



Аварийные режимы вагона с магнитной подвеской



Геннадий ПЕТРОВ
Gennady I. PETROV

Петр АНИСИМОВ
Petr S. ANISIMOV



Петров Геннадий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия. Анисимов Пётр Степанович – доктор технических наук, профессор МИИТ, Москва, Россия.

Разработаны математическая модель и компьютерная программа для исследования аварийного падения пассажирского вагона, имеющего магнитное подвешивание, на путевое полотно с неровностями в вертикальной и горизонтальной плоскостях при различных скоростях движения. Дан анализ результатов многовариантных расчётов динамических сил, амплитуд колебаний и ускорений взаимодействия вагона и путевого полотна, тормозного пути при скоростях до 400 км/ч. Рекомендованы параметры, при которых обеспечивается безопасность движения вагона.

Ключевые слова: железная дорога, безопасность движения, пассажирский вагон, путевая структура, магнитное подвешивание, зазор левитации, аварийная посадка на путевое полотно, математическое и программное обеспечение, динамические параметры вагона, начальная скорость падения, тормозной путь.

Пассажирские вагоны без колёс на магнитном подвешивании или магнитолевитирующие имеют неоспоримые преимущества перед традиционными колёсными вагонами [1,2]:

- возможность реализации высоких скоростей движения (500–700 км/ч);
- отсутствует механический контакт между вагоном и путевым полотном в режиме левитации, т. е. в подвешенном состоянии при движении;
- уменьшаются затраты энергии на движение вагона, а также шум и вибрации в элементах направляющего пути и прилегающих участках грунта;
- значительно сокращаются эксплуатационные затраты на текущее содержание пути в исправном состоянии;
- равномерно распределяется вертикальная нагрузка на путевое полотно вдоль вагона, что позволяет делать конструкцию пути более лёгкой и дешёвой.

Всё это предопределило высокий интерес к созданию пассажирских вагонов на магнитном подвешивании с линейными асинхронными электрическими двигателями.

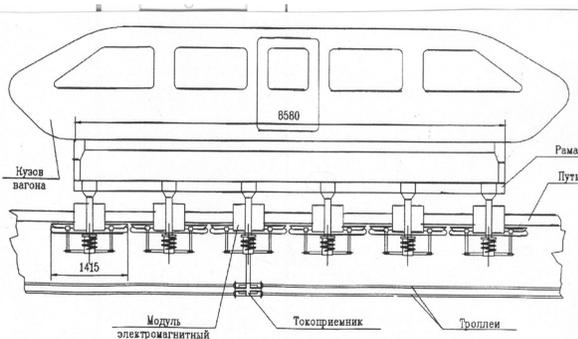


Рис. 1. Схема опытного образца вагона типа ТП-05 с электромагнитным подвешиванием и линейным асинхронным электрическим двигателем.

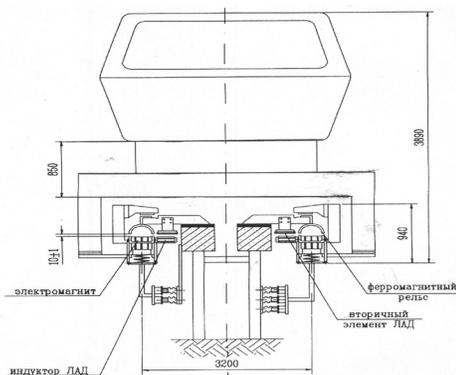


Рис. 2. Схема путевой структуры и электромагнитного подвешивания вагона. ЛАД – линейный асинхронный электродвигатель.

I.

Первые работы в этом направлении в России были начаты в 1976 году. Они преследовали цель обеспечить скоростные городские и пригородные перевозки пассажиров. На этом этапе были определены принципиальные технические решения, испытаны опытные вагоны и основные компоненты, используемые в системе магнитного подвешивания.

На полигоне инженерно-научного центра «Транспорт электромагнитный пассажирский» (ИНЦ ТЭМП) в г. Раменское Московской области соорудили опытный участок пути длиной 800 м и построили вагон массой 16 т типа ТП-05 (рис. 1), на базе которого велась исследования и отработка элементов системы в режиме ходовых испытаний при ограниченной скорости движения.

Основным узлом вагона являлся электромагнитный модуль МЭМ1 с индуктором ОЛАД, имеющим массу 130 кг, мощность двух электромагнитов 2,2 кВт, номинальное подъёмное усилие 1,5 кН, градиент боковой силы 1,3 кН/мм, максимальное тяговое усилие 1,5 кН, жёсткость вертикального подвешивания 1,0 кН/см, логарифмический декремент колебаний на рес-

сорном подвешивании в вертикальной плоскости 1,2; габариты 8,475×4,0×1,6 м, 12 электромагнитов, четыре линейных асинхронных электрических двигателя, номинальный коэффициент трения кузова вагона о путевое полотно 0,35. Электромагнитный модуль демонстрировал жёсткость рессорного подвешивания в вертикальной плоскости 10 кгс/мм, галомирование (тангаж) по концам электромагнитов ±2 мм, виляние (рыскание) по концам электромагнитов ±3,0 мм, боковую качку (крен) электромагнитов ±0,5 мм. Смещение рамы вагона относительно электромагнитов в поперечном горизонтальном направлении равнялось ±1,5 мм.

