

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление «Электротехника»

UDC [УДК] 538.31.001.2

DOI 10.17816/transsyst20195270-82

© К. Э. Воеводский¹, В. М. Стрепетов², Г.Е. Серeda²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ ПОДВЕСОМ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОДОЛЬНОГО СТЫКА В ПУТЕВОМ ПОЛОТНЕ

Цель: предложить техническое решение, позволяющего обеспечить боковую стабилизацию экипажа с электродинамическим подвесом. Разработка метода расчёта левитационных характеристик транспортной установки с электродинамическим подвесом при наличии продольного стыка в путевом полотне. Анализ результатов теоретических исследований.

Методы: в статье использовались методы теории электромагнитного поля, обобщенные функции, преобразование Фурье, аналитические и численные методы определения квадратур. Программа для ПЭВМ разрабатывалась на языке Фортран.

Результаты: для обеспечения боковой стабилизации экипажа с электродинамическим подвесом предложено ввести в структуру путевого полотна продольный изоляционный стык. Создана математическая модель исследуемой системы электродинамического подвеса в приближения бесконечно широкого полотна прямоугольного сечения.

Для предельного случая, когда ширина стыка стремится к нулевому значению, а экипажные электромагниты имеют прямоугольную форму на основе применения преобразования Фурье получено решение уравнений, описывающих принятую математическую модель: выражение вектора магнитной индукции и электродинамической силы в квадратурах. Численное интегрирование этих уравнений выполнялось посредством применения формулы Гаусса и метода Филона.

Результаты расчетов позволили получить ряд графических зависимостей левитационных характеристик от величины бокового смещения экипажного электромагнита относительно симметричного положения.

Заключение: полученные результаты проведенного исследования полностью отвечают поставленной цели по определению параметров боковой стабилизации экипажа с электродинамическим подвесом с путевым полотном, содержащим продольный стык в рамках принятых допущений. Сравнение предложенного способа с другими предлагавшимися ранее способами стабилизации не позволяет выявить решающих преимуществ или недостатков нового способа. В большинстве случаев его недостатком является *относительно* низкое левитационное качество. Однако оно существенно возрастает, если движение экипажа ВСНТ происходит преимущественно с высокой скоростью, при которой сила аэродинамического сопротивления превалирует над силой электродинамического торможения.

Столь же относительным является и достоинство рассматриваемой системы – *высокая боковая жёсткость*. Причина этого в том, что требования на боковую жёсткость могут быть количественно сформулированы лишь применительно к *конкретной трассе* ВСНТ с учётом графика движения и других факторов. Как известно, главными дестабилизирующими воздействиями в боковом направлении являются сила инерции при движении по криволинейному участку и боковой ветер. Свою роль в выборе системы стабилизации могут сыграть и задачи, решаемые другими подсистемами системы ВСНТ. Играет определенную роль также принцип действия и конструкция системы тяги. Из сказанного ясно, что окончательный выбор системы боковой стабилизации на настоящем этапе исследований был бы преждевременным. Предложенный и изученный в этой статье новый способ стабилизации следует рассматривать как ещё один из возможных наряду с предлагавшимися ранее. Ответ на вопрос о конкурентоспособности нового способа должен быть связан с характеристиками конкретной трассы ВСНТ. Необходимо и дальнейшее уточнение результатов, при более строгом учёте краевого эффекта, а также рассмотрением случая неизолированного стыка.

Ключевые слова: транспортная установка, электродинамический подвес, продольный стык, боковая стабилизация, электромагнитные характеристики, обобщенные функции, преобразование Фурье.

Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field “Electrical Engineering”

© Konstantin E. Voevodskii¹, Vladimir M. Strepetov², Gennadii E. Sereda²

¹ St. Petersburg State University

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

LEVITATION CHARACTERISTICS OF ELECTRODYNAMIC SUSPENSION TRANSPORT RUNNING ON GUIDEWAY WITH LONGITUDINAL JOINT

Aim: to propose a technical solution to ensure the lateral stabilisation of the vehicle with an electrodynamic suspension. Development of a method for calculating the levitation characteristics of a transport unit with an electrodynamic suspension running on a guideway with a longitudinal joint. Analysis of the results of theoretical studies.

Methods: in the article, the methods of the electromagnetic field theory, generalised functions, Fourier transform, analytical and numerical methods for determining quadratures are used. The software was developed in the Fortran language.

Result: to ensure lateral stabilisation of the vehicle with an electrodynamic suspension, it was proposed to introduce a longitudinal insulating joint into the structure of the guideway. A mathematical model is proposed for this system of electrodynamic suspension in approximation of an infinitely wide track structure of rectangular cross section.

