

ОЦЕНКА ДВИЖЕНИЯ ЭКИПАЖА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ ПО БОКОВОМУ ПУТИ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА

Цель работы в установлении при помощи математического моделирования возможности движения экипажа электродинамической транспортной системы по стрелочному переводу плоской путевой структуры. Новизна работы состоит в оценке безопасного движения экипажа на колесах шасси по боковому пути перевода. Показано, что для перевода, состоящего из двух переводных кривых постоянного радиуса 350 м и прямолинейной вставки, может быть реализовано безопасное движение экипажа при скоростях 10 и 15 м/с, в чем состоит и практическая ценность.

Ціль роботи в установці за допомогою математичного моделювання можливості руху екіпажу електродинамічної транспортної системи по стрілочному переводу плоскої шляхової структури. Новизна роботи полягає в оцінці безпечного руху екіпажу на колесах шасі по боковому шляху переводу. Показано, що для переводу, який складається із двох переводних кривих постійного радіуса 350 м та прямолінійної вставки, може бути реалізовано безпечний рух екіпажу при швидкостях 10 і 15 м/с, у чому і складається практична цінність роботи.

The research aim is to provide the possibility of the vehicle motion of an electric dynamic transportation system on the turnout of a plane track, using mathematical modelling. The research novelty is to estimate a safe motion of the chassis vehicle on a side track of the track. It is shown that a safe motion of the vehicle at the speed of 10 and 15 m/s can be realized for the turnout consisting of two curves with a constant radius of 350 m and a straight insert. Therein lies practical importance.

Высокоскоростной левитационный транспорт на сверхпроводящих магнитах является транспортом будущего в силу его неоспоримых преимуществ по сравнению с традиционными железнодорожным, автомобильным и др. наземными видами транспорта.

В настоящее время созданные и испытываемые магнитолевитирующие транспортные системы характеризуются особенностями направляемого движения экипажей с помощью путевой структуры в виде U-образного очертания в профиле. Такое очертание путевой структуры непростое при его конструктивной реализации и сопряжено: с трудностями при устройстве стрелочных переводов; трудностями, обусловленными необходимостью обеспечения прочности боковых стенок, и сложностями при уходе за ней и ходовыми частями экипажа.

Поэтому актуальны и представляют практический интерес вопросы создания транспортных систем, направление устойчивого движения экипажей которых реализовывалось бы с помощью плоской путевой структуры, и, в частности, вопросы движения экипажа по боковому пути стрелочного перевода на колесных шасси.

В ранее опубликованной работе рассматривались случаи движения экипажей вдоль плоской путевой структуры прямолинейного и криволинейного очертания в плане с четырьмя полосами путевых контуров [1]. Дальнейшие исследования в этой области показали возможность реализации устойчивого левитационного движения экипажей в случае, когда на путевой структуре крепятся одна, две, три полосы путевых контуров.

Цель статьи состоит в изложении результатов расчетов, оценивающих движение экипажа электродинамической транспортной системы нетрадиционной конструкции при соблюдении условий обеспечения устойчивого движения экипажа транспортной системы с четырьмя полосами путевых конту-

ров по боковому пути стрелочного перевода плоской путевой структуры.

В качестве объекта для исследований выберем полномасштабный экипаж, кузов которого массой 25 т опирается посредством 8-ми упруго-диссипативных элементов на две тележки массой по 3,75 т каждая. Жесткость каждого упругого элемента принята равной 200 кН/м, а коэффициент вязкости 20 кН·с/м, диаметр колес шасси – 0,15 м. К плоским горизонтальным донным поверхностям тележек прикреплены сверхпроводящие магниты, взаимодействующие при движении с путевыми контурами плоской путевой структуры.

При исследовании пространственных колебаний экипажа выберем в качестве обобщенных координат линейные вертикальные z и поперечные y перемещения твердых тел системы, их угловые перемещения θ, φ, ψ , соответствующие боковой качке, галопированию и вилянию, а также токи в путевых контурах (координата z направлена сверху вниз).