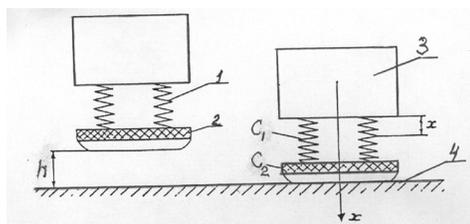


Рис. 3. Опорно-посадочное устройство прямого действия: 1 – рессорное подвешивание, 2 – скользян, 3 – путевая структура, 4 – вагон.



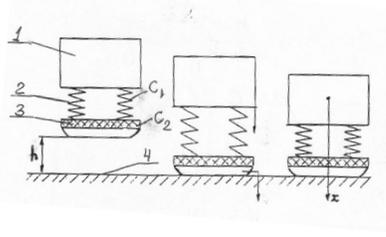


Рис. 4. Опорно-посадочное устройство с выдвижным быстродействующим элементом: С – жёсткость, h – высота подвешивания вагона.

Электромагнит имел номинальную мощность 1,1 кВт, силу электротока 20 А, номинальное подъёмное усилие 5,0 кН, номинальный воздушный зазор 10 мм, градиент боковой силы 0,13 кН/мм, массу 98 кг.

Индуктор типа ОЛАД был рассчитан на напряжение 380 В с частотой 100 Гц, максимальное тяговое усилие 1,5 кН, зазор между вторичным элементом и индуктором составлял не более 15 мм, максимальное усилие притяжения индуктора к вторичному элементу не превышало 125 кН.

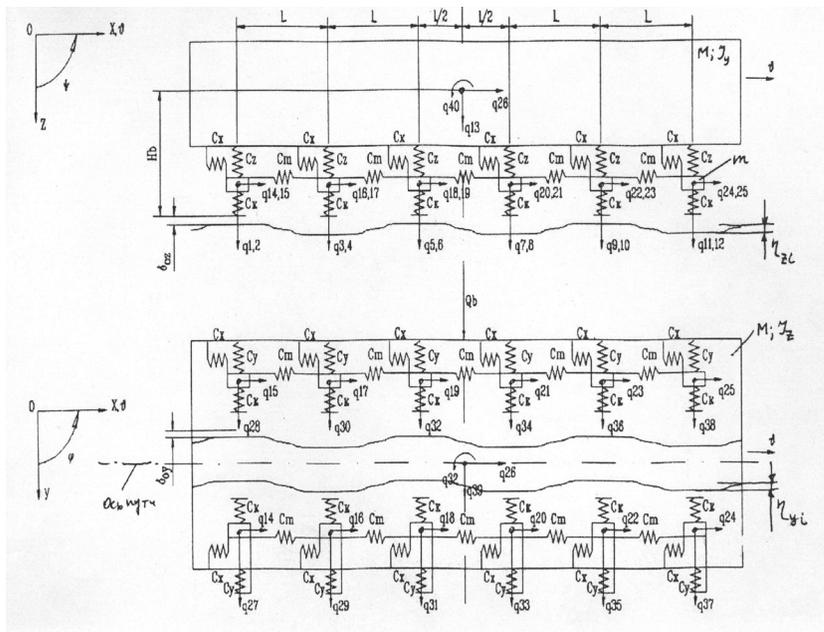
Схема путевой структуры и магнитного подвешивания вагона типа ТП-05 с линейным тяговым электродвигателем показана на рис. 2, где условное обозначение ЛАД означает линейный асинхронный двигатель. Особо ответственным узлом в транспортной системе с магнитным подвешиванием стало опорно-посадочное устрой-

ство, обеспечивающее безопасную аварийную посадку вагона.

Для этой цели обычно используются управляемые устройства с быстродействующими выдвижными лыжами (скользунами) или без них, способные при посадке вагона на путь передавать последнему через упругие элементы свои вертикальные и горизонтальные силы. Такие конструкции призваны обеспечивать безопасную аварийную посадку вагона при обесточивании электромагнитов подвешивания, а также осуществлять удержание вагона на упругих опорах во время длительных стоянок. Кроме того, опорно-посадочные устройства с помощью специального привода поднимают вагонную массу на начальный зазор левитации в начале движения, то есть нижний воздушный зазор между электромагнитами и ферромагнитными полосами путевого полотна и верхний воздушный зазор между опорными точками кузова вагона и направляющими пути. Эти зазоры составляют обычно 10–15 мм, а в некоторых системах – 30–60 мм.

Опорно-посадочные устройства защищают в аварийном режиме вагон от жёстких ударов, обеспечивают безопасность и плавность запланированной посадки, служат опорными элементами вагона во время длительных стоянок, а также дают ему возможность делать остановку в пре-

Рис. 5. Расчётная схема высокоскоростного вагона с нумерацией обобщённых координат.



делах нормированной длины тормозного пути.

Известны две основные конструкции опорно-посадочных устройств [4]: прямого действия (рис. 3) и с выдвижным быстродействующим элементом (рис.4).