For the ultimate case when the width of the joint tends to zero, and the vehicle electromagnets have a rectangular form based on the application of the Fourier transform, the solution of the equations was obtained describing the adopted mathematical model: the

expression of the vector of magnetic induction and electrodynamic force in the quadrature. Numerical integration of these equations was performed by applying the Gauss formula and the Philo method.

The results of the calculations allowed us to obtain a number of graphical dependencies of the levitation characteristics on the value of the lateral displacement of the vehicle electromagnet relatively to symmetrical position.

Conclusion: thus, the obtained results of the study fully meet the goal of determining the parameters of the laterally stabilising the electrodynamic vehicle with the guideway equipped with a longitudinal joint under the assumptions made. Comparison of the proposed method with other proposed stabilisation methods does not reveal the decisive advantages or disadvantages of the new method. In most cases, its most serious weakness is its *relatively* low levitation quality. However, it is significantly reduced if the movement of the high-speed ground transport occurs predominantly at high speed, at which the force of aerodynamic drag prevails over the force of electrodynamic braking.

Of the same relativity is the advantage of the system proposed, that is *great lateral rigidity*. The reason for this is that the requirements to the *lateral rigidity* can be formulated quantitatively only in relation to the particular high-speed ground transport line, taking into account the traffic schedule and other factors. As it is known, the main destabilising influences in lateral direction are the inertia at curves and lateral wind. The tasks solved by other subsystems of the high-speed transport line, can play their certain role in choosing of the stabilisation system as well. It is clear from the above that the final decision on the stabilisation system at this stage of research would be premature. The new stabilisation method suggested and studied in this paper should be considered only as another possible together with the earlier proposed one. The answer to the question about the competitiveness of the new method should be related to the characteristics of the particular high-speed ground transport line. Further specification of the results is required considering the edge effect, as well the uninsulated joint case.

Keywords: transport unit, electrodynamic suspension, longitudinal joint, lateral stabilisation, electromagnetic characteristics, generalised functions, Fourier transform.

ВВЕДЕНИЕ

Для большинства промышленно развитых стран мира характерен неуклонный рост пассажирских перевозок, который может быть обеспечен за счёт повышения провозной и пропускной способности транспортных систем. При этом одновременно предполагается и повышение качества транспортного обслуживания: уменьшение затрат времени на поездку «от двери до двери», уменьшение наполняемости подвижного состава в часы «пик», сокращение межпоездных интервалов.

Одним из альтернативных ответов на данную задачу является создание систем высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) с использованием магнитного подвешивания транспортной установки. Создание ВСНТ на магнитном подвесе способствует экономическому росту за счёт внедрения новейших достижений научно-технического прогресса и содействует укреплению престижа России как одной из ведущих стран с высокоразвитыми транспортными системами [1-5].

Используются преимущественно два типа магнитных подвесов – электромагнитный (ЭМП) и электродинамический (ЭДП).

Действие ЭДП основано на использование сил отталкивания, возникающих между магнитным полем, размещённых на подвижном составе сверхпроводящих электромагнитов постоянного тока и индуктированными ими токами в путевом немагнитном полотне сплошного или дискретного типов. ЭДП по сравнению с ЭМП позволяет получить на порядок большую высоту подвешивания (100-200 мм). ЭДП присуще естественная вертикальная устойчивость.

Существует много способов, обеспечивающих боковую стабилизацию экипажа транспортных систем с ЭДП. Однако каждому из них присуще определенные недостатки. В связи, с чем актуальна задача по поиску альтернативных методов боковой стабилизации экипажа данной транспортной системы.

Целью предлагаемой работы является получение теоретических и технических решений, обеспечивающих эту задачу.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Конструктивная схема транспортной системы ЭДП, путевое полотно которой содержит продольный стык, представлено на Рис. 1.

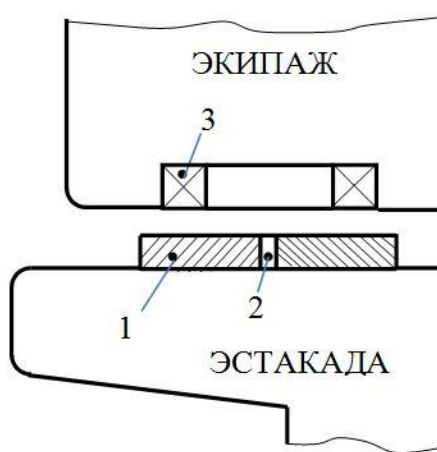


Рис.1. Конструктивная схема транспортной системы с ЭДП при наличии продольного стыка в полотне

На Рис. 1 цифрами обозначены: 1 – путевое полотно, 2 – продольный стык в полотне, 3 – электромагнит подвеса.

