

К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

Постановка проблемы. Высокоскоростной левитационный электродинамический транспорт, основанный на использовании явления отталкивания прикрепленных к экипажу сверхпроводящих магнитов от путевой структуры с неферромагнитными контурами, имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными видами транспорта. Разработанные и созданные образцы электродинамических транспортных систем в Японии, проходящие в настоящее время стадию испытаний и совершенствования, имеют ряд недостатков, одним из которых является сложность их конструкции, обусловленная главным образом применением профилированных путевых структур (U и П-образного очертания) и ходовых частей экипажей [1]. Такое очертание путевой структуры является не простым и связано с решением задачи обеспечения прочности боковых стенок из-за больших значений боковых электродинамических сил. Кроме этого при профилированном очертании путевой структуры значительные сложности возникают в устройствах стрелочных переводов и при уходе за путевой структурой и ходовыми частями вследствие необходимости очистки от снега, мусора, камнепадов и пр.

Поэтому представляется целесообразным применение более простых систем, в частности, с плоской путевой структурой и плоскими донными поверхностями тележек экипажа. Из множества вариантов выбран вариант, удовлетворяющий требованиям не только устойчивости левитационного движения экипажа, а и требованиям, вытекающим из экономических соображений.

Цель статьи состоит в изложении рациональной конструктивной схемы транспортной системы с плоской путевой структурой и оценке колебаний и устойчивости левитационного прямолинейного и криволинейного движения экипажа этой системы.

Основная часть. Экипаж вместе с путевой структурой будем представлять электромеханической системой, состоящей из твердых тел: корпуса экипажа и двух тележек, к каждой из которых к горизонтальным донным поверхностям прикреплены по восемь сверхпроводящих магнитов, а также из четырех полос путевых короткозамкнутых токопроводящих контуров, прикрепленных к плоской горизонтальной поверхности путевой структуры (по 2 полосы под каждым рядом магнитов, путевые контуры которых сдвинуты относительно друг друга в поперечном направлении, т.е. принято шахматное расположение контуров в каждой из полос).

Корпус экипажа опирается на тележки посредством упруго-диссипативных элементов в вертикальном и поперечном направлениях.

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.

Математическая модель движения исследуемого экипажа вдоль плоской путевой структуры была представлена в виде связанных дифференциальных уравнений, описывающих перемещения твердых тел системы, и уравнений токов в токопроводящих контурах путевой структуры [1,2,3].

Уравнения состояния транспортной системы (движущийся экипаж и изменение токов в токопроводящих контурах путевой структуры) будем получать 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

$$D_{qv} = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v}; \quad \Pi_{qv} = \frac{\partial \Pi}{\partial q_v};$$

$$\Phi_{qv} = \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_v}; \quad Q_v = \varphi(F_L, F_S);$$
(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; F_L, F_S – нормальные и касательные электродинамические силы взаимодействия сверхпроводящих магнитов и путевых контуров; N – число степеней свободы системы.

Величины f_k определялись из выражения:

$$f_k = - \sum_{m=1}^n i_m^c \frac{\partial M_{km}}{\partial t},$$
(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 нормали и касательной к поверхностям магнитов в поперечной плоскости определялись из выражений:

$$F_{Lm} = i_m^c \sum_{k=1}^p i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial \Delta_m};$$

$$F_{Sm} = i_m^c \sum_{k=1}^p i_k \frac{\partial M}{\partial \delta_m},$$
(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 случаях, когда имеет место левитационное движение.

С помощью численного интегрирования уравнений были оценены пространственные колебания экипажа по значениям перемещений корпуса и тележек, значения электродинамических сил, действующих на магниты, левитационных зазоров, ускорений корпуса.

Для расчетов были приняты следующие значения основных параметров исследуемой системы: масса корпуса и тележек соответственно 25 т и 3,75 т, зазоры между путевыми контурами в продольном направлении 1,1 м, диаметр прутков путевых контуров 0,03 м, длины путевых контуров и соленоидов 1,0 и 1,2 м, а их ширины соответственно равными 0,3 и 0,5 м. Расстояние в поперечном направлении между контурами каждой из полос принято равным 0,05 м.

Рассматривалось левитационное движение экипажей по участку путевой структуры следующего очертания в плане: прямолинейный участок, входная переходная кривая, круговая кривая радиусом 8000 м, выходная переходная кривая, прямая с протяженностью каждого из участков соответственно равных 250, 500, 150, 450, 250 м.

Для рассмотренной системы расположение магнитов на экипаже таково, что их проекции продольных осей на плоскость путевой структуры совпадают в состоянии равновесия с серединой зазора между двумя рядами путевых контуров, каждой из двух полос, находящихся под этими магнитами.

