

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И КОЛЕБАНИЯ ЭКИПАЖЕЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЧИСЛЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ

Цель работы – определение возможности использования транспортных систем с различным числом сверхпроводящих магнитов. Методы – теоретические численные. Приводятся результаты теоретических исследований пространственных колебаний экипажей электродинамической транспортной системы при их левитационном движении вдоль плоской путевой структуры прямолинейного и криволинейного очертания в плане в случаях, когда на донных поверхностях тележек крепится различное число сверхпроводящих магнитов, равное 32, 24 и 16, для системы с четырьмя рядами сверхпроводящих магнитов и двумя рядами прямоугольных короткозамкнутых путевых контуров. Значимость и новизна работы обусловлены возможностью использования транспортных систем с уменьшенным числом сверхпроводящих магнитов.

Ціль роботи – визначення можливості використання транспортних систем з різним числом надпровідних магнітів. Методи – теоретичні, числові. Надаються результати теоретичних досліджень просторових коливань екіпажів електродинамічної транспортної системи при їх левітаційному русі вдовж плоскої шляхової структури прямолінійного і криволінійного окреслення в плані в випадках, коли на донних поверхнях візків кріпиться різна кількість надпровідних магнітів, що дорівнює 32, 24 та 16, для системи з чотирма рядами надпровідних магнітів і двома рядами прямокутних, коротко замкнутих шляхових контурів. Значимість і новизна роботи обумовлені можливістю використання транспортних систем зі зменшеним числом надпровідних магнітів.

The work goal is to determine the possibility of using transport systems with a different number of superconducting magnets. Theoretical numerical methods are employed. The results from theoretical studies of 3D vibrations of vehicles of an electrodynamic transport system are presented considering their levitation motions along a plane track structure of straight and curved contours in plan when a different number of superconducting magnets were mounted on a bottom surface of bogies equal to 32, 24 and 16 for the system with four rows of superconducting magnets and two rows of rectangle short-closed tracks contours. The importance and novelty of the study are validated by the possibility of using transport systems with a decreased number of superconducting magnets.

В рассмотренной ранее [1] электродинамической транспортной системе с плоской структурой и двумя полосами путевых контуров предполагается, что на тележках экипажей крепятся по шестнадцать сверхпроводящих магнитов (по восемь на каждой из полос путевых контуров). Это количество магнитов, размещенных в виде четырех полос, является, по мнению авторов, оправданным из условия безопасности движения экипажа при аварийных режимах, обусловленных полным или частичным обесточиванием сверхпроводящих магнитов, нагруженности путевой структуры от действия сверхпроводящих магнитов, устойчивости невозмущенного левитационного движения экипажа в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры. Эта система запатентована в Украине, внесена в базу данных НАН Украины как одна из перспективных конструкций. Целесообразно провести исследования возможностей использования такой транспортной системы с уменьшенным числом сверхпроводящих магнитов, равным восьми или двенадцати (варианты А1 и А2), по сравнению с шестнадцатью на одну тележку.

Для вариантов А1 и А2 транспортных систем размеры соленоидов сверхпроводящих магнитов в каждой из четырех их полос принимались рациональными и равными в продольном и поперечном направлениях 1,2 и 0,25 м при поперечном зазоре между ними 0,16 м в каждой из двух пар полос, размещенных в продольном (вариант А1) и поперечном направлениях по краям тележек. Продольные и поперечные размеры путевых контуров прямоугольного очертания приняты равными 1,0 и 0,5 м.

Остальные основные параметры экипажа были приняты следующими:

© Н.А. Радченко, О.В. Звонарева, Т.Л. Губа, 2014

масса кузова – 25 т; масса каждой из двух тележек – 3,75 т; тележки опираются на кузов посредством восьми упруго-диссипативных элементов, жесткости которых приняты по 200 кН/м; коэффициент вязкого сопротивления – 20 кН/м. Путевая структура принята следующего очертания в плане: прямолинейный участок длиной 300 м; входная переходная кривая длиной 500 м; круговая кривая радиусом 8000 м с углом поперечного наклона ее поверхности к горизонтальной плоскости в сторону центра кривизны 0,1 рад и длиной 150 м; выходная переходная кривая 400 м и прямая 250 м. Углы наклона поверхности путевой структуры к горизонтальной плоскости в переходных кривых принимались пропорциональными кривизне пути, которая изменялась по синусоидальной зависимости [1, 2] от нулевого значения до значения, равного кривизне пути в круговой кривой.

Уравнения состояния транспортной системы: движущийся экипаж и изменение токов в токопроводящих контурах путевой структуры будем описывать 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

$$\begin{aligned} D_{qv} &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v}; & \Pi_{qv} &= \frac{\partial \Pi}{\partial q_v}; \\ \Phi_{qv} &= \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_v}; & Q_v &= f(F_L, F_S); \end{aligned} \quad (3)$$

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, определяемые в соответствии с [1].