Расчетная схема для определения левитационных характеристик транспортной установки с ЭДП при наличии продольного стыка в путевом полотне представлена на Рис. 2.

Будем исходить из предположения, что наличие продольного стыка в путевом полотне обеспечит данной транспортной системе с ЭДП боковую устойчивость.

Для обоснования данного предположения ограничимся рассмотрением приближения бесконечно широкого полотна.

Будем считать, что полотно представляет собой слой между плоскостями $z = 0$ и $z = T$ (T – толщина полотна), воздушный зазор в полотне занимает область $-a < y < a$ (таким образом, ширина зазора равна $2a$), экипажный электромагнит движется вдоль оси x в плоскости $z = h > T$.

В [6] предложен *метод условной границы*, который позволяет свести задачу расчета электромагнитного поля в описанной системе к расчету полей, возбуждаемых в плоском слое $0 \leq z \leq T$, сплошь заполненном неоднородной проводящей средой. Для данного случая удельная проводимость среды в этом слое зависит только от координаты y , и эта зависимость имеет вид (1)

$$\sigma(y) = \sigma_0 k(y), \quad k = \begin{cases} 1 & \text{при } |y| > a \\ 0 & \text{при } |y| < a \end{cases}. \quad (1)$$

Здесь σ_0 – удельная проводимость материала полотна.

Расчетная схема для определения левитационных характеристик транспортной установки с ЭДП при наличии продольного стыка в путевом полотне представлена на Рис.2.

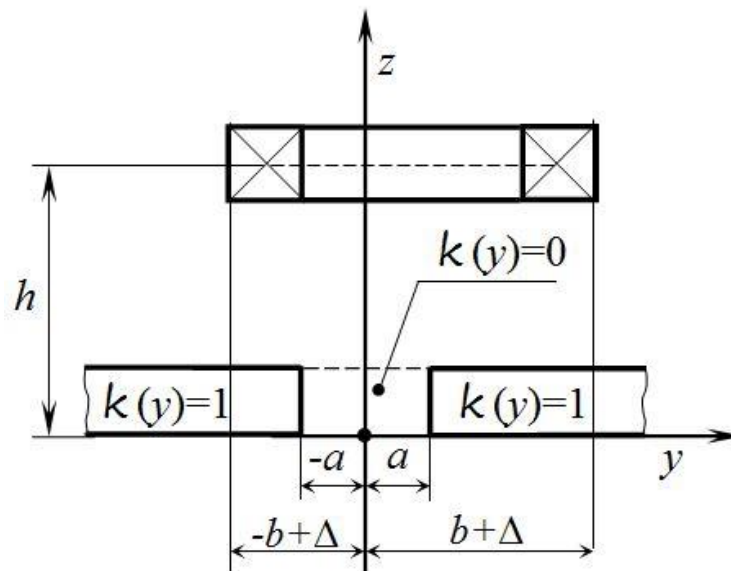


Рис. 2. Расчетная схема транспортной системы ЭДП с продольным стыком в путевом полотне

Задача расчета полей в неоднородном проводящем слое, удельная проводимость которого может зависеть от всех трех координат, рассмотрена в [7], где получено основное интегральное уравнение теории

ЭДЛ, в котором роль неизвестной функции играет фурье-образ вектора напряженности электрического поля E в слое $0 \leq z \leq T$.

В [8] подробно изучен тот частный случай (поперечный стык), когда удельная проводимость зависит только от координаты x , причем эта зависимость имеет вид (1) с заменой y на x . Показано, что при реальных значениях параметров системы к данной задаче применимо приближение тонкого полотна (глубина скин-слоя больше толщины полотна), и в этом приближении получено одномерное интегральное уравнение для фурье-образа x -компоненты вектора E .

Повторяя аналогичные рассуждения и выкладки применительно к случаю продольного стыка, можно получить следующее интегральное уравнение для фурье-образа y -компоненты вектора E .

$$u(y) = \Phi(y) + \frac{i\xi}{\pi r} \int u(y') [K_0(|\xi(y-y')|) - H(y)K_0(|\xi(y'-a)|) - H(-y)K_0(|\xi(y'+a)|)] dy' . \quad (2)$$

Здесь $u(y)$ – фурье-образ E_y по переменной x ; ξ, η – параметры преобразования Фурье по переменным x и y ; $k = \xi e_x + \eta e_y$,

$$k = |k| = \sqrt{\xi^2 + \eta^2};$$

$\Phi(y) = f(y) - H(y)f(a) - H(-y)f(-a)$; $f(y)$ – обратное фурье преобразование функции $f(\eta) = (\mu_0/2k)v\xi^2 V(k)e^{-k\eta}$; $r = 2/l$; $l = \mu_0\sigma_0vT$; v – скорость экипажа, $V(k)$ – фурье-образ по x и y потенциальной функции тока, характеризующей форму и н.с. экипажного электромагнита [9];

$$H(y) = \begin{cases} e^{-|\xi y|}/(2\text{ch}(\xi a)) & y > a \\ 0 & y < -a \end{cases}; K_0 - \text{модифицированная функция}$$

Ханкеля нулевого порядка [10]. При выводе этого уравнения использованы также данные [11].

