

## КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ РАЗГОНЕ

Приведены результаты оценки пространственных колебаний электродинамического транспортного средства при равноускоренном движении вдоль U-образной путевой структуры прямолинейного и криволинейного очертания в плане. Показано, что при рациональном выборе основных параметров экипажа и путевой структуры обеспечивается устойчивое движение экипажа при малых скоростях на колесах шасси и при левитации.

Results of estimation of the electrodynamic vehicle spatial vibrations at accelerated motion along the U-shaped track structure with linear and curvilinear in-plan shape are considered. It is shown that the rational choice of the main vehicle and track parameters provides stable vehicle motion at the low speed both on landing wheels and at the levitation.

В проведенных ранее исследованиях [1 – 3] показано, что в случае рационального выбора параметров экипажа электродинамической транспортной системы и U-образной путевой структуры (расчетная схема представлена в работах [2, 3]) обеспечивается устойчивое равномерное движение экипажа как на колесах шасси при малых скоростях, так и при его левитационном движении в широком диапазоне скоростей.

Целью данной работы является оценка колебаний и устойчивости движения экипажа не только при равномерном движении, но и при разгоне как в диапазоне скоростей, при которых имеет место качение на колесах шасси, так и при скоростях, соответствующих левитации.

В настоящей работе рассматриваются пространственные колебания экипажа, движущегося вдоль U-образной путевой структуры прямолинейного и криволинейного очертания в плане, при равноускоренном движении в случаях, когда учитывается действие не только электродинамических сил, но и сил взаимодействия колес шасси с путевой структурой в вертикальном и поперечном направлениях.

При математическом моделировании движения электродинамической транспортной системы экипаж вместе с путевой структурой представлен электромеханической системой, состоящей из следующих твердых тел: корпус экипажа, две тележки, к каждой из которых прикреплены на вертикальных стенках по восемь сверхпроводящих магнитов и по четыре независимо вращающихся колеса шасси как в вертикальной, так и в поперечной плоскостях, а также две полосы путевых контуров, прикрепленные к вертикальным стенкам путевой структуры.

Корпус экипажа опирается на тележки посредством упруго-диссипативных элементов в вертикальном и поперечном направлениях, между путевой структурой и колесами, ограничивающими перемещения тележек в поперечном направлении, имеется зазор, т.е. эти колеса взаимодействуют с путевой структурой только после его выбора.

При исследовании пространственных колебаний экипажа в качестве обобщенных координат выбраны поступательные вертикальные  $Z$  и поперечные  $Y$  перемещения твердых тел системы, их угловые перемещения  $\theta, \varphi, \psi$ , соответствующие боковой качке, галопированию и вилянию, а также токи в путевых контурах.

Математическая модель движения исследуемого экипажа вдоль путевой структуры представлена в виде связанных дифференциальных уравнений Лагранжа, описывающих перемещения твердых тел системы, и уравнений токов в токопроводящих контурах путевой структуры. Отличительной особенностью этих уравнений по сравнению с уравнениями, приведенными в работах [2, 3], является то, что в них учтено действие не только электродинамических сил, но и сил, обусловленных упругостью колес шасси при их контакте с путевой структурой, а также сил псевдоскольжения, зависящих от перемещений колес вследствие чистого качения и движения с учетом проскальзываний [4]. При определении сил псевдоскольжения учитывается нелинейная зависимость сил от значений относительных проскальзываний колес [5]. Так как подробная математическая модель движения экипажа является очень громоздкой, приведем ее в общем виде и покажем особенности моделирования сил псевдоскольжения, действующих на колеса шасси экипажа.

Уравнения состояния транспортной системы (движущийся экипаж и перемещение токов в токопроводящих контурах путевой структуры) получим 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:

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

где

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

$$\Phi_{qv} = \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_v}; \quad Q_v = f(F_L, F_S);$$

$Q_v$  – обобщенные силы, являющиеся функциями электродинамических сил  $F_L, F_S$ , действующих на экипаж в поперечных и вертикальных плоскостях вдоль нормалей и касательных к поверхностям сверхпроводящих магнитов;  $N$  – число степеней свободы;  $L = |L_{lk}|$  – матрица коэффициентов самоиндукции ( $l=k$ ) и взаимной индукции ( $l \neq k$ ) 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;  $T, \Pi, \Phi$  – кинетическая, потенциальная энергии и функция рассеяния системы.