Величины f_k определяются из выражения:

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

где M_{km} – коэффициенты взаимоиנדукции 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 в поперечной плоскости определяются из выражений:

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

$$F_{sm} = i_m^c \sum_{k=1}^p i_k \frac{\partial M}{\partial \delta_m}, \quad (5)$$

где Δ_m и δ_m – значения смещений зазоров, т. е. смещений m -ых сверхпроводящих магнитов относительно контуров путевой структуры в вертикальном и поперечном направлениях; p – число учитываемых контуров.

Решения дифференциальных систем уравнений вида (1), (2) получены с помощью метода Адамса–Башфорта. Результаты решения для варианта А1 (восемь сверхпроводящих магнитов) приведены на графиках зависимостей линейных и угловых перемещений кузова и тележек, ускорений кузова в вертикальном z и поперечном y направлениях и левитационных зазоров под сверхпроводящими магнитами от пройденного пути на рис. 1, 2 при скорости левитационного движения экипажа 100 м/с.

На рисунке 1 отображены зависимости вертикальных перемещений z (а), углов галопирования φ (б), бокового отбоя y (в) и боковой качки Θ (г) кузова (3) и тележек (1, 2); на рисунке 2 – зависимости поперечных δ_j (а) и вертикальных Δ_j (б) перемещений j -ых ($j = 1, 2, 7, 8$) магнитов, углов виляния ψ (в) кузова (3) и тележек (1, 2), ускорений кузова (г) от пройденного пути для скорости 100 м/с. Как видно из приведенных графиков, движение экипажа устойчиво в рассматриваемом диапазоне скоростей как в прямолинейных, так и в криволинейных участках путевой структуры, перемещения твердых тел системы (кузова и тележек) небольшие и значения левитационных зазоров и ускорений кузова приемлемы. При скорости 30 м/с, как и при скорости 100 м/с, левитационное движение экипажа устойчиво. Однако максимальные значения ускорений кузова в вертикальном направлении существенно больше при скорости 30 м/с по сравнению с ускорением для скорости 100 м/с ($0,25 \text{ м/с}^2$ по сравнению с $0,1 \text{ м/с}^2$).

Для варианта А2 (двенадцать сверхпроводящих магнитов, приходящихся на одну тележку) получены аналогичные результаты. Однако, если для сверхпроводящих магнитов варианта А1 значение намагничивающих сил в соленоидах получено равным $7,05 \cdot 10^5$ ампер-витков, то для соленоидов варианта А2 – $5,8 \cdot 10^5$ ампер-витков.

