

**Б.Х.ЕРИЦЯН**, ассистент, НТУ «ХПИ»,  
**Д.И. ЯКУНИН**, старший преподаватель, НТУ «ХПИ»

### **РАЗВИТИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМА НАКЛОНА КУЗОВА С ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ**

У статті наведена поліпшена імітаційна модель механізму нахилу кузова у кривих ділянках шляху. Показано схеми моделювання пневматичного ресорного підвищення із використанням механічної та термодинамічної моделей.

In the article the resulted improves simulation model of mechanism of inclination of body in the curved areas of way. The schematics of modeling of a pneumatic spring support are showed with the use of mechanical and thermodynamics models.

Протяженность магистралей железных дорог Украины составляет порядка 22050 км, при этом их сеть является одной из самых разветвленных в Европе. Основной объем перевозки как грузов, так и пассажиров (82% и 48% от общего объема - соответственно), сегодня осуществляется именно железнодорожным транспортом. Несмотря на это, в настоящее время и в ближайшей перспективе возможность коренной реконструкции железнодорожных линий весьма мала, ведь большинство из них построены давно, характеризуются относительно низкими техническими параметрами пути и большим числом кривых малого радиуса, и их переоборудование представляется весьма затратным мероприятием [1]. Меньших затрат потребует создание подвижного состава с наклоняемыми кузовами, поскольку такие поезда предназначены, в первую очередь, для увеличения скорости движения в кривых участках пути. Следовательно, такие поезда представляют собой рациональный способ сокращения длительности поездок и улучшения транспортного обслуживания населения [2].

В качестве силового привода механизма наклона кузовов наибольшее распространение получил гидравлический, однако его обслуживание сложно в силу конструктивных особенностей, здесь выгоднее использовать электромеханический привод. Однако электромеханический привод в случае неисправности не обеспечивает самовозврат механизма в исходное положение, что может привести к диагональной разгрузке колесных пар. Также неудовлетворительным в этом приводе является и демпфирование колебаний.

Следовательно, широкому применению электромеханического привода препятствует наличие в его составе винтовой пары, ограничивающее демпфирования и исключающее самовозврат при отказе, то есть преобразование электрической энергии в механическую происходит здесь опосредованно. Непосредственное преобразование электрической энергии в

механическую энергию перемещения штока можно обеспечить, используя в качестве силового привода линейный электромеханический преобразователь энергии. Обладая всеми достоинствами электромеханического привода, такая система будет лишена пары вращения и, следовательно, вышеупомянутых недостатков.

В работе [3] предложена электромеханическая система привода для наклона кузовов скоростного подвижного состава на базе линейного двигателя постоянного тока электромагнитного типа цилиндрической формы, снабжаемого энергией посредством полупроводникового преобразователя энергии прямоходового типа и разработана обобщенная математическая модель электромеханической системы наклона кузовов в виде совокупности алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих все узлы и звенья передачи мощности от источника электрической энергии до исполнительного механизма – наклоняемой балки, устанавливающая связь геометрических, силовых и электрофизических параметров с показателями, характеризующими качество и эффективность работы как отдельных механизмов, так и устройства привода наклона кузова в целом.

На базе обобщенной математической модели в среде Matlab Simulink создана имитационная модель процессов электромеханического преобразования энергии в системе наклона кузовов, которая позволяет исследовать влияние параметров системы на ее рабочие свойства. Однако данной математической модели присущ определенный недостаток: с целью упрощения моделирования наклоняемая балка и кузов рельсового транспортного средства представлены как единое тело. Такое допущение не позволяет произвести оценку влияния динамики подрессоренных масс в процессе моделирования работы механизма наклона кузова при движении транспортного средства по кривой. Следовательно, требуется дальнейшее развитие имитационной модели.

Цель работы: развитие имитационной модели механизма наклона кузова с линейным электромеханическим силовым приводом для учета динамической составляющей нагрузки, определяемой наличием колебаний подрессоренных элементов экипажа рельсового транспортного средства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

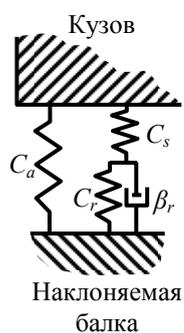
- усовершенствовать математическую, имитационно-ориентированную модель, разделив кузов и наклоняемую балку на две массы, связанные между собой упруго-диссипативными связями;
- разработать схемы и определить параметры функциональных связей, вводимых в имитационную модель и достоверно отображающих параметры реальных устройств.

В модели, приведенной в [3], для моделирования механической части применены модули и компоненты SimMechanics, моделирование электромагнита произведено с использованием компонентов SimPowerSystem. Система управления и связи между механической и

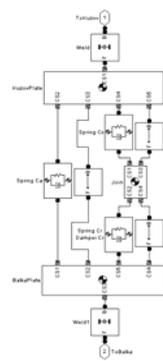
электрической частью осуществляются с помощью S-модулей стандартных библиотек Simulink. Рабочие параметры и характеристики электромагнита (ток, сила втягивания якоря в зависимости от зазора) задаются путем аппроксимации зависимостей, полученных экспериментально с помощью имитационного моделирования в среде FEMM, полиномами Чебышева на множестве равноудаленных точек. Указанные аппроксимации зависимостей реализованы в виде S-функций и подключены к модели. Следовательно, для развития модели целесообразно применять блоки и модули упомянутых библиотек Simulink, либо создать таковые при помощи средств Matlab при отсутствии типовых модулей с требуемыми параметрами.

В качестве кузовной ступени рессорного подвешивания современных скоростных поездов чаще всего используются пневматические рессоры, обладающие большим статическим прогибом и лучшим демпфированием колебаний по сравнению с металлическими винтовыми пружинами. Целесообразно в качестве упруго-диссипативных связей между телами, имитирующими наклоняемую балку и кузов, ввести схемы, достоверно отображающие параметры реальных пневматических рессор.

