

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

## ДИНАМИКА СЦЕПОВ ТРЕХ СОЧЛЕНЕННИХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭКИПАЖЕЙ

Оцінені коливання і стійкість левітаційного руху різних варіантів конструктивної реалізації зчепу трьох зчленованих електродинамічних екіпажів у прямолінійних і криволінійних ділянках шляхової структури. Визначені основні параметри, що відповідають стійкому руху зчепу.

Оценены колебания и устойчивость левитационного движения различных вариантов конструктивной реализации сцепа трех сочлененных электродинамических экипажей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры. Определены основные параметры, соответствующие устойчивому движению сцепа.

Oscillations and stability of levitation-type movement of different constructive options of three articulated electro-dynamic vehicles on the straight and curved sections of the track structure have been investigated. The principal system parameters corresponding to stable movement of the train have been determined.

В ранее проведенных исследованиях были показаны возможность и условия реализации устойчивого левитационного движения одиночных электродинамических транспортных средств в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры [1–3]. Представляет интерес оценка колебания и устойчивости левитационного движения сцепа, состоящего из нескольких, в частности, из трех сочлененных электродинамических транспортных экипажей вдоль путевой структуры П-образного очертания в профиле. Это обусловлено проводимыми в Японии опытными исследованиями динамики трех сочлененных экипажей вдоль U-образной путевой структуры, а также полученными результатами теоретических исследований сотрудниками Института транспортных систем и технологий НАН Украины для сочлененного сцепа двух экипажей вдоль П-образной путевой структуры. Для этого сцепа оказалось, что его левитационное движение может быть неустойчивым вследствие интенсивных колебаний галопирования последней тележки.

Характерной особенностью конструктивной схемы рассматриваемого сцепа является то, что опирание крайних экипажей осуществляется на крайние тележки посредством четырех упругодиссипативных элементов, а среднего экипажа – через два упруго-диссипативных элемента (рис. 1). Вследствие этого может иметь место неравномерная просадка корпусов экипажей и неравномерное распределение углов их галопирования.

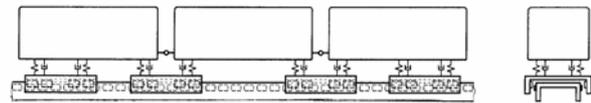


Рис. 1

Для устранения этих неравномерностей или их значительного уменьшения предусматривалось увеличение жесткостей и вязкостей упругодиссипативных элементов, относящихся к средним тележкам, по сравнению со значениями этих параметров для крайних тележек и смещение на величину  $\Delta_0$  центра тяжести корпусов крайних экипажей в сторону крайних тележек.

Рассматриваемый объект исследований представляет собой электромеханическую систему, состоящую из семи твердых тел: трех корпусов экипажей и четырех тележек, к вертикальным стенкам которых прикреплены сверхпроводящие магниты, и токопроводящих прямоугольных короткозамкнутых контуров, прикрепленных к вертикальным стенкам П-образной путевой структуры.

Во время поступательного движения сцепа токи от сверхпроводящих магнитов индуктируются в путевых контурах. Благодаря взаимодействию полей магнитов и контуров создаются силы отталкивания между ними, что при скоростях  $v = 25 \dots 30$  м/с приводит к левитации экипажей сцепа.

Будем рассматривать равномерное движение сцепа экипажей вдоль путевой структуры, не принимая во внимание продольные колебания твердых тел системы.

За обобщенные координаты примем линейные перемещения твердых тел в поперечном и вертикальном направлениях  $y, z$  и их угловые перемещения относительно продольных, поперечных и вертикальных осей  $\theta, \psi, \varphi$  [1].

