

К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

На основании теоретических исследований движения экипажа различных электродинамических транспортных систем с плоской путевой структурой вдоль прямолинейных и криволинейных участков пути в плане проведено их сравнение по основным критериям, характеризующим колебания и устойчивость левитационного движения экипажей.

На підставі теоретичних досліджень руху екіпажа різних електродинамічних транспортних систем із плоскою колійною структурою уздовж прямолінійних і криволінійних ділянок колії в плані проведено їхнє порівняння за основними критеріями, що характеризують коливання й стійкість левітаційного руху екіпажів.

Based on the theoretical investigations of the vehicle motion of various electrodynamic transport systems with a plane track structure along straight and curved tracks in plane, the basic criteria for oscillations and the stability of levitation vehicles are compared.

В работах [1, 2] была показана возможность реализации левитационного движения экипажей электродинамических транспортных систем с плоской путевой структурой, на которой уложены два или четыре ряда токопроводящих контуров прямоугольного очертания.

Для электродинамических транспортных систем стоимость создания их путевой структуры является наиболее весомой по сравнению со стоимостью всей системы. Поэтому одним из наиболее существенных показателей для нее является расход неферромагнитного металла для контуров путевой структуры. Кроме этого, на левитацию экипажа оказывает первостепенное влияние значение величины намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов и их количество, а на качество левитации – ускорения кузова экипажа в вертикальном и поперечном направлениях.

Будем сравнивать транспортные электродинамические системы с четырьмя полосами токопроводящих контуров и двумя полосами магнитов (вариант I), с двумя полосами контуров и двумя полосами сверхпроводящих магнитов (вариант II) и с двумя полосами контуров и четырьмя полосами магнитов (вариант III). Конструктивные особенности этих систем описаны в работах [1, 2]. Общим для всех систем является опирание кузова через упруго-диссипативные элементы на две тележки, на донных поверхностях которых прикреплены по 16 сверхпроводящих магнитов для систем, соответствующих вариантам I и II, и 32 магнита для систем, соответствующих варианту III.

Оценка и сравнение всех описанных систем по упомянутым выше показателям представляется актуальной при выборе конструкторами рациональной конструктивной схемы системы и основных ее параметров, обеспечивающих необходимые качества левитационного движения.

Цель статьи состоит в оценке и изложении положительных и отрицательных свойств различных транспортных систем для обоснованного анализа и выбора их рациональной конструктивной схемы при проектировании.

Оценку левитационного движения экипажей будем проводить на основании исследований их пространственных колебаний при движении по прямолинейным и криволинейным участкам путевой структуры (постоянной и пе-

ременной кривизны). При этом считаем, что экипаж представляет собой электродинамическую систему, состоящую из трех тел (кузова и двух тележек), к которым жестко прикреплены на их горизонтальных поверхностях сверхпроводящие магниты. В качестве обобщенных координат были выбраны 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 каждого из исследуемых экипажей была представлена в виде связанных дифференциальных уравнений Лагранжа, описывающих пространственные 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 движения экипажа будем получать с помощью уравнения Лагранжа II рода:

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

а изменение токов в путевых контурах – с помощью уравнений, которые в матрично-векторном 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), (2), (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.

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.

Электродинамические силы взаимодействия сверхпроводящих магнитов с путевыми контурами F_{Lm} , F_{sm} вдоль нормалей и касательных к поверхностям магнитов в поперечных плоскостях определяются из выражений:

$$\begin{aligned} F_{Lm} &= i_m^c \sum_{k=1}^p i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial \Delta_m}; \\ F_{sm} &= i_m^c \sum_{k=1}^p i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial \delta_m}, \end{aligned} \quad (5)$$

где Δ_m и δ_m – значения зазоров, т.е. смещений m -ых сверхпроводящих магнитов относительно контуров путевой структуры в вертикальном и поперечном направлениях; p – число учитываемых контуров.

Решая совместно системы уравнений вида (1) и (2), будем оценивать динамические качества экипажа в случае левитационного его движения.

