

В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, д.т.н., профессор, директор, «Трансмаг» (Украина);
Т. И. КУЗНЕЦОВА, вед. инж., «Трансмаг» (Украина);
В. В. МАЛЫЙ, н.с., ИТМ (Украина);
Н. А. РАДЧЕНКО, д.т.н., ст.н.с., вед.н.с., «Трансмаг» (Украина);
Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ, к.т.н., ст.н.с., зам. директора, «Трансмаг» (Украина)

НЕТРАДИЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Описано компонования електродинамічних транспортних систем із плоскою колійною структурою й оцінені коливання й стійкість левітаційного руху їхніх екіпажів. Показано, що при раціональному виборі основних параметрів систем забезпечується стійкий левітаційний рух екіпажів у прямолінійних і криволінійних ділянках колії.

Описаны компоновки электродинамических транспортных систем с плоской путевой структурой и оценены колебания и устойчивость левитационного движения их экипажей. Показано, что при рациональном выборе основных параметров систем обеспечивается устойчивое левитационное движение экипажей в прямолинейных и криволинейных участках пути.

The arrangements of electro-dynamic transport systems with the flat track structure are described and the fluctuations and stability of levitation motion of their vehicles are evaluated. It is shown that under rational choice of main parameters of the systems a stable levitation motion of the vehicles in straight-line and curvilinear sections of the track is provided.

Постановка проблемы. В настоящее время разрабатываемые и созданные конструкции транспортных систем имеют профилированное очертание путевой структуры, в частности в виде U и П-образного очертания в поперечном сечении. Такое очертание имеет недостатки, обусловленные относительной сложностью конструкций, необходимостью обеспечения прочности боковых стенок путевой структуры и тележек экипажей и сложностями, возникающими в процессе эксплуатации системы (прежде всего, связанные с очисткой от снега, мусора и пр.).

Целесообразно поэтому разработать и исследовать более простые конструкции транспортных систем, в частности, системы с плоскими путевыми структурами и донными горизонтальными поверхностями тележек экипажей, которые обеспечивали бы необходимые динамические качества и, в первую очередь, устойчивость и безопасность левитационного движения экипажей, как в прямолинейных, так и в криволинейных участках пути в плане.

Анализ публикаций по теме исследования. В ранее проведенных исследованиях [1, 2, 3, 4] уделялось внимание главным образом оценке колебаний и устойчивости прямолинейного и криволинейного движения экипажей электродинамических систем с профилированным очертанием путевой структуры. В 2005 г.

появились первые публикации [5, 6], посвященные оценке левитационного движения электродинамических экипажей транспортной системы с четырьмя полосами контуров на плоской путевой структуре и двумя рядами сверхпроводящих магнитов, установленных на донных поверхностях экипажей. Однако, дальнейшие поиски в этой области привели к разработке и оценке динамических качеств различных транспортных систем с плоскими путевыми структурами. При этом были найдены критерии, соответствующие устойчивости и безопасности движения в широком диапазоне скоростей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры в плане.

Цель статьи. В настоящей работе представлены разработанные различные конструктивные схемы транспортных систем с плоской путевой структурой и оценены колебания, устойчивость и безопасность левитационного движения экипажей транспортных систем с плоскими путевыми структурами вдоль прямолинейных и криволинейных участков путевой структуры.

Основная часть. Основополагающей посылкой при разработке нетрадиционных конструктивных схем транспортных систем с плоской путевой структурой является выполнение следующих требований, исходящих из условий взаимодействия сверхпроводящих магнитов с

путевыми контурами, расположенными в параллельных горизонтальных плоскостях. Геометрические размеры сверхпроводящего магнита и путевых контуров а также их взаимное размещение должны удовлетворять условиям их взаимодействия, при которых имеет место при относительном их перемещении в поперечном направлении нисходящая зависимость касательных поперечных электродинамических сил и минимальное значение нормальных электродинамических сил в состоянии равновесия при значении намагничивающей силы, обеспечивающей левитацию.

При выполнении этих требований удовлетворяют условию устойчивого левитационного движения экипажа в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры в плане следующие компоновки конструктивных схем транспортных систем с плоскими путевыми структурами:

I вариант – система с четырьмя полосами путевых контуров и двумя полосами сверхпроводящих магнитов (рис. 1а).

II вариант – система с двумя полосами путевых контуров и четырьмя полосами сверхпроводящих магнитов (рис. 1б);

III вариант – система с двумя полосами путевых контуров и двумя полосами сверхпроводящих магнитов (рис. 1в).