Основопологающей посылкой при разработке конструктивной схемы транспортной системы с плоской путевой структурой является выполнение следующего требования, исходящего из условий взаимодействия сверхпроводящих магнитов с путевыми контурами, расположенными в параллельных горизонтальных плоскостях. Геометрические размеры сверхпроводящего магнита и путевых контуров, их взаимное размещение, необходимое значение намагничивающей силы в соленоидах магнита при взаимном их поперечном перемещении относительно состояния равновесия должны быть такими, при которых имеет место нисходящая зависимость касательных электродинамических сил в поперечном направлении и минимальное значение нормальных электродинамических сил в состоянии равновесия.

При выполнении этих требований удовлетворяются условия устойчивого левитационного движения экипажей на прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры в плане.

Оценка левитационного движения экипажа для рассмотренного варианта размещения путевых контуров на путевой структуре проводилась в диапазоне скоростей 30 – 100 м/с и показала, что движение экипажа для описанного варианта устойчиво на прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры.

Отметим, что кривизна путевой структуры оказывает влияние на линейные перемещения бокового отнosa корпуса y_k и тележек $y_i (i = 1, 2)$, угловые перемещения бокового отнosa θ_k, θ_i и на левитационные зазоры под левой и правой полосами сверхпроводящих магнитов $\Delta_j (j = 1, 2, \dots, 16)$. На криволинейных участках пути эти зазоры имеют различные значения.

Остальные перемещения твердых тел рассматриваемых транспортных систем практически не зависят от кривизны путевой структуры и быстро затухают по всем выбранным обобщенным координатам.

Поэтому для характеристики левитационного движения экипажа рассмотренного варианта транспортной системы приведем экстремальные значения величин $z_i, y_k, y_i, \theta_k, \theta_i, \Delta_j, \ddot{z}_k, \ddot{y}_k (i = 1, 2, j = 1, 2, \dots, 16)$ и намагничивающей силы в соленоидах магнитов i_c .

Эти величины соответствуют следующим значениям:

I вариант - ($v = 30 \text{ м/с}$)

$$z_i = 0,11 \text{ м}, y_k = 0,01 \text{ м}, y_i = 0,052 \text{ м}, \theta_k = 0,0158 \text{ рад}, \theta_i = 0,013 \text{ рад},$$

$$\Delta_j = 0,093 - 0,119 \text{ м}, \ddot{z}_k = 0,013 \text{ м/с}^2, \ddot{y}_k = -0,034 \text{ м/с}^2, i_c = 805000 \text{ А} \cdot \text{витков};$$

II вариант - ($v = 100 \text{ м/с}$)

$$z_i = 0,20 \text{ м}, y_k = 0,0135 \text{ м}, y_i = -0,002 \text{ м}, \theta_k = -0,0045 \text{ рад}, \theta_i = -0,0022 \text{ рад},$$

$$\Delta_j = 0,185 - 0,222 \text{ м}, \ddot{z}_k = 0,02 \text{ м/с}^2, \ddot{y}_k = 0,02 \text{ м/с}^2, i_c = 805000 \text{ А} \cdot \text{витков};$$

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Как видно из этих результатов, для выбранного варианта исследуемой транспортной системы имеет место левитация экипажа в диапазоне скоростей $v = 30 - 100$ м/с с приемлемыми левитационными зазорами, причем, как показали результаты ранее проведенных расчетов размеры соленоидов и путевых контуров имеют по сравнению с другими вариантами конструктивных схем транспортной системы небольшие значения. Окончательные выводы рекомендательного характера о выборе рациональной конструктивной схемы транспортной системы с плоской путевой структурой целесообразно сделать после исследований не только собственных, а и вынужденных колебаний, обусловленных несовершенствами экипажа и путевой структуры.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дзензерский В.А. Динамика экипажей нетрадиционных конструкций / В.А. Дзензерский, Н.А.Радченко, В.В. Малый // Днепрпетровск, 2011. – С. 248 .
2. Зевин А.А. Электродинамическая транспортная система с плоской путевой структурой / А.А.Зевин, Н.А.Радченко, Т.И.Кузнецова, Л.А.Филоненко // Техническая механика – 2004. - №2. – С. 120 – 122.
3. Дзензерский В.А. Колебания и устойчивость движения электродинамических экипажей вдоль плоской транспортной системы / В.А.Дзензерский, Т.И.Кузнецова, Н.А.Радченко, Н.М.Хачапуридзе // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2008. - №3. – С. 144 – 148.

ДЗЕНЗЕРСКИЙ Виктор Александрович – д.т.н., профессор, директор Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

Научные интересы:

– динамика наземных транспортных систем.

КУЗНЕЦОВА Татьяна Ивановна – вед. инженер Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

Научные интересы:

– динамика транспортных электромеханических систем.

РАДЧЕНКО Николай Алексеевич – д.т.н., ст. научн. сотр., вед. научн. сотрудник Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

Научные интересы:

– динамика наземного транспорта.

ХАЧАПУРИДЗЕ Николай Михайлович – к.т.н., ст. научн. сотр., зам. директора по научной работе Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

Научные интересы:

– динамика наземных транспортных систем.