Уравнения движения исследуемых транспортных систем будем получать с помощью уравнений Лагранжа второго рода, описывающих движение экипажа,

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

и уравнений токов

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

где

$$D_{qv} = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial q_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v}, \quad \Pi_{qv} = \frac{\partial \Pi}{\partial q_v},$$

$$\Phi_{qv} = \frac{\partial \Phi}{\partial q_v}, \quad (3)$$

$Q_v$  – обобщенные силы, являющиеся функциями 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;  $l$  – 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)–(3)  $D_{qv}, \Pi_{qv}, \Phi_{qv}$  – дифференциальные операторы, соответствующие координатам ( $v=1,2,\dots,N$ );  $T, \Pi, \Phi$  – кинетическая, потенциальная и функция рассеяния системы.

Величины  $f_k$  определяются выражением:

$$f_k = - \sum_{m=1}^n i_m^c \frac{\partial M_{km}}{\partial t}, \quad (4)$$

где  $M_{km}$  – коэффициенты взаимной индукции между  $m$ -ми поездными магнитами и  $k$ -ми путевыми контурами;  $n$  – число поездных сверхпроводящих магнитов;  $i_m^c$  – ток в  $m$ -м сверхпроводящем магните.

Электродинамические силы  $F_{Lm}, F_{sm}$  взаимодействия сверхпроводящих магнитов с путевыми контурами вдоль нормали и касательной в поперечной плоскости определялись из выражений:

$$F_{Lm} = i_m^c \sum_{k=1}^p i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial \Delta_m}; \quad (5)$$

$$F_{sm} = i_m^c \sum_{k=1}^p i_k \frac{\partial M}{\partial \delta_m}, \quad (6)$$

где  $\Delta_m$  и  $\delta_m$  – значения смещений  $m$ -го сверхпроводящего магнита относительно токопроводящих контуров путевой структуры в поперечном и вертикальном направлениях;  $p$  – число учитываемых путевых контуров.

Интегрируя системы связанных уравнений (1), (2), оценим левитационное движение экипажей.

Будем оценивать колебания и устойчивость движения сцепов экипажей при их движении вдоль П-образной путевой структуры в профиле, имеющей следующие очертания в плане: прямоугольный участок путевой структуры протяженностью 150 м, входная переходная кривая длиной 500 м, круговая кривая радиусом  $R=8000$  м длиной 150 м, выходная переходная кривая – 400 м и прямая – 300 м.

Считаем, что поверхность путевой структуры в круговой кривой наклонена к горизонтальной плоскости в сторону центра кривизны на угол  $\theta_h = 0,1$  рад, а в переходных кривых значение этого угла переменное и изменяется пропорционально кривизне пути, определяемой по синусоидальной зависимости от пройденного пути [4].

Для расчетов были приняты следующие основные параметры экипажей и путевой структуры: массы корпуса и тележки соответственно равны 25 и 3,75 т значения упругих и диссипативных элементов равны  $2,0 \cdot 10^3$  кН/м, и  $2,0 \cdot 10^2$  кН·с/м, для крайних тележек и 400 кН/м и 30 кН·с/м для средних тележек. Диаметр прутков токопроводящих прямоугольных контуров 0,03 м, вертикальные и продольные размеры соленоидов сверхпроводящих магнитов  $0,5 \times 1,0$  м, а токопроводящих контуров  $0,4 \times 0,8$  м.

Рассматривались следующие варианты:

- на всех тележках закреплены по 8 сверхпроводящих магнита;
- на крайних тележках установлены по 4 сверхпроводящих магнита, а на средних – по 8;
- все тележки оборудованы 6-ю сверхпроводящими магнитами.

Оценка левитационного движения исследуемого сцепа проводилась в диапазоне значений скоростей 30...100 м/с в прямолинейных и криволинейных участках пути (в круговых и переходных кривых) по значениям перемещений твердых тел системы (корпусов и тележек), по поперечным и вертикальным ускорениям корпусов экипажей и левитационным зазорам между сверхпроводящими магнитами и путевой структурой. Предварительно находились приемлемые из условия устойчивости движения основные параметры, от которых зависят вышеупомянутые критерии, принятые для оценки динамики сцепа.