Для исследования пространственных колебаний и устойчивости левитационного движения экипажей описанных выше транспортных систем будем их представлять в виде электро-механических систем, в которых экипажи состоят из трех твердых тел: кузова и двух тележек с прямоугольными сверхпроводящими магнитами, а также короткозамкнутых прямоугольных токопроводящих путевых контуров.

Математическая модель движения экипажей исследуемых транспортных систем была представлена в виде связанных дифференциальных уравнений Лагранжа, описывающих движение экипажа [2,7], и уравнений токов в контурах путевой структуры, которые имеют следующий вид:

$$L \frac{dI}{dt} + rI = f, \quad (1)$$

где L – матрица коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции путевых контуров; r – активное сопротивление путевого контура; I – вектор столбец токов в путевых контурах; f – вектор э.д.с. f_k , наводимых экипажными магнитами в k -х путевых контурах.

Величины f_k определялись из выражения:

$$f_k = - \sum_{m=1}^n i_m^c \frac{\partial M_{km}}{\partial t}, \quad (2)$$

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

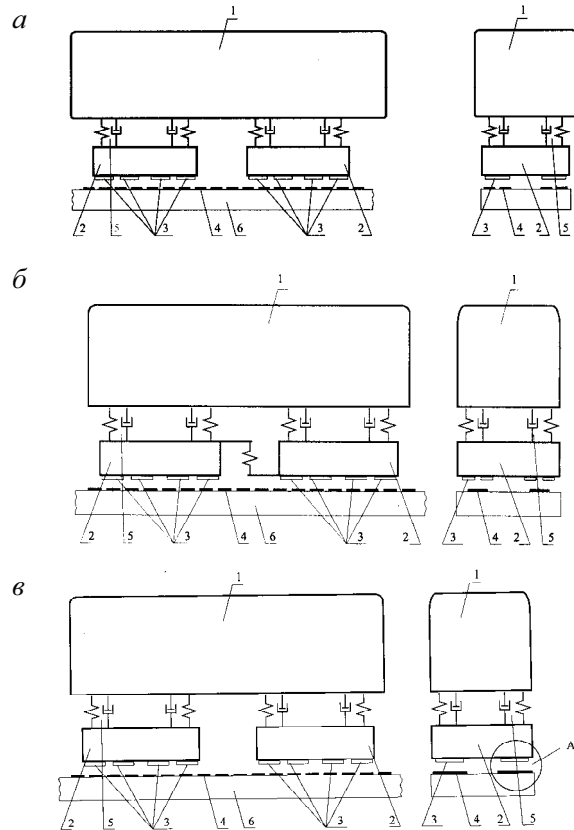


Рис. 1. Расчетные схемы транспортных систем: 1 – кузов, 2 – тележки, 3 – сверхпроводящие магниты, 4 – токопроводящие контуры, 5 – упруго-диссипативные элементы, 6 – путевая структура, А – узел взаимодействия магнита с путевым контуром.

С помощью численного интегрирования уравнений, описывающих колебания экипажа и изменение токов в путевых контурах, были оценены пространственные колебания экипажей при выбранных рациональных значениях параметров по значениям перемещений кузова и тележек, левитационным зазорам, электродинамическим силам взаимодействия между сверхпроводящими магнитами и путевыми контурами и ускорениям кузова в вертикальном и поперечном направлениях.

Для расчетов были приняты следующие значения основных параметров исследуемых транспортных систем: масса кузова и каждой из

тележек соответственно 25 и 3,75 т, жесткости и коэффициенты вязкости упруго-диссипативных элементов между кузовом и тележками в вертикальном и поперечном направлениях 200 кН/м и 20 кН·с/м, намагничивающая сила в соленоидах сверхпроводящих магнитов $3,0 \cdot 10^5$ А·витков для системы соответствующей I варианту конструктивной схемы, $5,0 \cdot 10^5$ А·витков для системы II варианта и $5,2 \cdot 10^5$ А·витков для третьего варианта. Продольные размеры соленоидов сверхпроводящих магнитов и путевых контуров были приняты равными для всех вариантов соответственно 1,2 и 1,0 м, а поперечные их размеры 0,5 и 0,3 м для I варианта конструктивной схемы; 0,25 и 0,5 м для II варианта и 1,0 и 0,5 м для III варианта. Зазоры в продольном направлении между путевыми контурами для всех систем приняты равными 0,05 м, а в поперечном направлении для I варианта и между магнитами для II варианта, отнесенные к одной (левой или правой стороне экипажа), приняты соответственно равными 0,1 и 0,16 м. Диаметр прутков путевых контуров принят 0,03 м.