Устройство прямого действия представляет собой опору, которая сравнительно медленно опускается и убирается приводом. Недостаток конструкции заключается в малом зазоре h (10–15 мм) между опорными поверхностями скользунов 2 и направляющими пути 3. При аварийном отключении режима левитации и падении вагона на путь динамические нагрузки обычно не превышали допустимых величин. Для обеспечения такого зазора требуется высокая точность изготовления и содержания эксплуатируемой техники. Причем необходимо конструктивное ограничение амплитуд колебаний корпусных деталей вагона, на которых установлены опорно-посадочные устройства. Кроме того, некоторые дополнительные трудности могут возникать в зимних условиях.

Вторую конструкцию опорно-посадочного устройства – с быстродействующим элементом – рекомендуется размещать на кузове, тележке (при её наличии) или специальных устройствах вблизи путевых направляющих. Увеличение зазора h до 30–60 мм позволяет обеспечить достаточную плавность движения и надёжную работу транспортной техники в зимних условиях, снизить требования к допускам при создании верхнего строения пути и уменьшить затраты на изготовление и эксплуатацию системы на магнитном подвешивании.

II.

Для исследования аварийных режимов движения *высокоскоростного* вагона на магнитном подвешивании было разработано специальное математическое и программное обеспечение расчётов динамических сил взаимодействия узлов ходовых частей вагонной конструкции [3]. Приложение «Посадка» программного комплекса «Дионис» для ПЭВМ, созданное на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» МИИТ, позволило в процессе компьютерного моделирования изучить поведение высокоскоростного вагона на магнитном подвешивании при аварийной посадке на путь и определить критерии безопасности его движения.

В математической модели вагон представлен в виде пространственной механической системы из 13 твёрдых тел, соединённых между собой упруго-диссипативными элементами. Система дифференциальных уравнений, описывающих движение вагона на магнитном подвешивании, имеет 84-й порядок. Для существенного ускорения вычислений на ПЭВМ использован скоростной безитерационный замкнутый метод интегрирования, в котором третья производная в разложениях Тейлора представлена разностью не в ускорениях, а в перемещениях. В качестве критериев динамических параметров при компьютерном моделировании аварийной посадки были приняты нормы расчёта и проектирования пассажирских вагонов колеи 1520 мм, а непосредственным объектом выступал опытный вагон на магнитном подвешивании типа ТП-05 с 12 электромагнитными модулями.

Основные расчётные схемы вагона на магнитном подвешивании и путевой структуры с нумерацией обобщённых координат показаны на рис. 5 и 6. Соответственно состояние вагона в любой момент времени определяется 42 координатами, полный набор которых демонстрирует вектор расчётной системы:

$$\vec{U} = \{q_1, q_2, \dots, q_{42}\}^T,$$

где \vec{U} – вектор состояния системы, T – операция транспонирования строки.

Аналогично определяется вектор состояния \vec{U} по скоростям движения и ускорениям как соответственно первые и вторые производные по времени.

Дифференциальные уравнения, описывающие колебания всех тел расчётной схемы вагона и пути, можно для наглядности представить в векторно-матричном виде:

$$[M]\ddot{\vec{U}} + [B]\dot{\vec{U}} + [C]\vec{U} + \vec{F} + \vec{Q} = 0,$$

где $[M]$ – инерционная матрица, $[B]$ – матрица демпфирования, $[C]$ – матрица жёсткости, \vec{F} – нелинейный вектор, определяемый физическими и геометрическими предпосылками, \vec{Q} – нелинейный



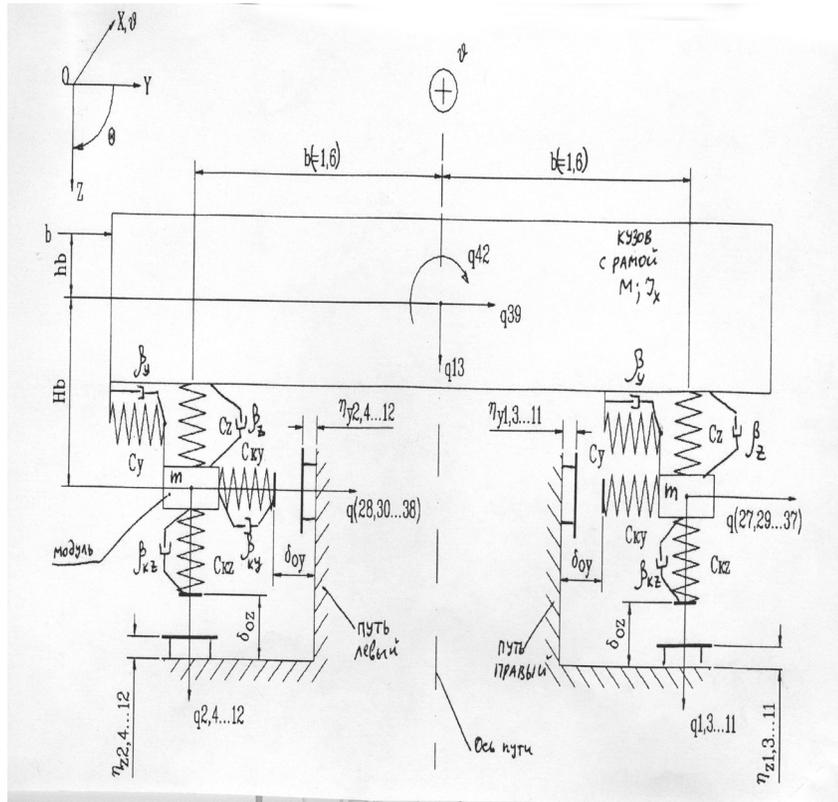


Рис. 6. Расчётная схема взаимодействия высокоскоростного вагона и путевой структуры с нумерацией обобщённых координат.

