

Н. А. РАДЧЕНКО, Т. И. КУЗНЕЦОВА (Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепрпетровск), О. В. ЗВОНАРЕВА (ДИИТ)

ОЦЕНКА ЛЕВИТАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ КОНТУРОВ ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Наведено результати теоретичних досліджень просторових коливань та стійкості левітаційного руху електродинамічних транспортних засобів для різних варіантів окреслення та розміщення прямокутних шляхових контурів на плоскій шляховій структурі.

Приведены результаты теоретических исследований пространственных колебаний и устойчивости левитационного движения электродинамических транспортных средств для различных вариантов очертания и размещения прямоугольных путевых контуров на плоской путевой структуре.

The results of investigation of spatial oscillations and stability of motion of electrodynamically levitated vehicle are presented. Various shapes of the track contours and their arrangement on a plain track structure are considered.

Электродинамический транспорт является одним из перспективных видов транспорта. Это транспорт будущего. Преимущество его по сравнению с другими видами транспорта определяется высокой скоростью движения, плавностью хода, обусловленной его левитацией, экологичностью, экономичностью.

Высокая, для большинства стран недоступная, стоимость создания его является следствием сложности и несовершенства конструкций его подвижного состава и путевой структуры. Поэтому упрощение их конструкций является одной из основных задач при проектировании и создании этого вида транспорта.

В настоящей работе рассматриваются варианты создания упрощенных конструкций подвижного состава и путевой структуры электродинамических транспортных систем и как следствие этого уменьшение их стоимости.

В настоящее время созданная в Японии электродинамическая транспортная система находится в стадии испытаний и доводки. Ее конструкция характеризуется профилированным U -образным очертанием в поперечном сечении путевой структуры и ходовых частей подвижного состава, которое обусловлено главным образом необходимостью обеспечить устойчивость и направление движения в плане экипажей.

Также очертание ходовых частей подвижного состава и путевой структуры приводят к сложностям, обусловленным непростой конструкцией системы, необходимостью решать

проблему обеспечения прочности боковых стенок U -образной путевой структуры из-за больших значений боковых электродинамических сил, сложную задачу по созданию стрелочных переводов, по уходу и содержанию элементов пути и подвижного состава (в значительной степени из-за необходимости очистки от снега, мусора, камнепадов).

Поэтому, авторами работы предлагаются варианты создания более простых конструкций, в частности системы с плоскими частями ходовых частей подвижного состава и путевой структуры, которые обеспечивают устойчивость, направление и безопасность движения экипажей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры.

Так, в работе [1] описана конструкция транспортной системы с четырьмя полюсами путевых прямоугольных контуров одинаковой ширины, установленных на горизонтальных поверхностях плоской путевой структуры, и экипажа с плоскими частями ходовых частей тележек со сверхпроводящими магнитами, взаимодействующих с контурами путевой структуры. Движение экипажа такой транспортной системы направляется очертанием контуров путевой структуры в плане и устойчиво не только в прямолинейных, а и в криволинейных участках путевой структуры в широком диапазоне скоростей. Дальнейшие результаты исследований показали, что эту систему можно в значительной степени упростить путем изменения размеров и положения путевых контуров.

Рассмотрим несколько вариантов упрощения системы с четырьмя полюсами путевых контуров.

Анализ характера взаимодействия сверхпроводящего магнита и двух полос контуров показал при их взаимном перемещении, что устойчивого движения транспортного средства можно достигнуть путем применения полос контуров одинаковой ширины (I вариант). Так, в частности было показано на основании теоретических исследований, что ширина путевых контуров может быть существенно уменьшена и при рациональном их взаимном размещении, так же как и рациональном размещении сверхпроводящих магнитов достигается устойчивое левитационное движение экипажа в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры. Однако размеры контуров и сверхпроводящих магнитов и их взаимное расположение в состоянии равновесия должны удовлетворять условию: при взаимном перемещении в поперечном направлении движущихся вдоль оси магнитов относительно путевых контуров касательные электродинамические силы должны иметь нисходящую зависимость от поперечных перемещений магнитов, а вертикальные электродинамические силы должны иметь минимальные значения, соответствующие состоянию равновесия магнитов, по сравнению с другими значениями этих сил в смещенном их положении в поперечном направлении.