Необходимым условием обеспечения устойчивого левитационного движения экипажа является выполнение следующего требования: движущиеся вдоль оси пути два магнита, расположенные в одной поперечной плоскости, при их поперечном перемещении относительно путевых контуров 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.

Таким образом, для реализации устойчивого левитационного 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 при достаточном значении намагничивающих сил в соленоидах магнитов.

Сравнение упомянутых выше электродинамических систем проводилось для значений масс кузова и каждой из тележек экипажей, равных 25 т и 3,75 т, значений коэффициентов жесткости и вязкости упруго-диссипативных элементов в продольном и поперечном направлениях, соответственно равных 200 кН/м и 20 кН·с/м, при длинах соленоидов и путевых контуров, равных 1,2 м и 1,0 м, значении диаметра путевых контуров 0,03 м при расстоянии в продольном направлении между ними, равном 0,1 м для вариантов II и III и 0,1 – 1,1 м для варианта I. Значения ширины для контуров и соленоидов каждой из систем определялись из вышеизложенного условия обеспечения устойчивости левитационного движения и для контуров были приняты равными 0,3 м и 0,4 м для систем, соответствующих вариантам I и III конструктивных схем, и 0,35 м для системы, соответствующей варианту II, а для соленоидов – 0,5 м (вариант I), 0,8 м (вариант II) и 0,25 м (вариант III).

Для экипажей описанных транспортных систем было оценено их левитационное движение вдоль пути, имеющего следующее очертание в плане: прямолинейный участок пути протяженностью 150 м, входная переходная кривая длиной 500 м, круговая кривая радиусом 8000 м с наклоном поверхности пути к горизонтальной плоскости на угол 0,1 рад в сторону центра кривизны протяженностью 150 м, выходная переходная кривая – 400 м, прямая – 400 м. Кривизна переходных кривых имеет зависимость от её протяженности в соответствии с работой [3].

Оценка пространственных колебаний экипажей проводилась при значениях скорости движения 30 м/с и 100 м/с по значениям левитационных зазоров тележек, перемещениям всех твердых тел рассматриваемых систем, а также по значениям ускорений кузова экипажей в вертикальном и поперечном направлениях.

Результаты интегрирования уравнений движения показали, что на вертикальные перемещения кузова и тележек, углы их галопирования и виляния практически не оказывает влияния кривизна пути, а перемещения бокового отбоя y_i и углы боковой качки θ_i имеют максимальные значения в круговой кривой. Поэтому в дальнейшем будем оценивать левитационное движение экипажей по максимальным перемещениям и ускорениям его твердых тел. В частности, по поперечным перемещениям кузова и тележек y_k и y_i , углам их боковой качки θ_k , θ_i , по вертикальным перемещениям тележек z_i , по значениям ускорений кузова в поперечном и вертикальном направлениях \ddot{y}_k , \ddot{z}_k соответственно и по значениям намагничивающих сил в соленоидах, обеспечивающих левитационное движение – N_i . Кроме этого, будем оценивать расход неферромагнитной проволоки для путевых контуров в виде ее протяженности L на каждые сто метров путевой структуры. Отметим, что показатель, характеризующий расход неферромагнитного материала в метрах на каждые сто метров пути L , наибольший для системы варианта I, соответствующего случаю, когда расстояние в продольном направлении между путевыми контурами равно 0,1 м ($L = 945$ м). При расстоянии между поперечными контурами, расположенными под каждой полосой сверхпроводящих магнитов в шахматном порядке, равном 1,1 м, $L = 490$ м. Однако, значения намагничивающей силы для этих случаев равны $N_i = 430000$ А·витков ($l_0 = 0,1$ м) при одинаковом направлении токов в соленоидах магнитов и $N_i = 400000$ А·витков ($l_0 = 0,1$ м) при чередующихся направлениях токов в соленоидах магнитов. Намагничивающая сила N_i при $l_0 = 1,1$ м и одинаковом направлении токов в соленоидах равна 500000 А·витков. Левитационные зазоры для экипажа, соответствующего варианту I конструктивной схемы ($l_0 = 0,1$ м) при одинаковом направлении токов в соленоидах магнитов, соответственно равны 0,12 м и 0,18 м для скорости движения 30 м/с и 100 м/с. В случае, когда $l_0 = 1,1$ м и токи в соленоидах магнитов имеют одинаковое направление, $z_i = 0,11$ м и $z_i = 0,20$ м для скоростей 30 м/с и 100 м/с. Ускорения кузова в вертикальном направлении z_k для всех случаев варианта I не превышают $0,1$ м/с², а в поперечном направлении определяются непогашенным поперечным ускорением в кривых $a_H = v^2/R - \theta_r \cdot g$ (где v – скорость движения, R – радиус круговой кривой, θ_r – угол наклона поверхности путевой структуры в сторону кривизны).