грузовой вектор, определяемый внешними возмущениями со стороны пути.

Для составления дифференциальных уравнений рассматриваемой динамической системы по принципу Д'Аламбера на расчётной схеме отбрасываются связи с заменой их реакциями, прикладываются к каждому элементу силы инерции и инерционные моменты, рассматривается равновесие каждого элемента под действием этих сил.

Полученная в результате этого система дифференциальных уравнений 84-го порядка, описывающая пространственное движение высокоскоростного вагона на магнитном подвешивании, имеет следующий вид.

Подпрыгивание электромагнитных модулей по оси z:

$$m \ddot{q}_1 = P_{z1} - R_{z1} + mg - R_{m1} - F_z \delta_1$$

...

$$m \ddot{q}_{12} = P_{z12} - R_{z12} + mg - R_{m12} - F_z \delta_{12}$$

Подпрыгивание кузова по оси z:

$$m \ddot{q}_l = - \left(\sum_{i=1}^{12} P_{zi} \right) + Mg.$$

Продольные колебания электромагнитных модулей по оси x – подёргивание опор:

$$m \ddot{q}_{14} = - P_{x1} - F_{x1} - P_{xm1} - F_x \delta_1;$$

$$m \ddot{q}_{15} = - P_{x2} - F_{x2} - P_{xm2} - F_x \delta_2;$$

$$m \ddot{q}_{16} = - P_{x3} - F_{x3} - P_{xm3} + P_{xm1} - F_x \delta_3;$$

$$m \ddot{q}_{17} = - P_{x4} - F_{x4} - P_{xm4} + P_{xm2} - F_x \delta_4;$$

$$m \ddot{q}_{18} = - P_{x5} - F_{x5} - P_{xm5} + P_{xm3} - F_x \delta_5;$$

$$m \ddot{q}_{19} = - P_{x6} - F_{x6} - P_{xm6} + P_{xm4} - F_x \delta_6;$$

$$m \ddot{q}_{20} = - P_{x7} - F_{x7} - P_{xm7} + P_{xm5} - F_x \delta_7;$$

$$m \ddot{q}_{21} = - P_{x8} - F_{x8} - P_{xm8} + P_{xm6} - F_x \delta_8;$$

$$m \ddot{q}_{22} = - P_{x9} - F_{x9} - P_{xm9} + P_{xm7} - F_x \delta_9;$$

$$m \ddot{q}_{23} = - P_{x10} - F_{x10} - P_{xm10} + P_{xm8} - F_x \delta_{10};$$

$$m \ddot{q}_{24} = - P_{x11} - F_{x11} + P_{xm9} - F_{x\delta 11};$$

$$m \ddot{q}_{25} = - P_{x12} - F_{x12} + P_{xm10} - F_{x\delta 12}.$$

Продольные колебания (подёргивание) кузова по оси x:

$$m \ddot{q}_{26} = \sum_{i=1}^{12} P_{xi}$$

Поперечный относ электромагнитных модулей по оси y:

$$m \ddot{q}_{27} = -P_{y1} - F_{y1} - R_{y1}$$

...

$$m \ddot{q}_{38} = -P_{y12} - F_{y12} - R_{y12}$$

Поперечный относ кузова по оси y :

$$m \ddot{q}_{39} = \sum_{i=1}^{12} P_{yi} + Q_b.$$

Галомирование кузова вагона ψ :

$$J_y \ddot{q}_{40} = (P_{z1} + P_{z2} - P_{z11} - P_{z12}) * (2l + \frac{l}{2}) + (P_{z3} + P_{z4} - P_{z9} - P_{z10}) * (l + \frac{l}{2}) + (P_{z5} + P_{z6} - P_{z7} - P_{z8}) \frac{l}{2}.$$

Влияние кузова относительно оси ϕ :

$$J_z \ddot{q}_{41} = (P_{y1} + P_{y2} - P_{y11} - P_{y12}) * (2l + \frac{l}{2}) + (P_{y3} + P_{y4} - P_{y9} - P_{y10}) * (l + \frac{l}{2}) + (P_{y5} + P_{y6} - P_{y7} - P_{y8}) \frac{l}{2} + \left[\sum_{i=1}^{11} P_{xi} \right] b - \left[\sum_{i=12}^{12} P_{xi} \right] b.$$

Боковая качка кузова вагона θ :

$$J_x \ddot{q}_{42} = \left[\sum_{i=1}^{12} P_{zi} \right] b - \left[\sum_{i=1}^{11} P_{zi} \right] b - \left[\sum_{i=1}^{12} P_{yi} \right] H_b + Q_b h_b,$$