Расчеты проводились для случаев движения экипажей по участку пути переменной кривизны следующего очертания в плане: прямолинейный участок пути длиной 300 м, входящая переходная кривая длиной 500 м, круговая кривая радиусом 8000 м с углом поперечного наклона к горизонтальной плоскости 0,1 рад протяженностью 150 м, выходная переходная кривая – 400 м, прямая – 250 м. Углы наклона к поверхности путевой структуры к горизонтальной плоскости в переходных кривых принимались пропорциональными кривизне пути, которая изменялась от нуля до значения, равного кривизне пути в круговой кривой по синусоидальной зависимости [2].

Результаты расчетов показали, что для всех упомянутых систем при параметрах, оговоренных выше, имеет место устойчивое левитационное движение экипажа как в прямолинейных, так и криволинейных участках путевой структуры с приемлемыми левитационными зазорами и уровнем ускорений кузова в поперечном и вертикальном направлениях.

Для экипажа I варианта конструктивной схемы транспортной системы с плоской путевой структурой графические зависимости перемещений экипажа и его левитационных зазоров приведены в работе [5].

Для экипажа, соответствующего II варианту транспортной системы с плоской путевой структурой, оказалось, что вертикальные ли-

нейные и угловые перемещения кузова и тележек практически не реагируют на кривизну пути. Значения вертикальных перемещений тележек соответствуют при скорости 100 м/с $\approx 0,165$ м, а при скорости 30 м/с $\approx 0,1$ м.

Зависимости перемещений кузова и тележек при боковом отnose y_k, y_i , боковой качке θ_k, θ_i , углов виляния $\psi_k, \psi_i (i=1,2)$ и левитационных зазоров под j -ми магнитами ($j=1,7$ крайние магниты с левой стороны экипажа, $j=2,8$ – с правой стороны) от пройденного пути приведены при скорости 100 м/с соответственно на рис.2, 3, 4 и 5, где линии 1, 2 относятся к тележкам, 3 – к кузову, а линии, обозначенные $j=1,2,7,8$ – к левитационным зазорам.

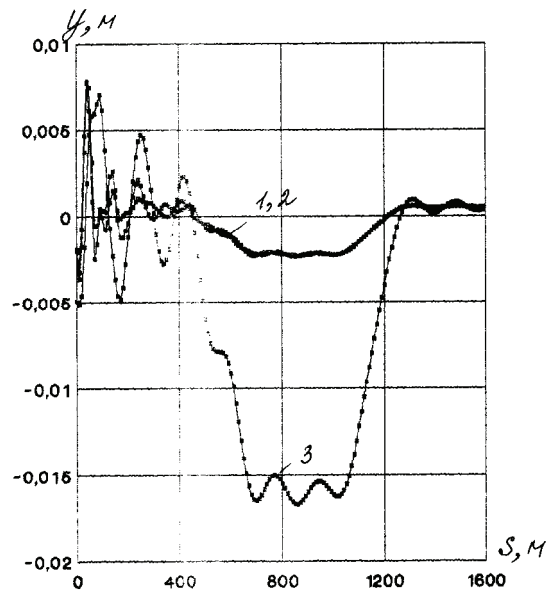


Рис. 2.

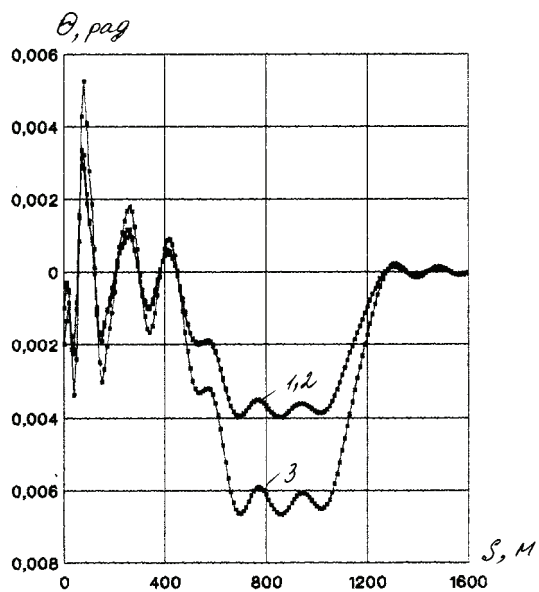


Рис. 3.