Рассмотрим полученные результаты интегрирования уравнений вида (1), (2) для первого варианта конструктивной схемы сцепа, соответствующего установке на всех тележках по 8 сверхпроводящих магнитов.

Так, для скорости движения  $v = 100$  м/с значений смещений центров тяжести крайних экипажей  $\Delta_0 = 0,955$  м и намагничивающей силы в соленоидах магнитов  $2,8 \cdot 10^3$  Ампер-витков имеет место устойчивое левитационное движение всех экипажей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры. Высота левитации центров тяжести тележек  $z_T$  соответствует значениям примерно равным 0,163...0,170 м, причем на их значения практически не оказывает влияние кривизна путевой структуры. Углы галопирования крайних корпусов экипажей и тележек могут в установившемся режиме значительно отличаться. Так, для корпуса первого экипажа  $\varphi_{K1} = -0,013$  рад, а для корпуса третьего экипажа  $\varphi_{K3} = 0,013$  рад, хотя  $\varphi_{K2} = 0$ ; для первой и четвертой тележек углы соответственно равны  $\varphi_{T1} = -0,002$  и  $\varphi_{T4} = 0,002$  рад, а для второй и третьей тележек  $\varphi_{T2} = -0,0075$  и  $\varphi_{T3} = 0,0075$  рад. Кривизна пути также практически не оказывает влияния на их значения.

Значения боковых отсосов корпусов и тележек существенно зависят от кривизны путевой структуры и изменяются в установившихся режимах движения соответственно в интервалах  $y_K \approx 0...-0,014$  м,  $y_T \approx 0...-0,018$  м, что наглядно видно из графиков зависимости этих величин от пройденного пути  $S$  (рис. 2 и 3), где линиями 1–3 – обозначены перемещения соответствующих номеров корпусов и 1–4 – аналогичные перемещения тележек.

Характер изменения углов боковой качки корпусов и тележек аналогичен изменению бо-

кового отношения. Их значения в установившихся режимах соответствуют  $\theta_K \approx 0...-0,037$ ,  $\theta_T \approx 0...-0,013$  рад. Небольшие значения имеют также углы виляния корпусов и тележек, зависящих от их номера по ходу движения и кривизны путевой структуры  $\psi_{K1} \approx 0...0,0038$  рад,  $\psi_{K2} \approx 0$ ,  $\psi_{K3} \approx 0...0,0040$  рад,  $\psi_{T1} \approx 0...-0,00006$  рад,  $\psi_{T4} \approx 0...0,00006$  рад,  $\psi_{T2} \approx 0...-0,00033$  рад,  $\psi_{T3} \approx 0...0,00033$  рад.