где: M – масса кузова вагона без электромагнитных модулей, m – масса одного электромагнитного модуля, J_x, J_y, J_z – моменты инерции относительно осей соответственно x, y, z для центра массы кузова без электромагнитных модулей, $i=1, 2, \dots, n$ ($n=12$) – количество электромагнитных модулей на вагоне; $P_{z1}, P_{z2}, \dots, P_{z12}$ – вертикальные реакции электромагнитных модулей, $P_{x1}, P_{x2}, \dots, P_{x12}$ – продольные реакции рессорного подвешивания электромагнитных модулей; $P_{y1}, P_{y2}, \dots, P_{y12}$ – горизонтальные (боковые) реакции рессорного подвешивания электромагнитных модулей; $P_{xm1}, P_{xm2}, \dots, P_{xm10}$ – продольные реакции в шарнирных соединениях электромагнитных модулей; $R_{z1}, R_{z2}, \dots, R_{z12}$ – вертикальные реакции в контакте посадочных опор с путевой структурой; $R_{y1}, R_{y2}, \dots, R_{y12}$ – горизонтальные (боковые) реакции в контакте посадочных опор с путевой структурой при выборе зазора в колее; $F_{x1}, F_{x2}, \dots, F_{x12}$ – продольные силы трения в контакте посадоч-

ных опор с путевой структурой; $F_{y1}, F_{y2}, \dots, F_{y12}$ – горизонтальные (боковые) силы в контакте посадочных опор с путевой структурой; $F_{x\delta1}, F_{x\delta2}, \dots, F_{x\delta12}$ – продольные силы трения в контакте посадочных опор с путевой структурой при выборе зазора в колее; $F_{z\delta1}, F_{z\delta2}, \dots, F_{z\delta12}$ – вертикальные силы трения в контакте посадочных опор с путевой структурой при выборе зазора в колее; $R_{m1}, R_{m2}, \dots, R_{m12}$ – вертикальная подъёмная сила электромагнитных модулей; L – расстояние между центрами масс электромагнитных модулей, находящихся на одной боковой стороне вагона; $2b$ – расстояние между посадочными опорами поперёк вагона; Q_b – ветровая нагрузка на боковую поверхность кузова вагона; H_b – высота центра тяжести кузова вагона с рамой относительно наружной поверхности рельса путевой структуры; h_b – высота приложения ветровой нагрузки относительно центра тяжести кузова вагона.

Аналитические зависимости между деформациями связей и координатами расчётной схемы вагона основываются на предположении малых угловых перемещений, т. е. при малых углах α ($\sin \alpha \approx \alpha$, $\cos \alpha \approx 1$).

Поперечные горизонтальные деформации в контакте посадочных опор электромагнитных модулей определены из зависимостей:

$$\begin{aligned} \Delta_{ky1} &= -(q_{27} + \eta_{y1}); \Delta_{ky2} = +(q_{28} + \eta_{y2}); \\ \Delta_{ky3} &= -(q_{29} + \eta_{y3}); \\ \Delta_{ky4} &= +(q_{30} + \eta_{y4}); \Delta_{ky5} = -(q_{31} + \eta_{y5}); \\ \Delta_{ky6} &= +(q_{32} + \eta_{y6}); \\ \Delta_{ky7} &= -(q_{33} + \eta_{y7}); \Delta_{ky8} = +(q_{34} + \eta_{y8}); \\ \Delta_{ky9} &= -(q_{35} + \eta_{y9}); \\ \Delta_{ky10} &= +(q_{36} + \eta_{y10}); \Delta_{ky11} = -(q_{37} + \eta_{y11}); \\ \Delta_{ky12} &= +(q_{38} + \eta_{y12}). \end{aligned}$$

Детерминированные неровности путевой структуры принимались в виде

$$\eta_{yi} = \eta_{y0i,2} \sin \frac{\pi \chi_{pi}}{l_{p1,2}},$$

где $\eta_{y0i,2}$ – амплитуда вертикальных неровностей путевой структуры.

Вертикальные реакции рессорных комплектов электромагнитных модулей определены из формулы:

$$P_{zi} = (C_{zi} \Delta_{zi} + \beta_{zi} \dot{\Delta}_{zi}) + C_z f_{cm},$$



где C_{zi} , C_z – соответственно жесткость рессорных комплектов электромагнитных модулей и их средняя жесткость в вертикальной плоскости, β_{zi} – коэффициент вязкого трения рессорных комплектов электромагнитных модулей в вертикальной плоскости; f_{cm} – начальный статический прогиб рессорного подвешивания кузова вагона; Δ_{zi} и $\dot{\Delta}_{zi}$ – соответственно вертикальные деформации рессорных комплектов электромагнитных модулей и их первые производные по времени t .

Продольные реакции рессорных комплектов электромагнитных модулей равны: $P_{xi} = C_{xi} \Delta_{xi} + \beta_{xi} \dot{\Delta}_{xi}$, где C_{xi} , β_{xi} – жесткость рессорных комплектов и коэффициент вязкого трения в рессорных комплектах электромагнитных модулей в продольном направлении; Δ_{xi} , $\dot{\Delta}_{xi}$ – продольные деформации рессорных комплектов электромагнитных модулей и их первые производные по времени t .

Горизонтальные поперечные реакции рессорных комплектов электромагнитных модулей P_{yi} , а также реакции в шарнирных соединениях электромагнитных модулей вычисляются аналогично P_{xij} .