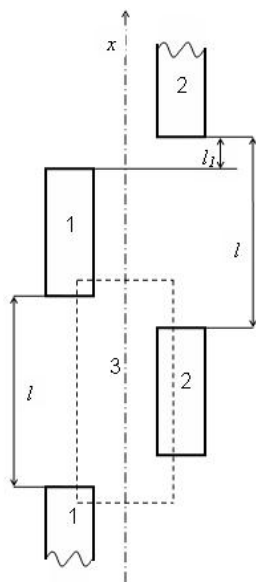


Рис. 1. Схема размещения полос (1, 2) контуров под одной полосой (3) магнитов (II вариант)

Во втором варианте упрощенных схем укладки путевых контуров на плоской путевой структуре рассмотрен случай, когда соседние контуры каждой из двух полос смещены отно-

сительно друг друга на расстояние, превышающее длину контуров, и контуры каждой из полос уложены с шагом вдоль путевой структуры, превышающим их длину (см. рис. 1). Под другой полосой магнитов контуры расположены симметрично относительно продольной оси.

Третий вариант упрощенной схемы размещения контуров отличается от второго тем, что контуры соседних полос не смещены относительно друг друга и расположены друг против друга (см. рис. 2). В случае небольшого зазора в продольном направлении между контурами l , соответствующего значению 0,05 м, этот вариант соответствует расчетной схеме, изложенной в работе [1].

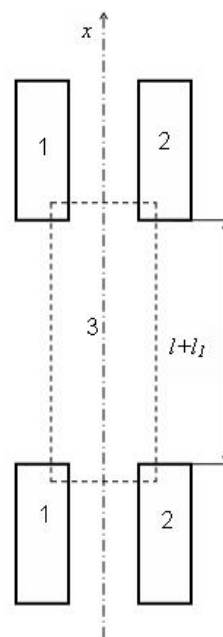


Рис. 2. Схема размещения полос (1, 2) контуров под одной полосой (3) магнитов (III вариант)

Оценку колебаний и устойчивости левитационного движения экипажей будем проводить для электромеханической системы, состоящей из 3 твердых тел: кузова экипажа и двух его тележек (с жестко прикрепленными к ним по восемь сверхпроводящих магнитов), соединенных между собой упруго-диссипативными элементами в вертикальном и поперечном направлениях, а также из токопроводящих прямоугольных контуров путевой структуры.

Оценивались линейные перемещения твердых тел: кузова и тележек экипажей в вертикальном и поперечном направлениях z_k, z_i и y_k, y_i ($i = 1, 2$ – индексы для обозначения номеров тележек), угловые перемещения твердых тел θ_k, θ_i – при боковой качке, φ_k, φ_i – при галопировании, Ψ_k, Ψ_i – при вилянии, а также

ускорения кузова в вертикальном и поперечном направлениях – \ddot{z}_k, \ddot{y}_k .

Математические модели для исследуемых систем были получены с помощью уравнений Лагранжа II-го рода, описывающих движение твердых тел, и уравнений токов в замкнутых контурах. Расчеты были выполнены с учетом связанности дифференциальных уравнений, описывающих пространственное положение кузова и тележек экипажа и изменение токов в путевых контурах [1, 2].

Оценка левитационного движения экипажей проводилась для участка путевой структуры следующего очертания в плане: прямолинейный участок пути 300 м, входная переходная кривая длиной 500 м, круговая кривая радиусом 8000 м с углом поперечного наклона поверхности путевой структуры к горизонтальной плоскости 0,1 рад и длиной 150 м, выходная переходная кривая протяженностью 400 м и прямая длиной 250 м. Углы наклона поверхности путевой структуры к горизонтальной плоскости в переходных кривых принимались пропорциональными кривизне пути, которая изменялась по синусоидальной зависимости от нуля до значения, равного кривизне пути в круговой кривой [3].

Рассмотрим полученные результаты расчетов для исследуемых транспортных систем при следующих значениях основных параметров: масса кузова экипажа 25,0 т, масса тележки с магнитами 3,75 т, коэффициенты жесткости и вязкости элементов рессорного подвешивания в вертикальном и поперечном направлениях 200 кН/м и 20 кН·с/м, соответственно.