Математическая модель движения исследуемого экипажа вдоль плоской путевой структуры представляется в виде связанных дифференциальных уравнений Лагранжа, описывающих перемещения твердых тел системы, и уравнений токов в токопроводящих контурах путевой структуры. Подробно математическая модель движения экипажа не приводится из-за ее громоздкости, поэтому приведем математическую модель движения экипажа в общем виде.

Уравнения состояния транспортной системы: движущийся экипаж и изменение токов в токопроводящих контурах путевой структуры будем описывать с помощью уравнений Лагранжа II-го рода, которые можно представить в виде:

$$D_{qv} + \Pi_{qv} + \Phi_{qv} = Q_v, \quad (v=1,2,\dots,N) \quad (1)$$

и уравнений токов, которые в матричном виде имеют вид:

$$L \frac{dI}{dt} + rI = f, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} D_{qv} &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v}; & \Pi_{qv} &= \frac{\partial \Pi}{\partial q_v}; \\ \Phi_{qv} &= \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_v}; & Q_v &= f(F_L, F_s); \end{aligned} \quad (3)$$

Q_v – обобщенные силы, являющиеся функцией электродинамических сил F_L, F_s , действующих на экипаж в поперечных, вертикальных плоскостях вдоль нормалей и касательных к поверхностям сверхпроводящих магнитов; N – число степеней свободы; $L = |L_{ik}|$ – матрица коэффициентов самоиндукции $i = k$ и взаимной индукции $i \neq k$ путевых контуров; r – активное сопротивление путевого контура, I – вектор столбец токов i_k в k -х путевых контурах, f – вектор э.д.с. f_k , наводимых экипажными сверхпроводящими магнитами в k -х путевых контурах.

В выражениях (1) – (3): $D_{qv}, \Pi_{qv}, \Phi_{qv}, Q_v$ – дифференциальные операторы и обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам q_v ; T, Π, Φ – кинетическая, потенциальная энергия и функция рассеяния системы; F_L, F_S – нормальные и касательные электродинамические силы взаимодействия сверхпроводящих магнитов и путевых контуров, определяемые в соответствии с [1].

Величины f_k определяются из выражения:

$$f_k = - \sum_{m=1}^n i_m^c \frac{\partial M_{km}}{\partial t}, \quad (4)$$

где M_{km} – коэффициенты взаимной индукции между m -м сверхпроводящим магнитом и k -м контуром; n – число поездных сверхпроводящих магнитов; i_m^c – ток в m -м сверхпроводящем магните.

Решая совместно системы уравнений вида (1) и (2), будем оценивать динамические качества экипажа в случае движения экипажа на колесах шасси по стрелочному переводу.

Необходимым условием обеспечения устойчивого движения экипажа является выполнение следующего требования: движущиеся вдоль оси пути два магнита, расположенные в одной поперечной плоскости относительно путевых контуров, при их поперечном перемещении должны иметь нисходящую зависимость касательных электродинамических сил взаимодействия с контурами, т. е. эти силы должны быть восстанавливающими против поперечного сдвига двух магнитов относительно контуров. Кроме этого, нормальные электродинамические силы при таком взаимодействии двух магнитов с контурами должны иметь минимальное значение в положении, соответствующем их симметричному расположению относительно оси пути. Как показали результаты расчетов, эти условия должны быть соблюдены и при движении экипажа на колесных шасси по боковому пути стрелочного перевода.

Таким образом, для реализации устойчивого движения экипажа необходимо определить рациональные значения основных параметров системы, в первую очередь размеры соленоидов сверхпроводящих магнитов и путевых контуров, а также условия их взаимного размещения в состоянии равновесия экипажа.

Результаты проведенных исследований показали, что устойчивость движения экипажей вдоль плоского пути прямолинейного и криволинейного очертания в плане достигается при выполнении оговоренных выше условий для транспортных систем с четырьмя полосами прямоугольных токопроводящих путевых контуров и с двумя полосами сверхпроводящих магнитов при нормальном разрежении контуров вдоль оси пути с зазором 0,05 м, значениях их размеров в продольном и поперечном направлениях соответственно равных 1,0 и 0,3 м, а для соленоидов магнитов 1,2 и 0,5 м, диаметре прутков контуров 0,03 м и значении намагничивающей силы соленоидов магнитов, равной 430000 Авитков.