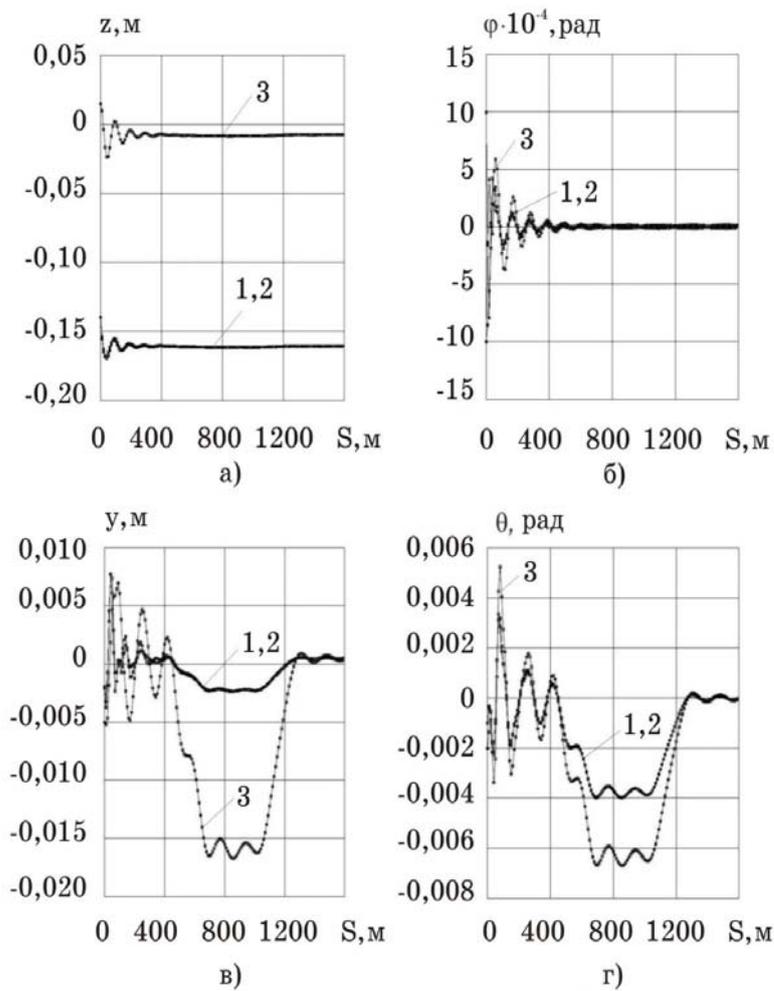


Рис. 1

В случае, если принять размеры соленоидов сверхпроводящих магнитов соответственно равными в продольном и поперечном направлениях 1,2 и 0,4 м с поперечным зазором между ними для каждой их пары 0,1 м, а продольные и поперечные размеры путевых контуров 1,0 и 0,4 м при разреженном их расположении вдоль путевой структуры с продольным зазором между контурами 1,1 м в диапазоне скоростей 30 и 100 м/с, также имеет место устойчивое левитационное движение в прямолинейных и криволинейных участках пути для экипажей конструктивных схем транспортных систем, соответствующих вариантам А1 и А2, также как и небольшие значения перемещений твердых тел систем и левитационных зазоров при значениях намагничивающих сил в соленоидах $7,02 \cdot 10^5$ и $6,7 \cdot 10^5$ ампер-витков. Однако значения вертикальных ускорений кузова при скорости 30 м/с значительно больше нормативных из условий комфорта пассажиров и их экстремальные значения составляют соответственно 2,5 и 1,2 м/с² для вариантов А1 и А2.

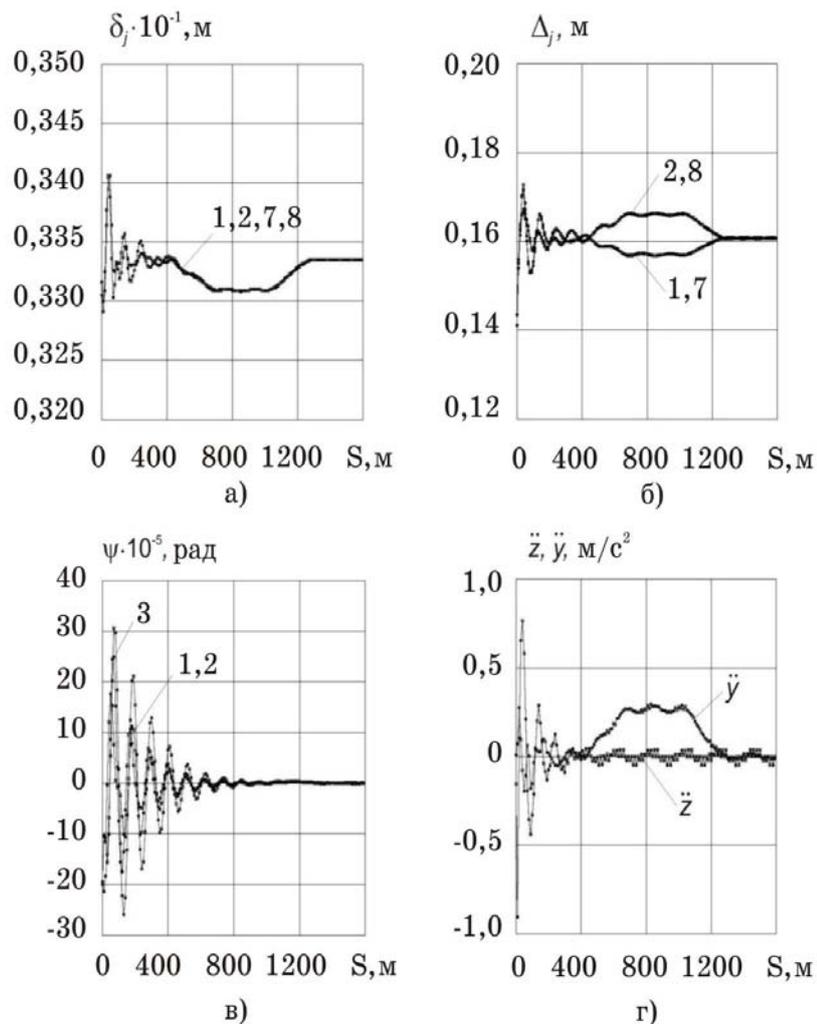


Рис. 2

Таким образом, для транспортной системы с четырьмя полосами сверхпроводящих магнитов и двумя полосами путевых контуров при рациональном выборе основных параметров может быть обеспечено устойчивое левитационное движение экипажа в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры при установке на каждой тележке 16, 12 и 8 сверхпроводящих магнитов.

1. Дзензерский В. А. Динамика экипажей нетрадиционных конструкций на сверхпроводящих магнитах / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко, В. В. Малый. – Днепропетровск : Арт-Пресс, 2011. – 248 с.
2. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахуняц. – М. : Транспорт, 1969. – 336 с.

Институт транспортных систем
и технологий
Национальной академии наук Украины
«Грансмаг»,
Днепропетровск

Получено 17.02.14,
в окончательном варианте 25.10.14