Величины  $f_k$  определяются из выражения:

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

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  $F_{Lm}$ ,  $F_{Sm}$  определяются из выражений:

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

$$F_{Sm} = i_m^c \sum_{k=1}^p i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial \delta_m},$$

где  $\Delta_m$  и  $\delta_m$  – значения зазоров (смещений)  $m$ -х сверхпроводящих магнитов относительно контуров путевой структуры в вертикальном и поперечном направлениях;  $p$  – число учитываемых контуров.

Для оценки сил псевдоскольжения определим безразмерные характеристики проскальзывания колес в продольном и поперечном направлениях  $\varepsilon_{xi}$ ,  $\varepsilon_{yi}$ , а также значение полного проскальзывания  $\varepsilon_i$  [4, 5].

$$\varepsilon_{xi} = -(-1)^i (\dot{\psi}_j d_j / v + \frac{\mu \cdot y_i}{r}),$$

$$\varepsilon_{yi} = \frac{\dot{y}_i}{v} - \psi_j,$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_{xi}^2 + \varepsilon_{yi}^2},$$

где  $y_i$ ,  $\psi_j$  – обобщенные координаты, соответствующие боковому отношению  $i$ -го колеса и вилянию  $j$ -ой тележки;  $2 d_j$  – расстояние между колесами в поперечном направлении;  $v$  – скорость движения;  $i$  и  $j$  – индексы для обозначения номеров колес и тележек, значения которых соответствуют для  $j = 1$   $i = 1, 2, 3, 4$ ; для  $j = 2$   $i = 5, 6, 7, 8$ ;  $\mu$  – коничность поверхности катания колес;  $r$  – радиус колеса шасси.

Считаем, что на участке, соответствующем  $|\varepsilon_i| \leq 0,01$ , силы псевдоскольжения  $W_i$  изменяются по линейному закону  $W_i = -f_0 \varepsilon_i$  ( $f_0$  – коэффициент псевдоскольжения), а при  $|\varepsilon_i| > 0,01$  значения  $W_i = -0,01 f_0 \text{sign } \varepsilon_i$  не изменяются с увеличением абсолютной величины  $\varepsilon_i$ . Тогда функцию  $W_i$  в соответствии с работой [6] можно аппроксимировать выражением

$$W_i = -f_0 \varepsilon_i + \frac{1}{2} f_0 \left[ \varepsilon_i - C_{ai} + \sqrt{(\varepsilon_i - C_{ai})^2 + 0,00001} \right].$$

Здесь  $C_{ai} = 0,01 \frac{P_i}{P_{\tilde{m}}}$ , где  $P_i$  – сумма динамической и статической нагрузок на  $i$ -е колесо;  $P_{\tilde{m}}$  – статическая нагрузка на колесо.

Составляющие сил  $W_i$  в продольном и поперечном направлениях  $X_i$  и  $Y_i$  определим из выражений:

$$X_i = W_i \frac{\varepsilon_{xi}}{\varepsilon_i}; \quad Y_i = W_i \frac{\varepsilon_{yi}}{\varepsilon_i}.$$

Аналогичным образом определяются силы псевдоскольжения для колес, контактирующих с вертикальными стенками путевой структуры при выборе зазора между поверхностями колес и вертикальными стенками.

По решению полученной системы уравнений (1, 2) будем оценивать динамические качества экипажа в случаях, когда имеет место качение колес шасси и при левитационном движении экипажа.

Оценку пространственных колебаний экипажа проведем по значениям перемещений корпуса и тележек, значениям электродинамических сил, действующих на магниты и боковые стенки путевой структуры, сил, действующих на колеса шасси в вертикальном и поперечном направлениях, ускорений корпуса, частот колебаний корпуса и тележек.