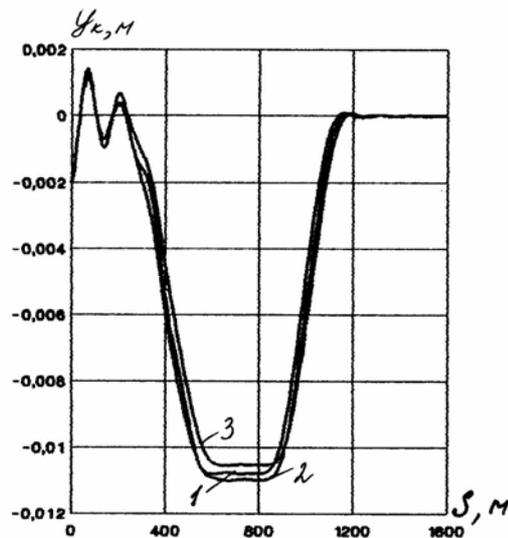


Рис. 2

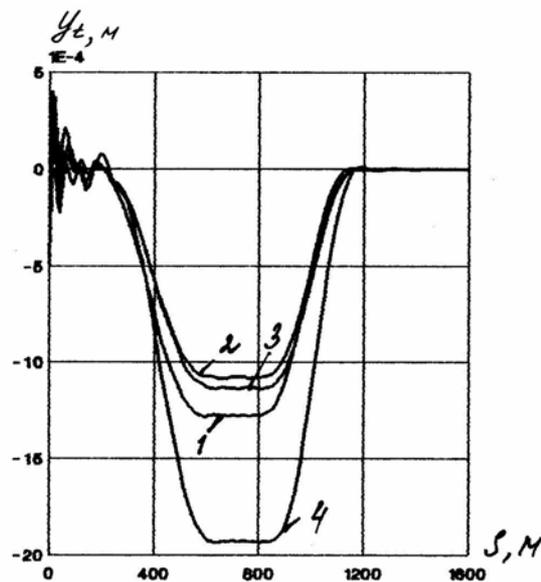


Рис. 3

Левитационные зазоры между сверхпроводящими магнитами и путевыми контурами изменяются, как показали результаты расчетов, в диапазонах  $\delta_j = 0,148...0,19$  м ( $j = 1, 2, \dots, 32$  – номера магнитов) в вертикальном направлении и  $\Delta_j = 0,0747...0,0763$  м в поперечном направлении.

Максимальные значения ускорений корпусов мало отличаются для различных экипажей и в вертикальном направлении практически не зависят от кривизны путевой структуры  $\ddot{z}_K \approx 0,4 \text{ м/с}^2$ , а в поперечном направлении  $\ddot{y}_K \approx 0$  для установившегося режима в прямолинейном участке пути и  $\ddot{y}_K \approx 0,28 \text{ м/с}^2$  для круговой кривой; их значения не превышают нормативных принятых для железных дорог России.

Для скорости  $v \approx 30 \text{ м/с}$  I варианта конструктивной схемы сцепа также имеет место устойчивое левитационное движение, причем значения обобщенных координат, ускорений корпусов и левитационных зазоров изменяются в интервалах:

$$\begin{aligned} z_{Ti} &= 0,141 \dots 0,152 \text{ м } (i=1,2,3,4), \\ \varphi_{km} &= -0,013 \dots 0,013 \text{ рад, } (m=1,2,3), \\ \varphi_{Ti} &= -0,009 \dots 0,009 \text{ рад, } y_{km} = 0 \dots 0,037 \text{ м,} \\ y_{Ti} &= 0 \dots 0,0082 \text{ м, } \theta_{km} = 0 \dots 0,0115 \text{ рад,} \\ \theta_{Ti} &= -0,0014 \dots 0,0031 \text{ рад, } \psi_{km} = -0,0014 \dots 0,0014 \text{ рад,} \\ \ddot{z}_{Rm} &= -2,0 \dots 1,8 \text{ м/с}^2, \quad \ddot{y}_{km} = 0 \dots 1,25 \text{ м/с}^2, \\ \delta_j &= 0,11 \dots 0,15 \text{ м, } \Delta_j = 0,0655 \dots 0,0845 \text{ м.} \end{aligned}$$

Как видно из этих результатов, максимальные значения ускорений корпусов могут превышать нормативные, принятые для железных дорог России, которые равны  $1,0 \text{ м/с}^2$  в поперечном направлении и  $0,5 \text{ м/с}^2$  в вертикальном направлении.

Оценим левитационное движение сочлененного сцепа 3-х экипажей для второго варианта конструктивной схемы, соответствующего числу сверхпроводящих магнитов для крайних тележек, равному четырем и для средних – восьми.

