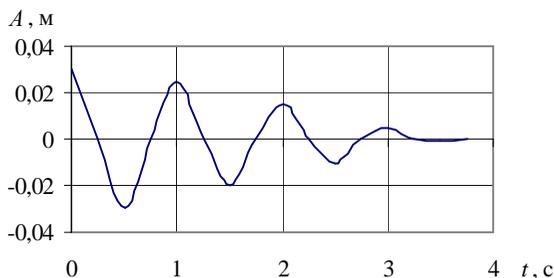


Рисунок 2 – Собственные колебания массы на пневморессоре без подпитки от ВК

Если ВК включен по воздуху то при опускании массы вниз от номинального положения, в пневматическую систему поступают от ВК порции сжатого воздуха, что создает импульсы сил, направленные вверх. При движении массы вверх от номинального положения, порции сжатого воздуха через ВК выходят в атмосферу, давление в пневморессоре снижается. Это может привести к нарастанию амплитуд колебаний, которое обусловлено периодической подачей – выпуском сжатого воздуха из пневморессоры. Это явление можно рассматривать как автоколебательный процесс.

На рис. 3 приведена одна из осциллограмм, из которой видно, что при определенных начальных условиях действительно развивается автоколебательный процесс, т.е. амплитуды колебаний заметно нарастают, что подтверждает гипотезу, изложенную в работе [3].

Такое нарастание амплитуд наблюдается только при частотах колебаний близким к собственной частоте колебаний массы на пневморессоре.

Если порции воздуха, протекающие через ВК, представить в виде отдельных периодически повторяющихся импульсов, что моделирует работу ВК, имеющего зону нечувствительности, то картина автоколебательного процесса существенно не изменяется.

Такое нарастание амплитуд колебаний для вагона является нежелательным, в связи с чем ВК должен быть устроен так, чтобы при собственных частотах колебаний кузова на пневматических рессорах впуска – выпуска сжатого воздуха из пневморессор не происходило. Это обеспечивается подбором демпфирующего устройства, замедляющего работу ВК или устройством в питающем трубопроводе калиброванного отверстия необходимого сечения.

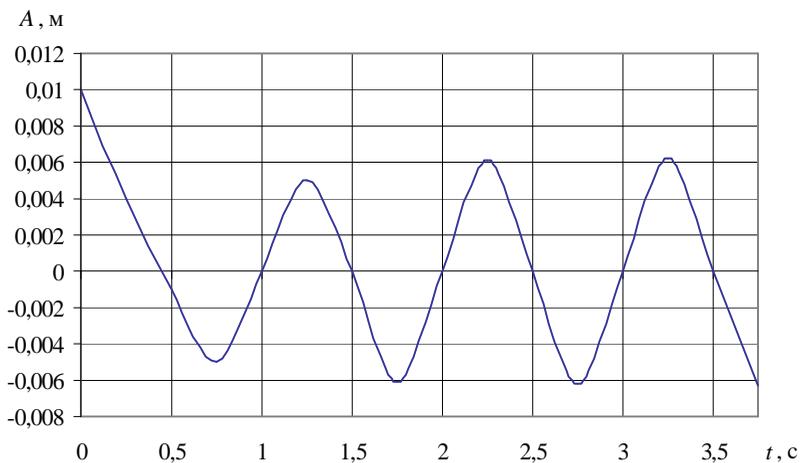


Рисунок 3 – Колебания груза на пневморессоре при включенном ВК

Таким образом, подтверждена возможность развития автоколебаний в системе «пневморессора – высоторегулирующий питательный клапан»

При снижении частоты собственных колебаний наблюдается более высокий темп нарастания амплитуд автоколебаний.

При одиночных импульсах автоколебательный процесс не развивается, если демпферы вагона находятся в неисправном состоянии.

Полученные результаты показывают, что на подвижном составе, оборудованном пневматическими рессорами, высоторегулирующие клапана должны поддерживаться в исправном состоянии, а информация о нарушениях в их работе должна поступать к машинисту.

**Список литературы:** **1.** Пневматическое рессорное подвешивание тепловозов / Куценко С.М., Елбаев Э.П., Кирпичников В.Г., Маслиев В.Г., Рубан А.Н. / Под ред. С.М.Куценко. – Харьков: Вища школа, 1978. – 97 с. **2.** Развитие устройств регуляторов пневматического рессорного подвешивании транспортных средств / Маслиев В.Г., Макаренко Ю.В. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 46. – 91 – 96 с **3.** Теоретическое исследование пневматического рессорного подвешивания при линейном регуляторе / Загорецкий В.А., Куценко С.М., Савушкин С.С., Шевченко П.М. Сб. «Локомотивостроение», вып. 1, 1968. – с 35–43

Поступила в редколлегию 2.12.2009