Ширина контуров, соответствующих I варианту их размещения на путевой структуре, принята равной 0,2 м. Для II и III варианта ширина контуров принималась одинаковой и равной 0,3 м, а диаметр прутков контуров для всех случаев – 0,03 м. Ширина соленоидов всех магнитов принята равной 0,5 м, а их длина – 1,2 м. Расстояние между путевыми контурами в продольном направлении принять равным 0,1 м для I варианта и 1,1 м для II и III вариантов при длине их, равной 1,0 м, а в поперечном направлении 0,2 м для I варианта и 0,1 м для II и III вариантов.

Эти исходные данные для контуров и соленоидов были получены путем подбора их рациональных значений, при которых имеет место устойчивое левитационное движение транспортного средства при необходимом для обеспечения левитации значении намагничи-

вающей силы в диапазоне скоростей 30 и 100 м/с.

Результаты проведенных расчетов показали, что для всех рассмотренных вариантов имеет место левитационное движение экипажей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры, причем высота левитации тележек экипажа также как и углы галопирования и виляния кузова и тележек экипажей, практически не зависят от кривизны пути. Их значения быстро затухают вследствие возмущений, обусловленных начальными значениями перемещений твердых тел.

На кривизну пути реагируют перемещения бокового откоса, боковой качки и левитационные зазоры между сверхпроводящими магнитами, соответствующими левой и правой сторонам экипажа, и путевой структурой. Поэтому для оценки левитационного движения различных вариантов транспортных систем приведем экстремальные значения этих величин и значений намагничивающих сил, обеспечивающих левитацию экипажа.

Так, для I-го варианта выбранных параметров путевых контуров при значении намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов, равной $5,0 \cdot 10^5$ А витков, получены следующие экстремальные значения оцениваемых величин:

а) скорость движения 30 м/с ;

высота левитации сверхпроводящих магнитов над путевыми контурами $\Delta_j = 0,106...0,140$ м; перемещения бокового откоса кузова и тележек y_k, y_j ($i=1, 2$) (экстремальные их значения получены в круговой кривой) равны, соответственно, 0,053 м и 0,021 м; угловые изменения бокового откоса кузова и тележек θ_k и θ_i ($i=1, 2$) равны 0,0135 и 0,0046 рад; ускорение кузова в вертикальном и поперечном направлениях $\ddot{z}_k = 0,07$ м/с²; $\ddot{y}_k = 0,95$ м/с²; значения поперечных электродинамических сил, действующих на один магнит, $F_S = 41,8$ кН ;

б) скорость движения 100 м/с ;

$\Delta_j = 0,186...0,192$ м ; $y_k = -0,033$ м ; $y_i = -0,017$ м ; $\theta_k = -0,007$ рад; $\theta_i = -0,003$ рад; $\ddot{z}_k = 0,01$ м/с²; $\ddot{y}_k = 0,3$ м/с²; $F_S = 83$ кН .

Для II-го варианта параметров путевых контуров при значении намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов $6,7 \cdot 10^5$ А витков получены следующие значе-

ния величин, принятых для оценки левитационного движения экипажа:

а) скорость 30 м/с;

$$\Delta_j = 0,092...0,119 \text{ м}; y_k = 0,052 \text{ м}; y_i = 0,01 \text{ м}; \\ \theta_k = 0,018 \text{ рад}; \theta_i = 0,0115 \text{ рад}; \ddot{z}_k = -0,012 \text{ м/с}^2; \\ \ddot{y}_k = -0,87 \text{ м/с}^2; F_S = 48 \text{ кН};$$

б) скорость 100 м/с;

$$\Delta_j = 0,197...0,203 \text{ м}; y_k = -0,0145 \text{ м}; \\ y_i = -0,0024 \text{ м}; \theta_k = -0,052 \text{ рад}; \theta_i = -0,023 \text{ рад}; \\ \ddot{z}_k = 0,005 \text{ м/с}^2; \ddot{y}_k = 0,2 \text{ м/с}^2; F_S = 38 \text{ кН}.$$