Для расчетов примем следующие значения основных параметров исследуемой системы: масса корпуса и тележек соответственно 25 т и 3,75 т, намагничивающая сила в соленоидах сверхпроводящих магнитов  $3 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$  А·витков, зазоры между путевыми магнитами и путевыми контурами в поперечном направлении 0,075 – 0,125 м, зазоры между поверхностями катания колес и боковыми стенками путевой структуры 0,02 – 0,10 м, зазоры между путевыми контурами в продольном направлении 0,05 м, диаметр прутков путевых контуров 0,015 м, высота путевых контуров и соленоидов магнитов 0,3 и 0,5 м соответственно, длина путевых контуров и соленоидов 1,0 и 1,2 м, жесткость колес в вертикальном и поперечном направлениях 1000 кН/м. Для достижения по возможности больших значений электродинамических сил направление запитанных в соленоиды токов приняты чередующимися вдоль продольной оси экипажа.

Оценка динамических качеств экипажа проводилась для случая его движения по участку путевой структуры следующего очертания в плане: прямолинейный отрезок протяженностью 150 м, участок входной переходной кривой – 500 м, круговая кривая радиусом  $R = 8000$  м протяженностью 150 м, выходная переходная кривая – 400 м, прямолинейный участок пути – 800 м. В круговой кривой было принято, что угол наклона путевой структуры в поперечной плоскости в сторону центра кривизны  $\theta_h = 0,1$  рад. В переходных кривых значение угла наклона изменялось от 0 в прямолинейном участке путевой структуры до 0,1 рад в круговой кривой по линейной зависимости от кривизны пути. Кривизна пути в переходных кривых определялась в соответствии с работой [7] и изменялась от нуля до  $1/R$  по синусоидальной зависимости.

Рассмотрим некоторые из результатов расчетов, полученных при следующих значениях основных параметров, определяющих динамические качества экипажа: намагничивающая сила в соленоидах магнитов равна  $3 \cdot 10^5$  А·витков; зазор между сверхпроводящими магнитами и путевой структурой равен 0,125 м; зазор между поверхностями катания колес шасси, расположенных в горизонтальной плоскости, и путевой структурой равен 0,1 м; скорость движения  $v = 1-120$  м/с.

Результаты интегрирования связанных дифференциальных уравнений при начальной скорости 1,0 м/с и ускорении  $3,0$  м/с<sup>2</sup> показали, что высота подъема экипажа над путевой структурой быстро увеличивается с увеличением скорости и пройденного пути  $S$  (см. рис. 1) и достигает своего максимального значения при скорости  $\approx 120$  м/с.

При этом корпус перемещается в поперечном направлении с очень малыми амплитудами колебаний. Максимальное значение поперечного пере-

мещения достигается в конце входной переходной кривой и составляет 0,094 м. Тележки периодически перемещаются в пределах поперечного зазора между сверхпроводящими магнитами и путевыми контурами. Амплитуды поперечных перемещений тележек уменьшаются с течением времени (см. рис. 2, где линии 1 соответствуют перемещению корпуса, а линии 2 и 3 – перемещениям тележек в зависимости от пройденного пути  $S$ ).

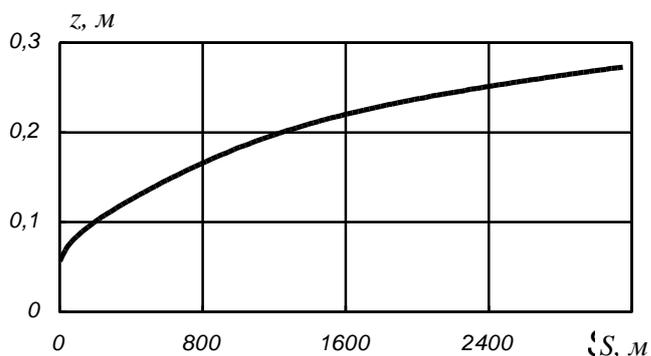


Рис. 1

Такой характер полученных зависимостей вполне объясним, так как экипаж проходит участок пути круговой кривой, соответствующий  $S = 650 - 800$  м, где корпус в значительной большей степени реагирует на действие центробежной силы, а также скатывающейся составляющей от силы веса из-за наклона поверхности путевой структуры в кривой и из-за относительно мягкой подвески корпуса в поперечном направлении.