Вертикальные реакции в контакте посадочных опор электромагнитных модулей находятся с учетом односторонней связи контакта по формуле:

$$R_{zi} = C_{zki} (\Delta_{zki} - \delta_{zo}) + \beta_{zki} \dot{\Delta}_{zki},$$

при $\Delta_{zki} > \delta_{zo}$;

$$R_{zi} = 0, \text{ при } \Delta_{zki} \leq \delta_{zo},$$

где C_{zki} , β_{zki} – жесткость контакта посадочных опор электромагнитных модулей и коэффициент вязкого трения в контакте посадочных опор электромагнитных модулей в вертикальном направлении; Δ_{zki} , $\dot{\Delta}_{zki}$ – вертикальные деформации контакта посадочных опор электромагнитных модулей и их первые производные по времени t ; δ_{zo} – начальный вертикальный зазор левитации (подвешивания).

Поперечные горизонтальные реакции в контакте посадочных опор электромагнитных модулей при выборе зазора в колее определяются с учетом односторонней связи бокового контакта аналогично.

Продольные F_{xi} и поперечные горизонтальные F_{yi} силы трения в контакте посадочных опор с путевой структурой вычисляются с учетом направления вектора скорости перемещения посадочных опор относительно горизонтальной плоскости путевой структуры по формулам:

$$F_{xi} = F_i \frac{\dot{X}_i}{\sqrt{\dot{X}_i^2 + \dot{Y}_i^2}};$$

$$F_{yi} = F_i \frac{\dot{Y}_i}{\sqrt{\dot{X}_i^2 + \dot{Y}_i^2}}; F_i = R_{zi} \mu_k,$$

где F_i – модуль силы трения в контакте посадочных опор с путевой структурой;

$\mu_k = \mu_o e^{-a\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}}$ – коэффициент трения скольжения в контакте посадочных опор с путевой структурой, μ_o – коэффициент трения покоя материалов пары трения (посадочная опора- путевая структура), a – эмпирический коэффициент, \dot{X}_i , \dot{Y}_i – скорости перемещений соответственно в продольном и поперечном горизонтальном направлениях посадочных опор относительно горизонтальной плоскости путевой структуры.

Продольные $F_x \delta_i$ и вертикальные $F_z \delta_i$ силы трения в контакте посадочных опор с путевой структурой при выборе зазора в колее вычисляются аналогично с учетом направления вектора скорости перемещения посадочных опор относительно вертикальных направляющих путевой структуры.

В качестве внешнего возмущения принято изменение вертикальных подъёмных электромагнитных сил от электромагнитных модулей R_{mi} , действующих на вагон в режиме левитации при начальной продольной скорости движения $v = v_o$ и не мгновенно исчезающих при отключении электроэнергии в момент времени t . Эти силы фиксируются с учетом времени задержки полного исчезновения подъёмной электромагнитной силы в течение времени t_{mo} по формулам:

$$R_{mi} = R_{moi} e^{-at} - b, \text{ при } t_{mo} > t > 0,$$

$$R_{mi} = 0, \text{ при } t > t_{mo},$$

где R_{moi} – вертикальная подъёмная сила электромагнитных модулей в режиме

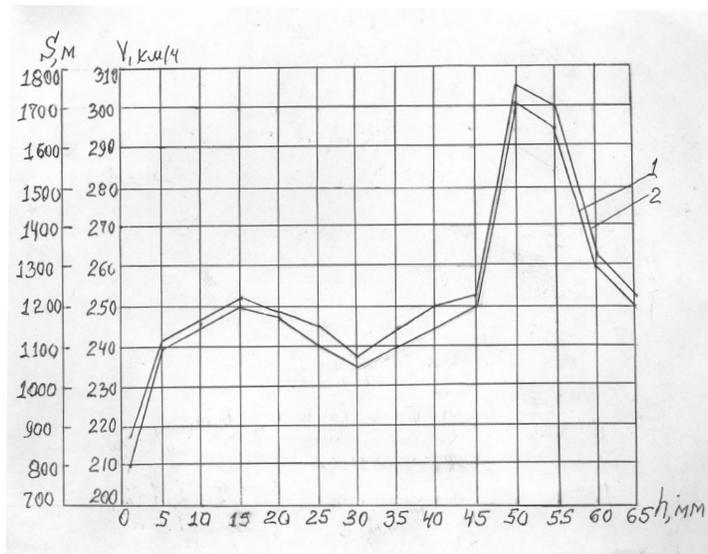


Рис. 7. Допускаемые скорости и тормозной путь аварийной посадки вагона в зависимости от начального вертикального зазора левитации (высоты падения):
 1 – допускаемые скорости,
 2 – тормозной путь.