Для III-го варианта параметров путевых контуров при значении намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов $7 \cdot 10^5$ А витков получены следующие значения величин, принятых для оценки левитационного движения транспортного средства:

а) скорость 30 м/с;

$$\Delta_j = 0,112...0,147 \text{ м}; y_k = 0,056 \text{ м}; y_i = 0,0094 \text{ м}; \\ \theta_k = 0,022 \text{ рад}; \theta_i = 0,013 \text{ рад}; \ddot{z}_k = 0,012 \text{ м/с}^2; \\ \ddot{y}_k = -0,87 \text{ м/с}^2; F_S = 75 \text{ кН};$$

б) скорость 100 м/с;

$$\Delta_j = 0,213...0,233 \text{ м}; y_k = -0,027 \text{ м}; \\ y_i = -0,0027 \text{ м}; \theta_k = -0,0123 \text{ рад}; \theta_i = -0,01 \text{ рад}; \\ \ddot{z}_k = 0,02 \text{ м/с}^2; \ddot{y}_k = 0,28 \text{ м/с}^2; F_S = 60 \text{ кН}.$$

Т.к. для II и III вариантов рассматривался случай, когда ширина путевых контуров была равна 0,3 м, оценим левитационное движение транспортного средства при этом значении путевого контура, но примем расстояние в продольном направлении между путевыми контурами равным 0,1 м (вариант Ia). Приведем также для этого случая принятые показатели, характеризующие левитационные качества экипажа при значении намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов $4,30 \cdot 10^5$ А витков:

а) скорость 30 м/с;

$$\Delta_j = 0,104...0,132 \text{ м}; y_k = 0,051 \text{ м}; y_i = 0,0095 \text{ м}; \\ \theta_k = 0,0118 \text{ рад}; \theta_i = 0,0115 \text{ рад}; \ddot{z}_k = 0,05 \text{ м/с}^2; \\ \ddot{y}_k = -0,99 \text{ м/с}^2; F_S = 59 \text{ кН};$$

б) скорость 100 м/с;

$$\Delta_j = 0,176...0,187 \text{ м}; y_k = -0,022 \text{ м}; \\ y_i = -0,004 \text{ м}; \theta_k = -0,0084 \text{ рад}; \\ \theta_i = -0,0048 \text{ рад}; \ddot{z}_k = 0,05 \text{ м/с}^2; \ddot{y}_k = 0,2 \text{ м/с}^2; \\ F_S = 32 \text{ кН}.$$

Следует отметить, что транспортную систему с четырьмя полосами путевых контуров, в которой расстояние в продольном направлении составляет 0,1 м, можно упростить путем уменьшения ширины контуров до значения, равного 0,15 м, и увеличения зазора между контурами в поперечном направлении до 0,27 м. Однако в этом случае намагничивающая сила в соленоидах сверхпроводящих магнитов составляет 585 кН при значении $\Delta_j = 0,131$ м при $v = 30$ м/с и $\Delta_j = 0,178$ м при $v = 100$ м/с.

Таким образом, на основании приведенных результатов расчетов можно заключить, что упрощение путевой структуры за счет уменьшения расхода материала на токопроводящие контуры связано с увеличением намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов.

Кроме того, следует подчеркнуть, что уменьшения намагничивающей силы можно достигнуть за счет чередования знаков токов в соленоидах магнитов, расположенных на каждой из сторон транспортного средства при небольшом продольном расстоянии между магнитами. Это видно из результатов расчетов, приведенных в работе [1], где для системы с четырьмя полосами путевых контуров шириной 0,30 м и расстоянием в продольном и поперечном направлениях, равном 0,1 м. при значении намагничивающей силы, равной $3,8 \cdot 10^5$ А витков, получены примерно такие же значения левитационных зазоров, как и для системы, в которой токи в соленоидах магнитов приняты одинакового направления

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электродинамическая транспортная система с плоской путевой структурой [Текст] / А. А. Зевин и др. // Техническая механика. – 2004. – № 2. – С. 120-122.
2. Дзензерский, В. А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах [Текст] / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко. – Д., 2003. – 231 с.
3. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст] / Г. М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1969. – 536 с.

Поступила в редколлегию 01.02.2010.

Принята к печати 09.02.2010.