Расчет левитационных характеристик

Ограничимся рассмотрением случая, при котором ширина воздушного зазора $2a$ мала по сравнению с прочими характерными размерами системы. В этом случае влияние стыка связано главным образом не с отсутствием проводящей среды в зазоре $|y| < a$, а с искажением картины вихревых токов в путевой структуре, которое вызвано отсутствием электрического контакта между областями $y > a$ и $y < -a$. По этой причине уравнение (2) можно заменить его предельным случаем при $a \rightarrow 0$, то есть – уравнением:

$$u(y) = f(y) - f(0)e^{-|\xi, y|} + \frac{i\xi}{\pi r} \left[\int_{-\infty}^{\infty} K_0(|\xi(y-y')|)u(y') - e^{-|\xi, y|} \int_{-\infty}^{\infty} K_0(|\xi y|)u(y) dy \right] \quad (3)$$

Уравнение (3) решается в квадратурах. Для этого удобно проделать в выражении (3) преобразование Фурье по переменной y . Первый интеграл в формуле (3) представляет собой свёртку по переменной y , а второй – скалярное произведение в пространстве $L_2(-\infty < y < \infty)$ функций $K_0(|\xi y|)$ и $u(y)$, поэтому в результате преобразования Фурье они перейдут, соответственно, в произведение и скалярное произведение в $L_2(-\infty < \eta < \infty)$ фурье-образов названных функций. Выразив значение $f(0)$ через фурье-образ функции f и пользуясь данными [11], из (3) можно получить уравнение

$$u(\eta) = f(\eta) - \frac{|\xi|}{\pi k^2} \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta) d\eta + \frac{i\xi}{r} \left[\frac{u(\xi)}{k} - \frac{|\xi|}{\pi k^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(\eta)}{k} \right].$$

Обособив здесь u , стоящее вне интеграла, придём к интегральному уравнению с вырожденным ядром, которое решается стандартным способом [12, 13, 14], и решение которого имеет вид

$$u(\eta) = \frac{r}{kr - i\xi} \left[kf(\eta) - \frac{\gamma |\xi| \int_{-\infty}^{\infty} kf(\eta)/(kr - i\xi) d\eta}{k(\pi + i \operatorname{sign}(\xi) \ln(\lambda + 1)/(\gamma - 1))} \right]; \quad \gamma = \sqrt{r^2 + 1}. \quad (4)$$

Напомним, что функция u есть y -компонента искомого вектора \mathbf{E} . Зная её можно найти все компоненты векторов. Его x -компонента определяется следующим выражением \mathbf{E} и \mathbf{B} [8]. Затем, используя подход [9], аналогично тому, как это сделано в [8], найти силу, действующую на экипажный электромагнит.

Опуская промежуточные выкладки, приведем результирующие формулы, определяющие эту силу

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_0 + \mathbf{f}; \quad \mathbf{F}_0 = 4\mu_0 l \left(\frac{l}{2} \mathbf{e}_z - \mathbf{e}_x \right) \int_0^{\infty} d\xi \int_0^{\infty} d\eta \frac{k^2 \xi^2 e^{-2kh} |\mathbf{V}(\mathbf{k})|^2}{4k^2 - i^2 \xi^2}, \quad (5)$$

$$\mathbf{f} = \frac{\mu_0 \gamma}{2} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \frac{\xi^2}{i\pi \operatorname{sign}(\xi) + \ln \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} d\eta_1 \mathbf{G}_1^- \frac{e^{-k_1 h} \mathbf{V}(\mathbf{k}_1)}{k_1 r - i\xi} \int_{-\infty}^{\infty} d\eta_2 \frac{e^{-k_2 h} \mathbf{V}(\mathbf{k}_2)}{k_2 r - i\xi} \right\} \quad (6)$$

$$\mathbf{k}_{1,2} = \xi \mathbf{e}_x + \eta_{1,2} \mathbf{e}_y; \quad k_{1,2} = |\mathbf{k}_{1,2}|; \quad \mathbf{G}_1^- = i\xi \mathbf{e}_x + \eta_1 \mathbf{e}_y - k_1 \mathbf{e}_z.$$