Для экипажа описанной транспортной системы было оценено его движение вдоль пути, имеющего следующее очертание в плане: прямолинейный участок пути протяженностью 150 м, входная круговая кривая, имитирующая кривизну острья перевода радиусом 350 м, длиной 40 м, прямая вставка –

50 м, выходная круговая обратной кривизны радиусом 350 м – 40 м, прямая – 320 м. Кривизна кривых имеет обратную зависимость от их радиуса.

В качестве примера рассмотрим движение по боковому пути стрелочного перевода и полученные результаты в виде экстремальных значений перемещений кузова и тележек, а также ускорений кузова в вертикальном и поперечном направлениях при движении вдоль оговоренного выше очертания путевой структуры в плане и значениях скоростей 10 м/с и 15 м/с.

При скорости 10 м/с:

$$z_k = 0,08 \text{ м}, z_i = -0,075 \text{ м}, \varphi_k = \varphi_i \approx 0, y_k = 0,037 \text{ м}, y_i = 0,001 \text{ м},$$

$$\theta_k = -0,018 \text{ рад}, \theta_i = 0,001 \text{ рад}, \psi_k = 0,0007 \text{ рад}, \psi_i = 0,0002 \text{ рад},$$

$$\ddot{z}_k = 0,025 \text{ м/с}^2, \ddot{y}_k = 0,34 \text{ м/с}^2;$$

при скорости 15 м/с:

$$z_k = 0,079 \text{ м}, z_i = -0,075 \text{ м}, \varphi_k = -0,0002 \text{ рад}, \varphi_i \approx 0, y_k = 0,125 \text{ м}, y_i = 0,005 \text{ м},$$

$$\theta_k = 0,062 \text{ рад}, \theta_i = 0,001 \text{ рад}, \psi_k = 0,0002 \text{ рад}, \psi_i = 0,00002 \text{ рад},$$

$$\ddot{z}_k = 0,01 \text{ м/с}^2, \ddot{y}_k = 0,075 \text{ м/с}^2.$$

Графики зависимостей боковых перемещений кузова и тележек, а также ускорений кузова от пройденного пути приведены при скоростях 10 м/с и 15 м/с соответственно на рис. 1 и рис. 2.