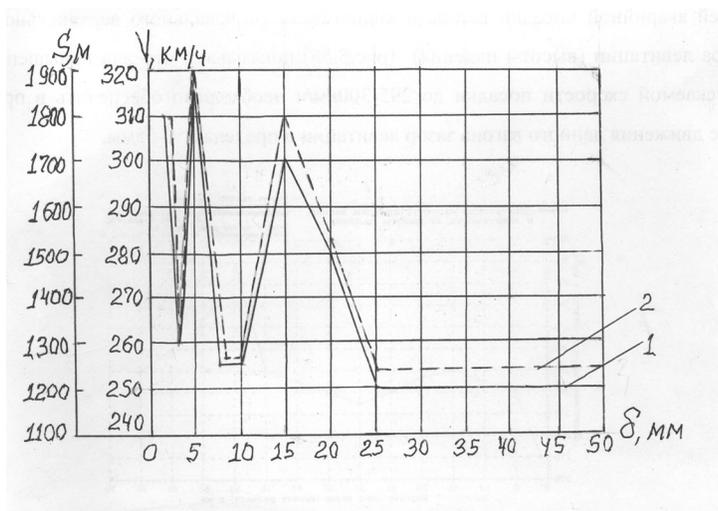
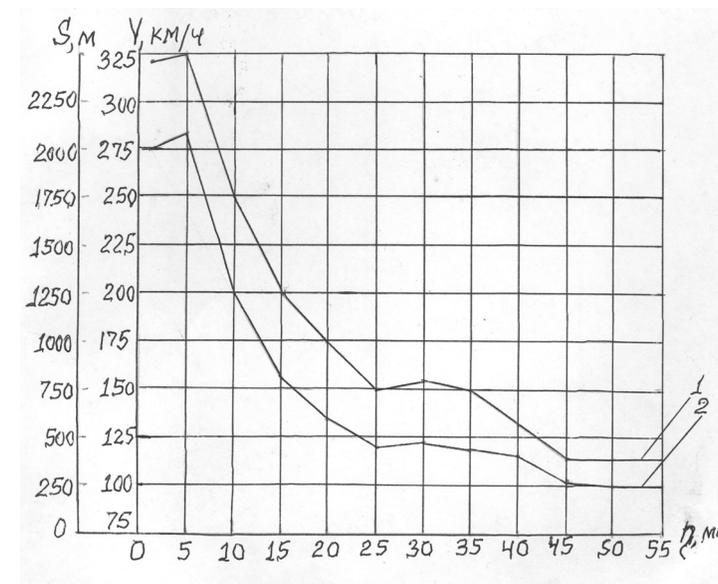


Рис. 8. Допускаемые скорости и тормозной путь аварийной посадки вагона в зависимости от бокового зазора в колее:
 1 – допускаемые скорости,
 2 – тормозной путь.



левитации; $t_{\text{мо}} = 0,5-1,0$ с – время полного исчезновения подъёмной силы электромагнитных модулей; $a = 10$, $b = 0$ – эмпирические коэффициенты, характеризующие потери вертикальной магнитной силы электромагнитного модуля, полученные экспериментальным путём.

Полученная таким образом система дифференциальных уравнений совместно с уравнениями связей и внешних возмущений решена с использованием ПЭВМ с помощью процедуры численного интегрирования. Для этой цели применен разностно-итерационный метод интегрирования, разработанный профессором В. Д. Хусидовым применительно к системам высокого порядка. Соответственно рассмотренная выше система дифференциальных уравнений представлена в нормальной форме Коши:

$$\ddot{\vec{q}} = - [M]^{-1} \{ [B] \dot{\vec{q}}_i + [C] \vec{q}_i + \vec{F}_i + \vec{Q}_i \},$$

Здесь i – номер шага интегрирования по времени. Искомое значение вектора \vec{q} на следующем шаге интегрирования ищется в виде разложения в ряд Тейлора.

III.

В процессе компьютерного моделирования [3] аварийной посадки высокоскоростного вагона модели ТП-05 на путевую структуру с отключением электроэнергии на электромагнитных модулях с учётом времени задержки полного исчезновения подъёмной электромагнитной силы производился непрерывный анализ всех основных динамических параметров до момента остановки, т. е. до момента времени, когда продольная поступательная скорость движения $\dot{q}_{26} = 0$. При этом автоматически фиксировалась координата пройденного вагоном расстояния, то есть оценивался его тормозной путь. Было осуществлено моделирование движения вагона при аварийных начальных скоростях 100 и 400 км/ч. Принимались при расчётах: высота падения вагона на путевую структуру – 10 мм, боковой зазор в колее – 15 мм, амплитуды вертикальных и горизонтальных неровностей путевой структуры – 10 мм на длине 4,0 м.

Анализ результатов расчётов при аварийной скорости движения вагона 100 км/ч показал: тормозной путь равен 202 м; время полного затухания колебаний подпрыгивания – 3,9 с, колебаний галопирования – 16,2с, колебаний виляния – 15,2с, колебаний бокового отбоя кузова – 15,3 с, колебаний боковой качки кузова – 14,8 с; максимальные силы взаимодействия опор электромагнитных модулей с путевой структурой – 19,5 кН в вертикальном направлении и 5,5 кН в горизонтальном направлении. Максимальные величины ускорений были 2,1 м/с² при подёргивании и 0,5 м/с² при галопировании.

При аварийной скорости движения вагона 400 км/ч тормозной путь равен 3100 м при времени торможения 56,2 с.; время затухания колебаний подпрыгивания кузова – 37,2 с, колебаний галопирования – 62,2 с, колебаний виляния – 51,5 с, боковой качки – 55,8 с, а бокового отбоя кузова – 57,1 с. Максимальные силы взаимодействия опорных устройств электромагнитных модулей и путевой структуры достигают 312 кН в вертикальном направлении и 66 кН в горизонтальном поперечном. Максимальные величины ускорений кузова вагона достигали 4,2 м/с² при подпрыгивании; 6,7 м/с² при подёргивании; 1,6 м/с² при боковом отбоя; 3,5 м/с² при галопировании; 2,5 м/с² при вилянии и 6,0 м/с² при боковой качке.