Конкретизируем полученные соотношения применительно к случаю прямоугольной формы экипажного электромагнита длины $2a$, ширины $2b$. Его боковое смещение относительно плоскости $y = 0$ обозначим через Δ (см. рис.2.). Для описываемого случая

$$V(k) = \frac{2I}{\pi} \frac{\sin a\xi \cdot \sin b\eta}{\eta\xi} e^{-i\eta\Delta}.$$

Подставляя это выражение в (6), можно получить после ряда элементарных преобразований

$$\begin{cases} f_x = C \int_0^\infty \xi \sin^2(a\xi) \operatorname{Im}(\alpha I_1) d\xi; & f_y = C \int_0^\infty \xi \sin^2(a\xi) \operatorname{Re}(\alpha I_1 I_2) d\xi; \\ f_z = C \int_0^\infty \sin^2(a\xi) \operatorname{Re}(\alpha I_1 I_3) d\xi; & \partial f_y / \partial \Delta = C \int_0^\infty \sin^2(a\xi) \operatorname{Re}(\alpha (I_1 I_4 - I_2^2)) d\xi. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $C = \frac{16\mu_0\gamma I^2}{\pi^2}$; $\alpha = \left(\ln \frac{\gamma+1}{\gamma-1} + i\pi \right)^{-1}$; $I_i(\xi) = \int_0^\infty \frac{J_i(\xi) \sin(b\eta)}{kr - i\xi} e^{-k\eta} d\eta$ ($i=1, \dots, 4$);

$$J_1(\eta) = \cos(\Delta\eta)/\eta; \quad J_2(\eta) = \sin(\Delta\eta); \quad J_3(\eta) = k J_1(\eta) \quad J_4(\eta) = \eta \cos(\Delta\eta).$$

Величина $\partial f_y / \partial \Delta$ имеет смысл боковой жёсткости подвеса, её выражение получено дифференцированием формулы для f_y .

Подстановка представленного выше конкретного выражения для $V(k)$ в формулу (5) приводит к её кардинальному упрощению: перейдя в интеграле (5) к полярным координатам k, φ ($\xi = k \cos\varphi, \eta = k \sin\varphi$) можно заметить, что интеграл по k вычисляется аналитически, в результате чего формула для электродинамической силы F_0 приобретает следующий вид

$$F_0 = \frac{\mu_0 l}{\pi^2} \left(\frac{l}{2} \mathbf{e}_z - \mathbf{e}_z \right) \int_0^{\pi/2} \ln \left\{ \frac{(1 + A^2 \cos^2 \varphi)^2 (1 + B^2 \sin^2 \varphi)^2}{(1 + (A \cos \varphi + B \sin \varphi)^2)(1 + (A \cos \varphi - B \sin \varphi)^2)} \right\} \times \\ \times \frac{d\varphi}{\sin^2 \varphi (4 + l^2 \cos^2 \varphi)} \quad (8)$$

Здесь $A = a/h, B = b/h$.

Методика численных расчетов

Для проведения конкретных расчётов по представленным формулам осталось рационально выбрать метод численного интегрирования. Расчет интеграла (8) не вызывает трудностей, для него можно воспользоваться любой несложной квадратурной формулой. Фактически применялась

формула Гаусса с десятью или двадцатью четырьмя (в зависимости от конкретных значений параметров) узлами.

Расчет интегралов, содержащихся в (7), представляет большую трудность вследствие бесконечности промежутка интегрирования и быстрой осцилляции подынтегральной функции. Для расчета интегралов такого типа целесообразно использовать метод Филона [15]. Отметим, что в подынтегральном выражении для $I_1(\xi)$ имеется устранимая особенность: $\sin b\eta$, поэтому при расчёте этого интеграла по методу Филона необходимо отделить некоторую малую окрестность нуля и интеграл по этой окрестности вычислять отдельно.

Анализ результатов расчетов

Результаты проведенных расчетов представлены на Рис. 3, 4. Все графики на этих рисунках изображают зависимость левитационных характеристик от величины бокового смещения экипажного электромагнита относительно симметричного положения. Величина смещения отложена в относительных единицах $\Delta/2b$, где $2b$ – ширина электромагнита. Расчёты отвечают следующему набору данных: высота подвеса $h=22$ см, длина магнита $2a=1$ м, ширина магнита $2b=30$ см, толщина полотна – 5 мм, удельная проводимость материала путевого полотна $\sigma = 3,4 \cdot 10^7$ (Ом·м).