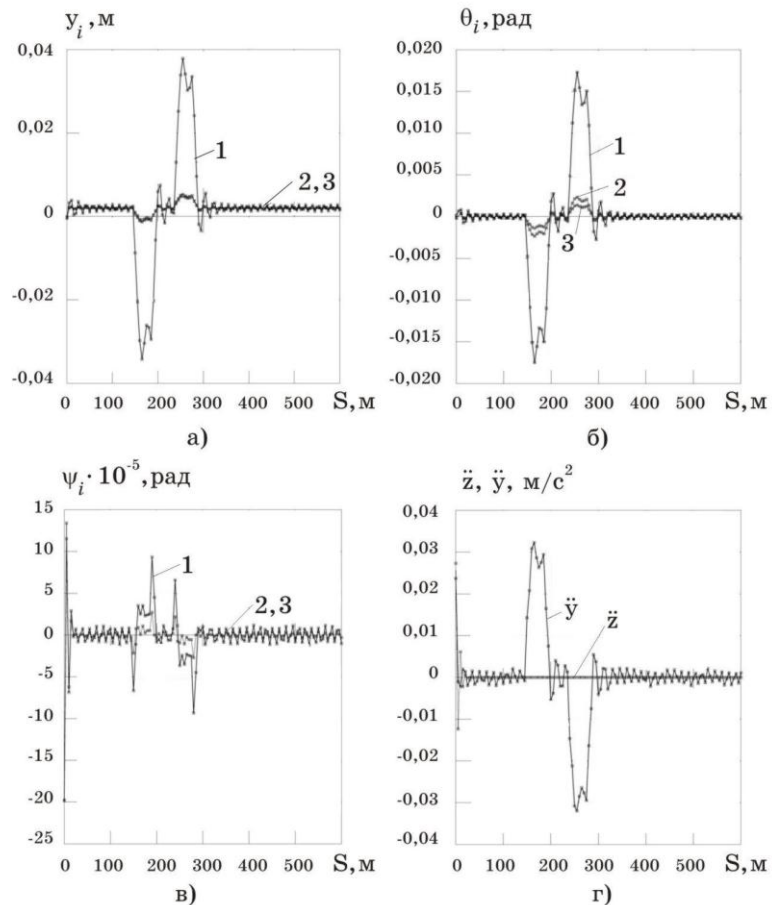


Рис. 1

На рисунках приняты обозначения: 1 – для кузова; 2, 3 – для первой и второй тележек; рис. 1(а), 2(а) соответствуют боковому откосу; 1(б), 2(б) – углам боковой качки; 1(в), 2(в) – углам виляния; 1(г), 2(г) – ускорения кузова в вертикальном и поперечном направлениях. Перемещения, соответствующие подпрыгиванию и галопированию кузова и тележек, быстро затухают, устанавливаясь около состояния статического равновесия.

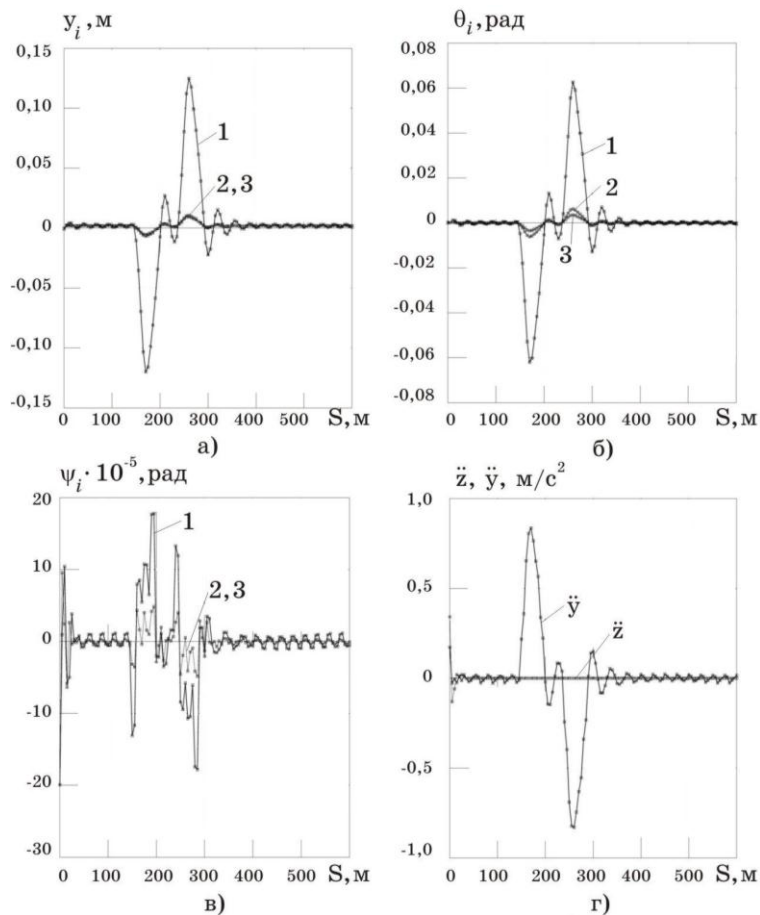


Рис. 2

Результаты проведенных исследований показали, что при рациональных значениях основных параметров имеет место устойчивое движение экипажа в пределах стрелочного перевода при скорости 10 и 15 м/с с приемлемыми перемещениями корпуса и тележек. В дальнейшем целесообразно проведение исследований этих систем по различным показателям.

1. Дзензерский В. А. Динамика экипажей нетрадиционных конструкций на сверхпроводящих магнитах / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко, В. В. Малый. – Днепропетровск : Арт-Пресс, 2011. – 248 с.
2. Дзензерский В. А. Устойчивость движения на шасси и при левитации электродинамического транспортного средства / В. А. Дзензерский, Т. Л. Губа, Т. И. Кузнецова, Н. А. Радченко, Н. М. Хачапуридзе // Вестник Херсонского национального университета. – 2008. – С.144 –148.

Институт транспортных систем
и технологий НАН Украины
«Трансмаг»,
Днепропетровск

Получено 04.02.14,
в окончательном варианте 20.03.14