Для определения динамических параметров опытного вагона модели ТП-05 при скоростях аварийной посадки от 100 до 400 км/ч было проведено многовариантное компьютерное моделирование.

Из анализа полученных зависимостей (см. рис. 7 и 8) при высоте падения вагона на путевое полотно 65 мм, боковом зазоре 15 мм, вертикальных и горизонтальных неровностях путевой полотна с амплитудами 10 мм и длиной 4,0 м, коэффициенте трения в системе «рельс-опора» 0,2 и при сдвиге неровностей 2,0 м установлено, что максимальная скорость аварийной посадки вагона на путевую структуру не должна превышать 245 км/ч, если иметь в виду требования безопасности. Для повышения максимальной скорости аварийной посадки вагона до 295–300 км/ч необходимо обеспечить в про-

цессе движения вагона зазор левитации в пределах 50–55 мм, а боковой зазор в колее – в пределах 15–20 мм. При этих скоростях аварийный тормозной путь не превысит 1780 м.

Исследование влияния на допустимую скорость аварийной посадки вагона величины вертикальных неровностей путевой структуры показали, что для повышения этой скорости до 275–325 км/ч амплитуды неровностей не должны превышать 7–8 мм. При этом тормозной путь вагона не превысит 1500–2075 м. Следует отметить, впрочем, что увеличение амплитуд приводит к уменьшению длины торможения. Относительно же величия горизонтальных поперечных неровностей путевой структуры можно утверждать, что для повышения допустимой скорости посадки вагона до 235–250 км/ч ампли-

туды этих неровностей не должны превышать 15–20 мм. Причем тормозной путь останется в пределах 1150–1200 м, а увеличение амплитуд горизонтальных неровностей от 0 до 20 мм не приводит к существенному уменьшению его длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якимец И. В., Винокуров В. А., Наровлянский В. Г. Магнитный подвес на основе высокотемпературных сверхпроводников для транспортных систем // Электричество. – 1996. – № 5. – С.7–12.
2. Винокуров В. А., Галенко А. А., Горелов А. Т., Фионов А. Н. Наземный транспорт на новых технологических принципах. – М.: МИИТ, 2004. – 185 с.
3. Петров Г. И. Оценка безопасности движения вагонов при отклонениях от норм содержания ходовых частей и пути. // Автореф. дис... док. техн. наук. – М.: МИИТ, 2000. – 48 с.
4. Заворотный А. В. Исследование и разработка опорно-посадочных устройств для транспортных средств на электромагнитной подвеске // Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 1991. – 23 с. ●

EMERGENCY OPERATION OF A MAGLEV COACH

Petrov, Gennady I. – D. Sc. (Tech), professor of the department of wagons and wagon facilities of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Anisimov, Petr S. – D. Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

The article refers to brief technical description of a maglev passenger coach, which had been engineered in Russia since 1976, and of mathematical model and software for PC and workstations which permit through simulation to forecast dynamic interaction of parts and units of the coach, as well as coach's behavior at the moment of its accidental landing on the track. This model allows to determine criteria of traffic safety.

Mathematical model is represented as spatial mechanical system of 13 solids, joined by elastic

dissipative elements. The system of differential equations, describing motions of the coach at the moment of its accidental landing on the track, is of 84th order. The authors used rapid not-iterated closed method of integration, designed by professor V. Husainov, where the third derivative in Taylor decomposition is represented by difference in relocation and not in acceleration. The authors describe the results of computations concerning different dynamic parameters.

Key words: railway, traffic safety, coach, track structure, magnetic levitation, levitation clearance, accidental landing on the track, mathematical model, software, dynamic parameters of rail car, initial speed of fall, braking distance.

REFERENCES

1. Yakimets I. V., Vinokurov V. A., Narovlyanskiy V. G. Magnetic levitation on the basis of high-temperature superconductors for transport systems [*Magnitnyj podves na osnove vysokotemperaturnykh sverhprovodnikov dlya transportnykh sistem*]. *Elektrichestvo*, 1996, № 5, pp.7–12.

2. Vinokurov V. A., Galenko A. A., Gorelov A. T., Fironov A. N. Land transport using new technology [*Nazemnyj transport na novykh tehnologicheskikh printsipah*]. Moscow, MIIT, 2004, 185 p.

3. Petrov G. I. Evaluation of coach motion safety in the case of deflection from standards of maintenance of under carriage and track [*Otsenka bezopasnosti dvizheniya vagonov pri otklone-niyah ot norm soderzhaniya hodovykh chastej i puti*]. Abstracts of D. Sc. (Tech) thesis. Moscow, MIIT, 2000, 48 p.

4. Zavorotnyj A. V. Study and engineering of support and alighting devices for transport vehicles using magnetic levitation [*Issledovanie i razrabotka oporno-posadochnykh ustroystv dlya transportnykh sredstv na elektromagnitnoy podveske*]. Abstracts of Ph.D. (Tech) thesis. Moscow, MIIT, 1991, 23 p.

Координаты авторов (contact information): Анисимов П. С. (Anisimov P. S.) – +7 (495) 684–2210, Петров Г. И. (Petrov G. I.) – petrovgi@gmail.com

Статья поступила в редакцию / article received 07.05.2013
Принята к публикации / article accepted 25.05.2013