Поскольку цель введения продольного стыка состоит в придании ЭДП боковой устойчивости, наибольший интерес представляет боковая, то есть u -компонента левитационной силы. Зависимость этой компоненты от величины смещения представлена на Рис. 3.

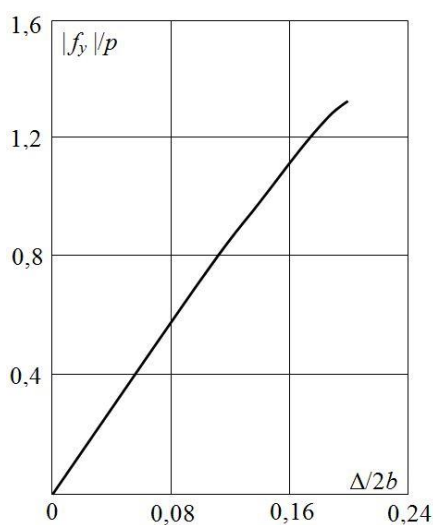


Рис. 3.
Зависимость возвращающей силы от бокового смещения

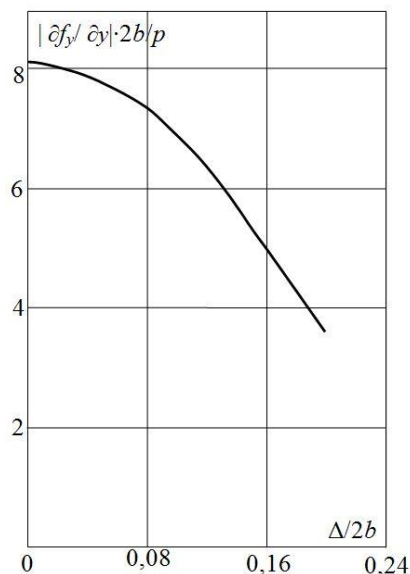


Рис. 4
Зависимость боковой жесткости от смещения Δ

Как видно из этого графика, система подвеса с продольным стыком в полотне обладает боковой устойчивостью (компонента f_y носит характер возвращающей силы).

Речь при этом идёт о статической устойчивости. При малых смещениях зависимость f_y от Δ близка к линейной, с увеличением смещения возвращающая сила увеличивается несколько медленнее линейной функции. По оси ординат на рис. 3 отложено отношение боковой силы к весу экипажа, приходящемуся на один магнит – P , вес этот считается равным подъёмной силе при нулевом смещении. Кривая на рис.4 представляет зависимость боковой жёсткости от смещения Δ . Наибольшей боковой жесткостью подвес обладает при нулевом смещении.

Эта жёсткость ненамного превосходит 0,08 веса экипажа при смещении на одну сотую ширины магнита.

Кривые на Рис. 3, 4 получены из расчётов по представленным выше формулам, отвечающим случаю бесконечно широкого полотна. Поскольку в при такой расчётной модели краевой дестабилизирующий эффект не проявляется, то есть основания полагать, что краевой эффект снизит значение возвращающей силы и боковую жёсткость, тем не менее, система ЭДП с продольным стыком сохранит устойчивость в боковом направлении.

Сравнение предлагаемого способа боковой стабилизации с иными способами приводит к выводу о том, любой из известных способов стабилизации приводит к:

- 1) усложнению конструкции подвеса;
- 2) ухудшению других левитационных характеристик ЭДП.

Рассматриваемый способ стабилизации не является исключением. С точки зрения усложнения конструкции подвеса стабилизация с помощью продольного стыка обладает заметным преимуществом перед другими способами поскольку экипажная часть системы не изменяется вовсе, расход материала на единицу длины трассы остаётся прежним, а усложнение путевого полотна минимально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выражения (5 и 6-7) полностью решают поставленную задачу по определению характеристик боковой стабилизации экипажа с электродинамическим подвесом при наличии продольного стыка в путевом полотне в рамках принятых допущений.

Сравнение с большинством других предлагавшихся способов стабилизации также не позволяет выявить решающих преимуществ или недостатков нового способа. В большинстве случаев его серьёзным недостатком является относительно низкое левитационное качество. Этот недостаток в значительной степени теряет своё значение, если движение экипажа ВСНТ происходит преимущественно с высокой скоростью, при

которой сила аэродинамического сопротивления превалирует над силой электродинамического торможения.

Столь же условным является и упомянутое выше достоинство рассматриваемой системы – *высокая боковая жёсткость*. Причина в том, что требования на боковую жёсткость могут быть количественно сформулированы лишь применительно к конкретной трассе ВСНТ с учётом графика движения и других факторов. Как известно, главными дестабилизирующими воздействиями в боковом направлении являются сила инерции при движении по криволинейному участку и боковой ветер. Интенсивность первого из этих факторов зависит от кривизны пути и скорости движения, второго – от того движется ли экипаж в туннеле, углублении, на уровне земли, или по высокой эстакаде, от формы корпуса экипажа, от требований всепогодности.