В [4] для имитации пневморессор предлагается следующая схема замещения (рис. 1, а).



а)



б)

Рис. 1. Схема замещения пневматической рессоры а) и имитационная модель подсистемы пневматической рессоры б)

Несмотря на относительную простоту реализации, указанная схема позволяет с приемлемой степенью достоверности моделировать пневматическую рессору при адекватном подборе эквивалентных ее параметров: жесткости пневморессоры  $C_a$ , концевой жесткости пневморессоры  $C_s$ , жесткости воздуха в доп. резервуаре  $C_r$  и степени демпфирования дросселя  $\beta_r$ . Simulink-модель подсистемы пневморессоры, использующая указанную схему замещения, приведена на рис. 2 а).

Модернизированная имитационная модель механической части системы наклона кузова, включающая подсистемы пневматического рессорного подвешивания, приведена на рис. 2 б).

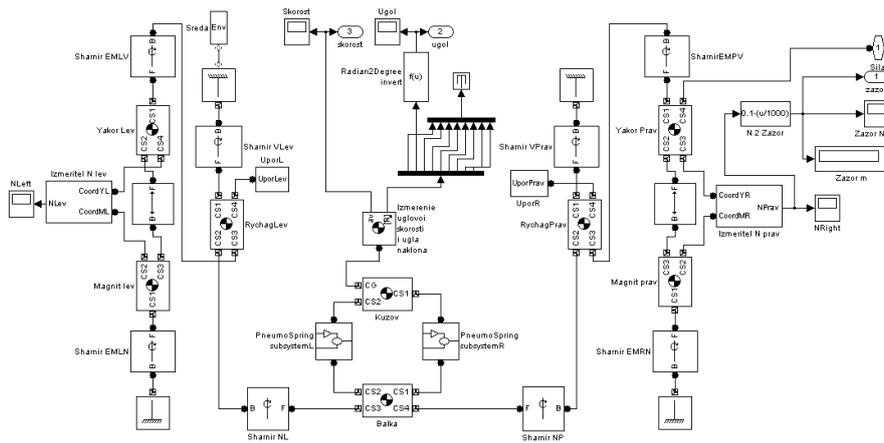


Рис. 2. Имитационная модель механической части системы наклона кузова

Подсистема, имитирующая пневморессору, подключается между телами, имитирующими кузов и наклоняемую балку, обеспечивая их упруго-диссипативную связь в точках предполагаемой установки пневматических рессор.

Большей степени достоверности можно добиться, применяя модель пневматической рессоры, учитывающей термодинамические процессы, протекающие в ней. В работе [5] приведена математическая модель, описывающая в виде системы дифференциальных уравнений динамику вагона, оборудованного пневматическим рессорным подвешиванием, составленная на базе фундаментальных положений теоретической механики термо- и газодинамики. Уравнение собственных колебаний массы имеет вид

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

где  $z$  – вертикальная координата,  $P_n$  – давление воздуха в пневморессоре определяется термодинамическими процессами,  $m$  – часть массы кузова вагона,  $K$  – коэффициент демпфирования,  $G$  – масса воздуха, которая перетекает 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. Ввиду малого диапазона изменения температур в системе принято допущение, 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  $T$  – абсолютная температура воздуха;  $\rho$  – плотность воздуха;  $C_p$  – теплоемкость воздуха в процессе  $P = const$ ;  $C_v$  – теплоемкость воздуха в процессе  $V = const$ ;  $R$  – газовая постоянная,  $Q$  – количество теплоты;  $dQ_i$  – 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

$$dQ_i = K_i H_i (T_0 - T_i) dt,$$

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)

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

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 высоторегулирующий клапан ВК.

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

$$dG = \pm \mu f \sqrt{2\rho_2(P_1 - P_2)} dt \quad (6)$$

Для воздушного тракта, соединяющего пневморессору и ВК

$$dG_4 = \pm \mu_4 f_4 \sqrt{2\rho_r(p_r - p_1)} dt, \quad (7)$$

здесь  $\mu$  – 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) образует математическую модель. Ее исследование проводилось в среде математического моделирования Matlab. В качестве объекта исследования выбран пассажирский вагон с номинальной загрузкой.

Таким образом, разработана усовершенствованная имитационная модель работы системы наклона кузовов, позволяющая исследовать ее рабочие свойства с учетом динамической составляющей нагрузки, определяемой наличием колебаний подрессорных элементов экипажа рельсового транспортного средства.

**Список литературы:** 1. Корниенко В.В., Омеляненко В.И. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2007. – 159 с. 2. Омеляненко В.И., Кривякин Г.В., Якунин Д.И., Редченко Е.С. Поезда с наклоняемыми кузовами для скоростного пассажирско-го движения // Локомотив-информ. – Харьков: Техностандарт. – 2008. – №5 С. 12-17. 3. Якунин Д.И. Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов скоростного подвижного состава. Дис... к-та техн. наук: 05.22.09 / НТУ «ХПИ». – Харьков, 2010. – 202 с. 4. Zolotas A. C. Modeling and Control of Railway Vehicle Suspensions / A.C. Zolotas, R.M. Goodall // [M.C. Turner at al.] (Eds.): *Mathe. Methods for Robust & Nonlin. Ctrl.*, LNCIS 367, 2007. – P. 373 – 412. 5. Макаренко Ю.В. Компьютерное моделирование колебательного процесса вагона, оборудованного пневматическим рессорным подвешиванием. – Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ», 2009. – №47. – С. 40-45.

Поступила в редколлегию 30.09.2010