Как показали результаты проведенных расчетов при скорости  $100 \text{ м/с}$ , значения  $\Delta_0 = 2,5 \text{ м}$  и намагничивающей силы в соленоидах магнитов равной  $3,6 \cdot 10^5 \text{ А·витков}$ , движение сцепа устойчиво, причем значения ускорений корпуса не превышают нормативных величин. Однако, левитационные зазоры в вертикальном направлении для крайних и средних магнитов существенно отличаются и изменяются соответственно в диапазонах  $0,13 \dots 0,14$  и  $0,19 \dots 0,195 \text{ м}$ . Также в значительной мере отличаются углы галопирования крайних (первого и третьего)

корпусов экипажей и в установившемся режиме соответственно равны  $-0,024$  и  $+0,024 \text{ рад}$ . В остальном результаты качественно не отличаются от результатов расчетов для первого варианта конструктивной схемы.

Для скорости  $30 \text{ м/с}$  также имеет место устойчивое левитационное движение с небольшими перемещениями твердых тел системы и приемлемыми левитационными зазорами, но максимальные значения ускорений корпусов в вертикальном и поперечном направлениях больше, чем при скорости  $100 \text{ м/с}$ , и составляют соответственно  $1,8$  и  $1,05 \text{ м/с}^2$ .

Для третьего варианта конструктивной схемы сцепа при скорости  $100 \text{ м/с}$   $\Delta_0 = 1,5 \text{ м}$  и значении намагничивающей силы в соленоидах магнитов равном  $4,8 \cdot 10^5 \text{ А·витков}$  левитационное движение также устойчиво, причем ускорения корпусов экипажей в вертикальном и поперечном направлениях существенно меньше (соответственно  $\leq 0,3$  и  $\leq 0,27 \text{ м/с}^2$ ) предельно допускаемых для железных дорог России. Высота левитации магнитов соответствует  $0,155 \dots 0,17 \text{ м}$ , а качество движения такое же, как и для первого варианта конструктивной схемы сцепа.

Для скорости  $30 \text{ м/с}$  левитационное движение сцепа устойчивого с приемлемыми левитационными зазорами, но ускорения корпусов в вертикальном и поперечном направлениях выше нормативных, их максимальные значения соответственно равны  $1,2$  и  $1,05 \text{ м/с}^2$ . Однако, эти значения уменьшаются с увеличением скорости. Так, при скорости  $50 \text{ м/с}$  ускорения корпусов экипажей не превышают значений  $0,8 \text{ м/с}^2$  в вертикальном направлении  $0,7 \text{ м/с}^2$  в поперечном.

Таким образом, при рациональном выборе основных параметров сцепов сочлененных трех экипажей и путевой структуры реализуется устойчивое левитационное их движение в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры. Однако, при малых значениях скорости  $v \approx 30 \dots 50 \text{ м/с}$  ускорения корпусов превышают нормативные. Учитывая то, что движение при этих скоростях для данного вида транспорта соответствуют, как правило, кратковременным режимам разгона и торможения, то следует ожидать, что движение сцепов должно быть приемлемым из условий комфорта пассажиров.

Отметим также, что движение сцепов, составленных из модульных экипажей без их сочленения при рациональном выборе основных параметров характеризуется, как показали результаты расчетов, более равномерным распределением перемещений корпусов экипажей в вертикальной плоскости без смеще-

ния их центров тяжести и большей скоростью затухания колебаний по всем координатам, чем для сцепов, составленных из сочлененных экипажей. Они также были практичны из условия формирования поездов. Поэтому сцепам из модульных экипажей следует отдать предпочтение по сравнению со сцепами из сочлененных экипажей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дзензерский В. А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко – Д., 2003. – 231 с.

2. Дзензерский В. А. Исследование колебаний, стационарных режимов и устойчивости движения различных типов электродинамических транспортных систем / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко, Т. И. Кузнецова, Л. А. Филоненко // Техническая механика.–2003. – № 1. – С.145–153.
3. Дзензерский В. А. Стационарные режимы и устойчивость движения электродинамической транспортной системы с дискретными путевыми контурами / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко, Т. И. Кузнецова, Л. А. Филоненко // Техническая механика. – 1999. – № 1. – С.84–89.
4. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь. – М: Транспорт, 1969. – 536 с.

Поступила в редколлегию 12.12.2006.