Свою роль в выборе системы стабилизации могут сыграть и задачи, решаемые другими подсистемами системы ВСНТ. Игрет роль также принцип действия и конструкция системы тяги. Так, если тяга осуществляется посредством СЛД с вертикальными обмотками, наиболее привлекательным является способ стабилизации с помощью КССНТ (комбинированная система стабилизации, направления, тяги) [16]. В то же время вертикальное расположение электромагнитов тяги накладывает определённые ограничения на конструкцию экипажа и исключает возможность использования СЛД для создания дополнительного подъемного усилия, а последнее могло бы, в частности смягчить недостатки способа стабилизации с помощью стыка в части подъемной силы и левитационного качества.

Из сказанного ясно, что окончательный выбор системы боковой стабилизации на настоящем этапе исследований был бы преждевременным. Предложенный и изученный в этой статье новый способ стабилизации следует рассматривать как ещё один из возможных наряду с предлагавшимися ранее. Ответ на вопрос о конкурентоспособности нового способа должен быть привязан к характеристикам конкретной трассы ВСНТ. Необходимо и дальнейшее уточнение результатов, связанное с более строгим учётом краевого эффекта, а также рассмотрением случая неизолированного стыка.

Библиографический список / References

1. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология. – М: Физматлит, 2014. – 476 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya*. Moscow: Fizmatlit; 2014. 456 p. (In Russ.)]. Доступно по: https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?_ir=1. Ссылка активна на: 03.02.2019.
2. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Транспорт на магнитном подвесе / под ред. А.А. Зайцева. – СПб: ПГУПС, 2010. – 160 с. [Zaitsev AA, Talashkin GN,

- Sokolova IaV. Transport na magnitnom podvese. Zaicev AA, editor. St. Petersburg: PGUPS; 2010. 160 p. (In Russ.).
3. Зайцев А.А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе левитации Труды 2-ой Международной научной конференции «Магнитолевитационные и транспортные системы и технологии. МТСТ'14». Санкт-Петербург, 17–20 июня 2014 года / под ред. проф. Ю. Ф. Антонова, Киров: МЦНИП, 2014. – С. 11–23. [Zaitsev AA. Konteineranii most Sankt-Peterburg – Moskva na osnove levitacii. In: Antonov YuF, editor. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Magnitolevitacionnie transportnie sistemi i tehnologii. MTST'14”. 2014, Jun 17-20; St. Petersburg; 2014. pp. 11-23. (In Russ.)]
 4. Антонов Ю.Ф., Никитин В.В., Хожайнов А.И. Технология HSST в проектах LINIMO и ROTEM. Труды 2-ой Международной научной конференции «Магнитолевитационные и транспортные системы и технологии. МТСТ'14». Санкт-Петербург, 29–31 октября 2013 года / под ред. проф. Ю. Ф. Антонова. – СПб: Pudra, 2013. – С. 133–137. [Antonov YuF, Nikitin VV, Hojainov AI. Tehnologiya HSST v proektah LINIMO i ROTEM In: Antonov YuF, editor. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Magnitolevitacionnie transportnie sistemi i tehnologii. MTST'13”. 2014 Jun 17-20; St. Petersburg: Pudra; 2013. pp. 133-137. (In Russ.)]
 5. Гулин С.А., Никитин В.В., Середа Г.Е. и др. Система электроснабжения собственных нужд высокоскоростных магнитолевитационных экипажей с линейным синхронным тяговым приводом // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 70–83. [Gulin SA, Nikitin VV, Sereda GE, Sereda EG. Power supply system of own needs of MAGLEV vehicles with linear synchronous traction drive. *Transportation Systems and Technology*. 2016;2(3):70-83. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20162370-83.
 6. Воеводский К.Э., Стрепетов В.М. Метод условной границы // Транспортные системы и технологии. – 2016. – № 4. – С. 133–144. [Voevodskii KE, Strepetov VM. The method of conditional boundary. *Transportation Systems and Technology*. 2016;2(3):133-144. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst201623133-144.
 7. Воеводский К.Э. Интегральное уравнение для расчета квазистационарного электромагнитного поля в неоднородном проводящем слое // Известия вузов «Электромеханика». – 1990. – № 2. – С. 13–18. [Voevodskii KE. Integralnoe uravnenie dlya rascheta kvazistacionarnogo elektromagnitnogo polya v neodnorodnom provodyaschem sloe. *Izvestiya vuzov “Elektromehanika”*. 1990;2:13-18. (In Russ.)]
 8. Воеводский К.Э., Стрепетов В.М. Влияние стыков в путевой структуре на характеристики системы электродинамической левитации // Электричество. – 2017. – № 11. – С. 53–60. [Voevodskii KE, Strepetov VM. The Influence of Joints in the Track Structure on the Electrodynamics Levitation System Performance. *Elektrichestvo*. 2017; 11:53-60. (In Russ.)]. doi: 10.24160/0013-5380-2017-11-53-60.
 9. Воеводский К.Э., Мелик-Бархударян В.К. О расчете магнитного поля заданной системы токов // Известия Академии наук СССР «Энергетика и транспорт». – 1989. – № 4. – С. 166–169. [Voevodskii KE, Melik-barhudaryan VK. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 1989;4:166-169. (In Russ.)].
 10. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 2 т. Т. 2. – М: Наука, 1966. – 800 с. [Fikhtengol's GM. *Kurs differencial'nogo i integral'nogo ischisleniya*. Vol. 2. Moscow: Nauka; 1966. 800 p. (In Russ.)].
 11. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Т.1. – М: Наука, 1969. – 110 с. [Beitmen G, Erdeii A. *Tablici integralnih preobrazovanii*. Vol. 1. Moscow: Nauka; 1969. 110 p. (In Russ.)].

12. Забрейко П.П., Кошелев А.И., Красносельский М.А. и др. Интегральные уравнения. – М: Наука, 1968, 448 с. [Zabreiko PP, Koshelev AI, Krasnoselsky MA, et al. *Integralnie uravneniya*. Moscow: Nauka; 1968. 448 p. (In Russ.)].
13. Краснов М.Л. Интегральные уравнения. Введение в теорию. – М: Наука, 1975. – 302 с. [Krasnov ML. *Integralnie uravneniya. Vvedenie v teoriyu*. Moscow: Nauka; 1975. 302 p. (In Russ.)].
14. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. IV. – М: Наука, 1974, – С. 339–387. [Smirnov VI. *Kurs visshei matematiki*. Vol. IV. Moscow: Nauka; 1974. 387 p. (In Russ.)].
15. Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И. Вычислительные методы, Т. 1. – М: Наука, 1976 – 304 с. [Krilov VI, Bobkov VV, Monastirskii PI. *Vichislitelnye metodi*. Vol.1. Moscow: Nauka; 1976, 304 p. (In Russ.)].
16. Дроздов С.В., Матин В.И., Чернышёв С.В. Характеристики систем синхронной тяги и направления экипажей высокоскоростного транспорта // Известия вузов «Электромеханика». – 1983. – № 2. – С. 43–47. [Drozdov SV, Matin VI, Chernyshev SV. *Harakteristiki sistem sinhronnoi tyagi i napravleniya ekipazhei visokoskorostnogo transporta. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika*. 1990;2:13-18. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Воеводский Константин Эммануилович, к.т.н., доцент;
eLibrary SPIN: 2579-7541; ORCID: 0000-0002-0519-5527;
E-mail: kv5832@mail.ru

Стрепетов Владимир Михайлович, к.т.н., доцент;
eLibrary SPIN: 4649-2141; ORCID: 0000-0002-4072-4519;
E-mail: strepetov.vm@mail.ru

Серeda Геннадий Евгеньевич, к.т.н., доцент;
eLibrary SPIN: 9682-8744; ORCID: 0000-0003-0754-6682;
E-mail: gennady.sereda@mail.ru

Information about authors:

Konstantin E. Voevodskii, Ph.D., assistant professor;
eLibrary SPIN: 2579-7541; ORCID: 0000-0002-0519-5527;
E-mail: kv5832@mail.ru

Vladimir M. Strepetov, Ph.D., assistant professor;
eLibrary SPIN: 4649-2141; ORCID: 0000-0002-4072-4519;
E-mail: strepetov.vm@mail.ru

Gennadiy E. Sereda, Ph.D., assistant professor;
eLibrary SPIN: 9682-8744; ORCID: 0000-0003-0754-6682;
E-mail: gennady.sereda@mail.ru

Цитировать:

Воеводский К.Э., Стрепетов В.М., Серeda Г.Е. Левитационные характеристики транспортной установки с электродинамическим подвесом при наличие продольного стыка в путевом полотне // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т.5. – № 2. – С. 70–82. doi:10.17816/transsyst20195270-82

To cite this article:

Voevodskii KE, Strepetov VM, Sereda GE. Levitation characteristics of a transport installation with an electrodynamic suspension during a longitudinal joint with road track. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):70-82. doi: 10.17816/transsyst20195270-82