Приведем для варианта II конструктивной транспортной системы экстремальные значения основных показателей, характеризующих левитационное движение экипажа:

а) скорость 40 м/с ($L = 490$ м, $l_0 = 0,1$ м), $N_i = 468000$ А·витков,
 $z_i = 0,04$ м, $\ddot{z}_k = 1,25$ м/с²;

б) скорость 100 м/с ($L = 490$ м, $l_0 = 0,1$ м), $N_i = 468000$ А·витков,
 $z_i = 0,135$ м, $\ddot{z}_k = 0,07$ м/с².

Следует особо отметить, что наименьшее значение скорости, при которой обеспечивается левитация для этого варианта, приблизительно равно 40 м/с.

Для варианта III конструктивной схемы экстремальные показатели соответствуют:

а) скорость 30 м/с ($L = 267$ м, $l_0 = 1,1$ м), $N_i = 690000$ А·витков,
 $z_i = 0,12$ м, $\ddot{z}_k = 0,09$ м/с²;

б) скорость 100 м/с ($L = 267$ м, $l_0 = 1,1$ м), $N_i = 690000$ А·витков,
 $z_i = 0,195$ м, $\ddot{z}_k = 0,05$ м/с².

Существенной особенностью для варианта III конструктивной схемы является необходимость установки не шестнадцати, как в вариантах I и II, а тридцати двух сверхпроводящих магнитов.

Экстремальные величины поперечных отсчетов кузова и тележек y_k и y_i и углов их боковой качки θ_k , θ_i для всех трех вариантов характеризуются небольшими значениями ($y_k = 0,06$ м, $y_i = 0,01$ м, $\theta_k = 0,025$ рад, $\theta_i = 0,018$ рад), а углы галопирования и виляния имеют весьма малые значения ($\psi_k = 0$, $\psi_i = 0,001$ рад, $\psi_k = 0,0001$ рад, $\psi_i = 0,0002$ рад).

Принимая во внимание, что для вариантов I и III имеют место меньшие минимальные скорости левитационного движения, чем для варианта II, а для варианта III необходимо тридцать два сверхпроводящих магнита вместо шестнадцати для вариантов I и II, а также меньшее значение намагничивающих сил для вариантов I и II, чем для варианта III, при примерно равном значении показателя, характеризующего расход неферромагнитного материала L для вариантов I ($l_0 = 1,1$ м) и II, можно считать, что из всех трех рассмотренных вариантов целесообразно считать лучшим вариант I при $l_0 = 1,1$ м.

1. Дзензерский В. А. Колебания и устойчивость движения экипажей электродинамических транспортных систем нетрадиционных конструкций / В. А. Дзензерский, О. В. Звонарева, В. В. Малый и др. // Вестник Херсонского национального университета «ХНТУ». – 2009. – Вып. 35. – С.185 – 189.
2. Дзензерский В. А. Колебания и устойчивость движения электродинамических экипажей вдоль плоской путевой структуры систем / В. А. Дзензерский, Т. И. Кузнецова, Н. А. Радченко, Н. М. Хачапуридзе // Вестник Херсонского национального университета "ХНТУ". – 2010. – Вып. 39. – С. 148 – 152.
3. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахуняц. – М.: Транспорт 1969. – 536 с.

Институт транспортных систем
и технологий НАН Украины
„Трансмаг”;

Получено 13.02.2012,
в окончательном варианте 07.11.2012

Днепропетровский национальный
университет железнодорожного
транспорта им. акад. Лазаряна,
Днепропетровск