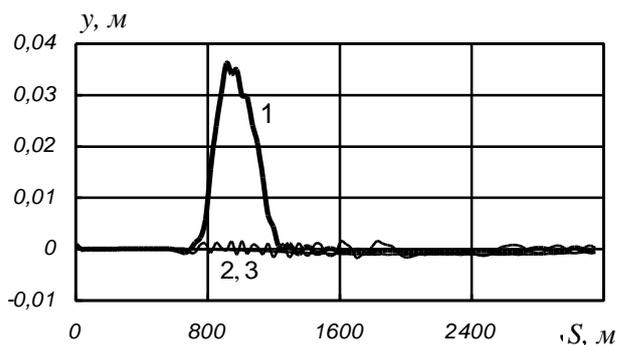


Рис. 2

Угловые перемещения боковой качки и виляния корпуса и тележек, так же как и перемещения бокового отбоя, быстро затухают на прямолинейном участке пути. В криволинейном участке пути перемещения боковой качки корпуса и в меньшей степени тележек интенсивно увеличиваются из-за действия центробежной силы и скатывающихся составляющих сил веса вследствие наклона путевой структуры в кривой. При выходе экипажа из кривой в системе возникают интенсивные колебания боковой качки (см. рис. 3, где приняты такие же обозначения, как и на рис. 2). Однако в прямолинейном участке пути возмущенные колебания, амплитуды которых не превышают 0,01 рад, затухают, причем как видно из рис. 3, значительно быстрее затухают колебания корпуса, чем колебания тележек.

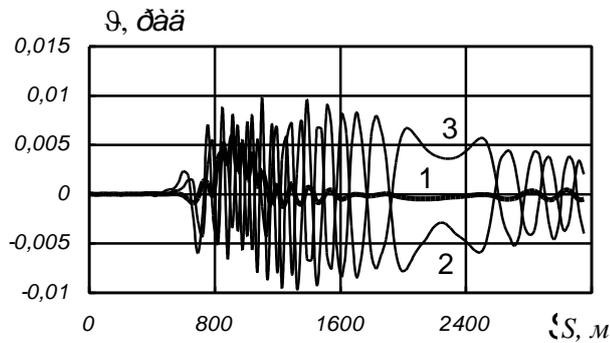


Рис. 3

В криволинейном участке пути углы виляния изменяются незначительно, но после выхода экипажа из кривой в системе возникают интенсивные колебания виляния. Но эти возмущенные колебания весьма незначительны (углы виляния корпуса очень небольшие, не превышающие 0,002 рад) и быстро затухают (см. рис. 4, где приняты те же обозначения, что и на рис. 2) Аналогичный характер изменения имеют углы галопирования.

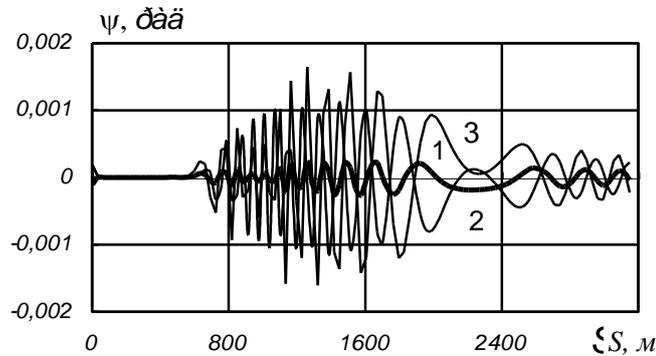


Рис. 4

Частоты колебаний системы увеличиваются с увеличением скорости, что вполне объяснимо, так как скорость движения экипажа увеличивается, а контуры путевой структуры имеют постоянные геометрические характеристики.