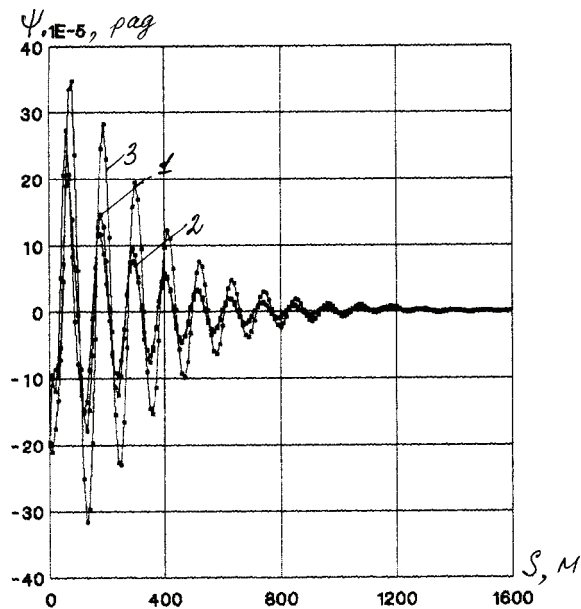


Рис. 4.

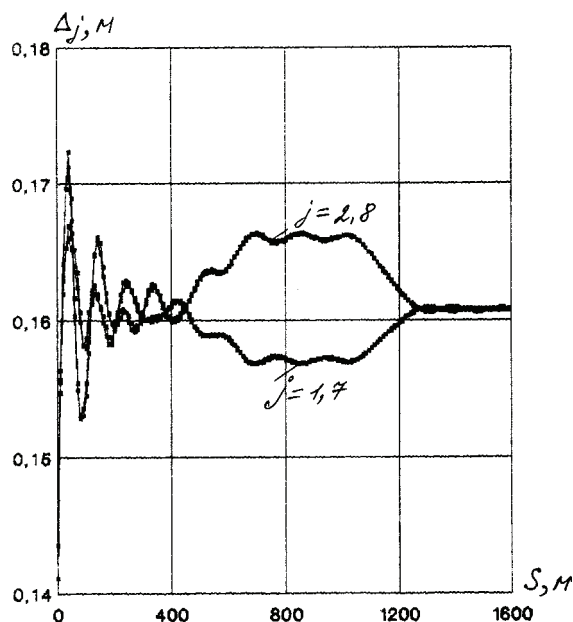


Рис. 5.

Качественно аналогичные результаты получены и при скорости 30 м/с с тем лишь отличием, что перемещения бокового отбоя и боковой качки имеют положительные значения в криволинейных участках путевой структуры, а левитационные зазоры больше под левой стороной экипажа (т.е. со стороны магнитов удаленных от центра кривизны пути).

Для экипажа транспортной системы с плоской путевой структурой, соответствующего III

варианту, зависимости перемещений левитационных зазоров имеют такой же характер, как и для экипажа II варианта транспортной системы. Ускорения кузова не превышают в вертикальном направлении в диапазоне скоростей 40 – 100 м/с значений $0,2 \text{ м/с}^2$, а в поперечном $0,4 \text{ м/с}^2$.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Таким образом, для всех рассмотренных транспортных систем с плоской путевой структурой обеспечивается при рациональных значениях основных параметров устойчивое левитационное движение экипажей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры. В дальнейшем целесообразно проведение вынужденных колебаний для экипажа этих систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамическим подвесом [Текст] / под ред. В. А. Дзензерского, В. И. Омеляненко. – Науч. думка, 2001. – 480 с.
2. Дзензерский, В. А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах [Текст] / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко. – Д., 2003. – 231 с.
3. Исследование колебаний, стационарных режимов и устойчивости движения различных типов электродинамических транспортных систем [Текст] / В. А. Дзензерский и др. // Техническая механика. – 2003. – № 1. – С. 145-153.
4. Радченко, Н. А. Оценка колебаний электродинамического транспортного средства при небольших скоростях движения [Текст] / Н. А. Радченко, О. В. Звонарева, В. В. Малый // Техническая механика. – 2007. – № 2. – С. 138-141.
5. Электродинамическая транспортная система с плоской путевой структурой [Текст] / А. А. Зевин и др. // Техническая механика. – 2004. – № 2. – С. 120-122.
6. Дзензерский, В. А. Оценка левитационного движения электродинамического транспортного средства вдоль плоской путевой структуры [Текст] / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко, Н. М. Хачапуридзе // Екологічні проблеми Чорного моря: Одеса. – 2004. – С. 142-144.
7. Устойчивость движения на шасси и при левитации электродинамического транспортного средства [Текст] / В. А. Дзензерский и др. // Вестник Херсонского нац. ун-та. – 2008. – № 2 (31). – С. 144-148.

Поступила в редколлегию 12.08.2009