Криволинейный участок пути является также интенсивным возмущающим фактором для поперечных ускорений корпуса (см. рис. 5, где линии 1 и 2 относятся соответственно к поперечному и вертикальному ускорениям корпуса в зависимости от пройденного пути  $S$ ). Однако эти ускорения также как и вертикальные ускорения корпуса затухают на прямолинейном участке пути и не превышают значений, равных соответственно 0,6 и 0,05  $m/c^2$ . В соответствии с нормами, принятыми для железных дорог России, такие ускорения являются вполне приемлемыми по показателям, характеризующим комфорт пассажиров.

Результаты расчетов показали, что при движении экипажа с ускорением 1,0  $m/c^2$  также имеют место затухающие колебания, причем с выходом экипажа из криволинейного участка пути появляются колебания с последующим их затуханием. При этом максимальные значения поперечных ускорений корпуса достигают  $\approx 1,1 m/c^2$ .

При прохождении криволинейного участка путевой структуры со скоростями в диапазоне  $v = 80 - 100$  м/с также имели место колебания, связанные с выходом экипажа из кривой. Однако колебания по всем координатам с течением времени затухают, и значения поперечных и вертикальных ускорений корпуса при равноускоренном движении экипажа вдоль оси пути с ускорениями 1,0 и 3,0 м/с<sup>2</sup> не превышают 0,6 и 0,2 м/с<sup>2</sup> соответственно.

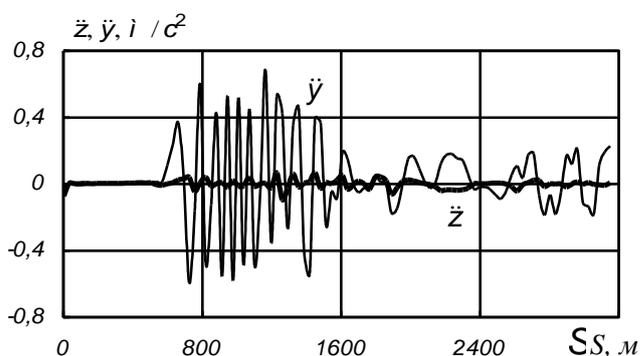


Рис. 5

Таким образом, полученные результаты расчетов позволяют заключить, что при рациональном выборе основных параметров путевой структуры и экипажа равноускоренное движение экипажа устойчиво в прямолинейных и криволинейных участках пути в диапазонах небольших скоростей, при которых движение реализуется за счет качения экипажа на колесах шасси, и при значениях скоростей, для которых имеет место его левитация.

1. Радченко Н.А., Звонарева О.В., Малый В.В. Оценка колебаний электродинамических транспортных средств при небольших скоростях движения // Техническая механика. – 2007. – № 2. – С.138 – 141.
2. Дзензерский В.А., Радченко Н.А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах. – Днепропетровск, 2003. – 231 с.
3. Дзензерский В.А., Радченко Н.А., Кузнецова Т.И., Филоненко Л.А. Исследование колебаний, стационарных режимов и устойчивости движения различных типов электродинамических транспортных систем // Техническая механика. – 2003. – № 1. – С. 145 – 153.
4. Лазарян В.А. Динамика транспортных средств. – Киев: Наук. думка, 1985. – 526 с.
5. Радченко Н.А. Криволинейное движение рельсовых транспортных средств. – Киев: Наук. думка, 1988. – 213 с.
6. Базилевич Ю.Н. Аппроксимация кусочно-линейных функций для расчетов на ЦВМ // Динамика механических систем. – Киев: Наук. думка. – 1983. – С. 97 – 102.
7. Шахуняц Г.М. Железнодорожный путь. – М: Транспорт, 1969. – 536 с.

Институт транспортных систем  
и технологий НАН Украины

Получено 11.03.08,  
в окончательном варианте 15.04.08

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск