

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 629.439:621.318.38:537.82

DOI10.17816/transsyst20206247-60

© К. К. Ким, В. В. Вешкин, И. Р. Крон

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЛЕВИТАЦИОННОГО ПОЛОТНА

Обоснование: при создании транспортных систем с магнитным подвесом важное значение играет вопрос уменьшение металлоемкости левитационного полотна.

Цель: разработать обоснованные рекомендации по выбору геометрических размеров левитационного полотна.

Методы: использовались основные положения теории электромагнитного поля и аспекты теории Фурье.

Результаты: обоснованы оптимальные значения ширины и толщины левитационного полотна.

Заключение: при выборе ширины полотна следует руководствоваться соображениями, связанные с расходом материала и с появлением боковых электромагнитных сил, величина которых тем значительнее, чем больше отношение поперечного смещения соленоида возбуждения к ширине полотна. С точки зрения электродинамики величину порядка нескольких сантиметров можно рассматривать как верхний предел толщины полотна.

Ключевые слова: левитационное полотно, сверхпроводящий соленоид, подъемная сила, тормозная сила, краевые эффекты, левитационное качество.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field –Electrical Engineering

© К. К. Kim, V.V. Veshkin, I. R. Kron

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

CALCULATION OF GEOMETRIC DIMENSIONS OF THE LEVITATION TRACK

Background: The problem to reduce the metal content of the levitation track is important when we create the transport systems with magnetic suspension.

Aim is develop the reasonable recommendations to choose the geometric dimensions of the levitation track.

Methods: we used the main provisions of the electromagnetic field theory and the aspects of the Fourier theory.

Results: the optimal values of the width and thickness of the levitation track are justified.

Conclusion: when we choose the width of the track we should be guided by considerations related to material consumption and the appearance of the side electromagnetic forces. The values of these forces are bigger the greater the ratio of the transverse displacement of the excitation solenoid to the track width. From the point of view of electrostatics the value of the order of several centimeters we can consider as the upper limit of the track thickness.

Keywords: levitation track, superconducting solenoid, levitation force, drag force, edge effects, levitation quality.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время среди потенциально возможных решений проблемы высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) являются системы, в которых подвижной состав (экипаж) движется в трубе с разреженной атмосферой, что обеспечивает низкое значение аэродинамического сопротивления и независимость от внешних условий. Высокие скорости (600 км/ч и выше), развиваемые транспортом такого рода, требуют инженерного решения ряда вопросов, например, вопроса замены традиционной пары «колесо-рельс», которая не справляется со своими обязанностями при таких скоростях. Наиболее достойной заменой являются системы магнитной левитации [1].

В настоящей работе рассматривается система магнитной левитации отталкивания (электродинамического типа). Принцип последней, как известно, основан на использовании электромагнитных сил, образующихся при взаимодействии магнитного поля движущихся сверхпроводящих соленоидов, расположенных на экипаже, с вихревыми токами, индуцированными им в электропроводящей структуре, находящейся на путевом полотне. Возможны два варианта выполнения данной электропроводящей структуры: в виде сплошным полотном либо в виде периодической дискретной катушечной структуры [2].

В данной работе рассматривается вариант со сплошной полосой, здесь основной задачей является рациональный выбор поперечных размеров полотна, что связано с уменьшением металлоемкости последнего. В работе будет обсужден вопрос об условиях этого выбора, исходя из требований электродинамики системы левитации.

I. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Для решения указанной задачи необходимо рассмотреть электромагнитные силы в системы с учетом краевых эффектов. При этом достаточно ограничиться случаем, когда источник содержит один соленоид (его будет имитировать прямоугольная рамка с током). Рассмотрим модель, представленную на Рис. 1. Здесь обозначены: d – ширина и толщина полотна, μ и σ – магнитная проницаемость и проводимость полотна ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$), $2a$ и $2b$ – размеры рамки с током I , h – высота подвеса. Токовая рамка движется параллельно потоку в направлении x со скоростью v . Координатная система xuz связана с рамкой. Аналогичная модель, но при полотне бесконечных размеров рассматривалась в [3].

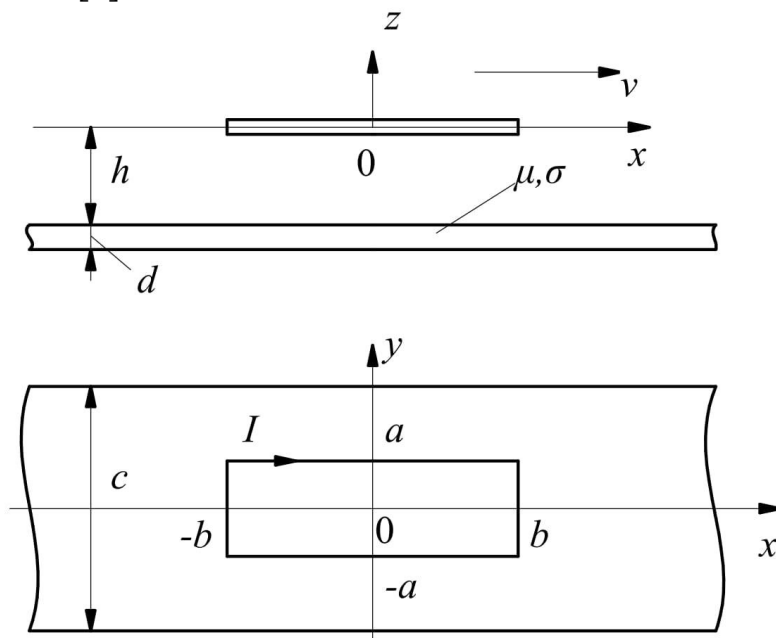


Рис. 1. Схема системы магнитной левитации

Электромагнитные процессы в полотне описываются уравнением диффузии магнитного поля

$$\Delta \mathbf{B} = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{B} = \mathbf{e}_x B_x + \mathbf{e}_y B_y + \mathbf{e}_z B_z$, \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y , \mathbf{e}_z – орты, Δ – трехмерный лапласиан. Во всем остальном пространстве имеет силу уравнение Лапласа. В системе координат xuz (они неподвижны относительно токовой рамки) уравнение (1) получает вид:

$$\Delta \mathbf{B} = \mu \sigma v \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x}. \quad (2)$$

Переход от уравнения (1) к (2) строго справедлив при постоянной скорости токовой рамки. Однако он допустим и в условиях переменной скорости, если при этом не возникают (либо они незначительны) переходные электромагнитные процессы.

Как можно видеть из приводимых ниже рис. 5 и 6 система левитации при высоких скоростях источника отличается высокой инерционностью в электромагнитном отношении.

Заменим источник слоем тока с полностью $\mathbf{J}(x, y)$, равной

$$\mathbf{J}(x, y) = \mathbf{e}_x J_x(x, y) + \mathbf{e}_y J_y(x, y). \quad (3)$$

Полагаем, что указанный слой совпадает с проекцией полотна на плоскость xu . В соответствии с геометрией рассматриваемой модели можем записать

$$J_x(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \sin \frac{\pi n}{c} y \int_{-\infty}^{\infty} J_x(k_x, n) e^{ik_x x} dk_x, \quad (4)$$

$$J_y(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \cos \frac{\pi n}{c} y \int_{-\infty}^{\infty} J_y(k_x, n) e^{ik_x x} dk_x. \quad (5)$$

Здесь k_x – волновой вектор в направлении x ,

$$J_x(k_x, n) = \frac{8I}{ck_x} \sin \frac{\pi n}{c} a \sin k_x b, \quad (6)$$

$$J_y(k_x, n) = i \frac{8I}{\pi n} \sin \frac{\pi n}{c} a \sin k_x b. \quad (7)$$

Таким образом, задача о магнитном поле в рассматриваемой системе сводится к решению уравнений (2) и Лапласа при источнике, определяемом соотношениями (3)–(7). Эти решения должны удовлетворять условиям стыковки поля на границах областей, условиям бесконечности

$$j_y \Big|_{y=\pm c/2} = 0,$$

где j_y – y -компонента плотности тока в полотне.

В силу линейности задачи искомые решения не должны отличаться по структуре от соотношений (4) и (5). Имея в виду это, можно рассчитать вихревое поле во всех областях рассматриваемой системы, но для дальнейшего достаточно знать это поле только в плоскости токовой рамки. Оно дается соотношениями

$$B_x = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \cos \frac{\pi n}{c} y \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_x e^{ik_x x} dk_x, \quad (8)$$

$$B_y = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \sin \frac{\pi n}{c} y \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_y e^{ik_x x} dk_x, \quad \varphi_y = i \frac{\pi n}{ck_x} \varphi_x, \quad (9)$$

$$B_z = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \cos \frac{\pi n}{c} y \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_z e^{ik_x x} dk_x, \quad \varphi_z = i \frac{k}{k_x} \varphi_x, \quad (10)$$

где

$$\varphi_x = \mu_0 J_y(k_x, n) \left[\frac{1+\beta-(1-\beta)e^{-2\beta kd}}{(1+\beta)^2-(1-\beta)^2 e^{-2\beta kd}} - \frac{1}{2} \right] e^{-2kh},$$

$$\beta = \beta_1 - i\beta_2 = \frac{1}{k} \left[k_x^2 - \left(\frac{\pi n}{c} \right)^2 - i\lambda k_x \right]^{1/2},$$

$$k = \left[k_x^2 + \left(\frac{\pi n}{c} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad \lambda = \mu_0 \sigma v.$$

II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ

Электромагнитные силы, действующие на токовую рамку, образуются за счет взаимодействия вещественной части вихревого поля (8)–(10) с током в рамке [4–8]. Эти силы равны

$$F_x = -\frac{8\mu_0 I^2}{\pi^2} \cdot D, \quad F_z = -\frac{8\mu_0 I^2}{\pi^2} \cdot L. \quad (11)$$

Здесь $8\mu_0 I^2 / \pi^2$ – нормирующий множитель, D и L – безразмерные силы торможения и левитации соответственно. Последние рассчитываются по формулам

$$D = \frac{2c}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{\pi n}{c} a \int_0^{\infty} \frac{k}{k_x} Z_x e^{-2kh} \sin^2 k_x b dk_x, \quad (12)$$

$$L = \frac{2c}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \sin^2 \frac{\pi n}{c} a \int_0^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} + \frac{1}{\left(\frac{ck_x}{\pi} \right)^2} \right] Z_z e^{-2kh} \sin^2 k_x b dk_x, \quad (13)$$

где

$$Z_x = \frac{\beta_1 \beta_2 [(1+\beta_1)+(1-\beta_1)e^{-4\beta_1 kd} + 2(\beta_1 \sin 2\beta_2 kd - \cos 2\beta_2 kd)e^{-2\beta_1 kd}]}{\beta_1^2 [(1+\beta_1)^2 + (1-\beta_1)^2 e^{-4\beta_1 kd}] - 2\beta_2^2 [2\beta_2 \sin 2\beta_2 kd - (1-\beta_2^2) \cos 2\beta_2 kd] e^{-2\beta_1 kd}}, \quad (14)$$

$$Z_z = 1 - \frac{\beta_1 [(1+\beta_1)^2 - (1-\beta_1)^2 e^{-4\beta_1 kd}] + 2\beta_2 [(1-\beta_2^2) \sin 2\beta_2 kd + 2\beta_2 \cos 2\beta_2 kd] e^{-2\beta_1 kd}}{\beta_1^2 [(1+\beta_1)^2 + (1-\beta_1)^2 e^{-4\beta_1 kd}] - 2\beta_2^2 [2\beta_2 \sin 2\beta_2 kd - (1-\beta_2^2) \cos 2\beta_2 kd] e^{-2\beta_1 kd}}. \quad (15)$$

Теперь можно рассмотреть частные случаи.

При бесконечно толстом полотне ($d=\infty$) из (14) и (15) имеем

$$Z_x = \frac{\beta_2}{\beta_1(1+\beta_1)}, \quad Z_z = 1 - \frac{1}{\beta_1}.$$

Если к тому же $\lambda \rightarrow \infty$ (случай идеально проводящего полотна, существенно высокой скорости движения токовой рамки), то $\beta_1, \beta_2 \rightarrow \infty$ и $Z_x=0$, $Z_z=1$. Следовательно, тормозящая сила исчезает (отсутствуют джоулевые потери в полотне), а подъемная сила достигнет верхнего предела.

При бесконечно широком полотне ($c=\infty$) в (12) и (13) можно совершить предельный переход. Так как при этом $\frac{\pi n}{c} \rightarrow k_y$, где k_y – волновой вектор в направлении y , $2 \frac{\pi}{c} \sum \rightarrow \int_0^\infty dk_y$, то из (12) и (13) получим результаты, приведенные в работе [3]

$$D = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{k}{k_x k_y^2} Z_x e^{-2kh} \sin^2 k_x b \sin^2 k_y dk_x dk_y,$$

$$L = \int_0^\infty \int_0^\infty \left(\frac{1}{k_x^2} + \frac{1}{k_y^2} \right) Z_z e^{-2kh} \sin^2 k_x b \sin^2 k_y a dk_x dk_y.$$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На Рис. 2–8 представлены результаты расчетов безразмерных сил торможения (D) и левитации (L) по приведенным формулам. Расчеты выполнялись при следующих размерах токовой рамки и параметрах левитационного полотна: $a=0,25$ м, $b=1,5$ м, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн · м⁻¹, $\sigma = 3,57 \cdot 10^{-7}$ Ом⁻¹ · м⁻¹. Из этих рисунков можно получить представление о силовых характеристиках левитационной системы с учетом краевых эффектов.

В полотне ограниченной ширины нет растекания токов, которое наблюдается в неограниченной плите. Это приводит к увеличению плотности этих токов, следовательно, и электромагнитных сил (Рис. 2, 3). Однако, указанное увеличение тем значительнее, чем меньше высота подвеса соленоида, поскольку с ее уменьшением поле соленоида в полотне растет быстрее, чем за его пределами (в плоскости полотна). При рекомендуемых в литературе значениях высоты электродинамического подвеса с использованием сверхпроводящих соленоидов возбуждения (0,2–0,3 м) краевой эффект, обусловленный ограниченностью ширины полотна, проявляется умеренно и им можно пренебречь, если ширина

полотна удовлетворяет следующему условию $c \geq 2a(1 + 5 \frac{a}{a+h})$. Это следует из Рис. 2 и 3, где пунктирные линии дают значения электромагнитных сил при бесконечно широком полотне.

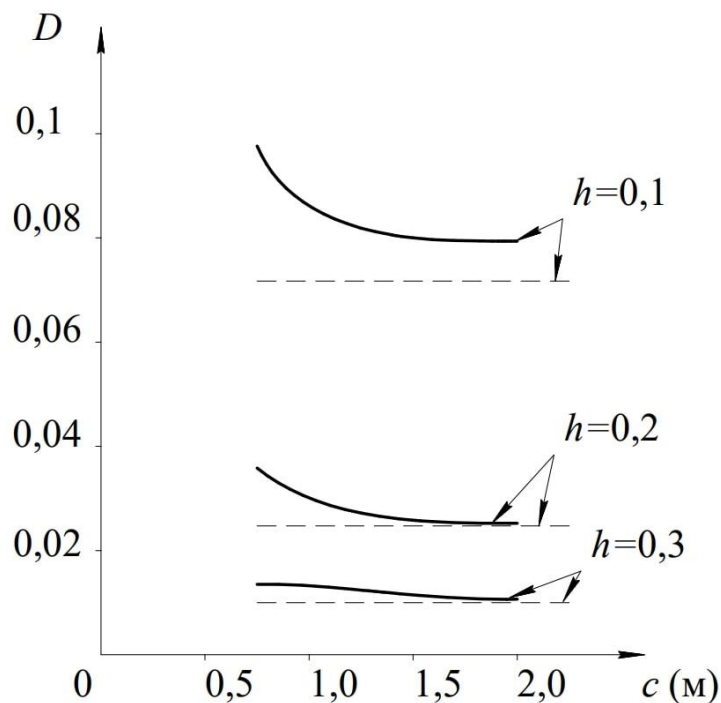


Рис. 2. Зависимость сил торможения D от ширины полотна при различных значениях высоты подвеса h

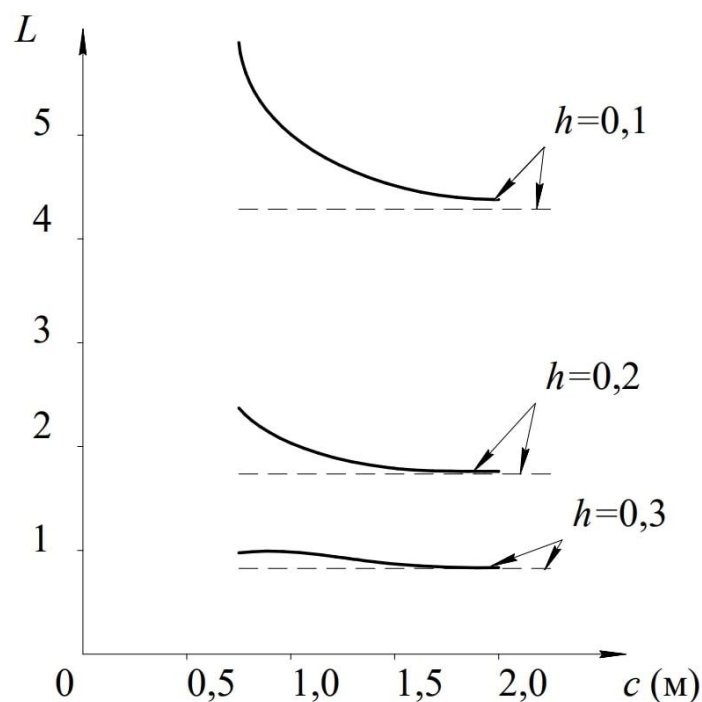


Рис. 3. Зависимость сил левитации L от ширины полотна при различных значениях высоты подвеса h

Критерием совершенства системы подвеса в электромагнитном отношении может служить отношение $F_L/F_D = L/D$, известное под названием левитационного качества [9–15]. Из рис. 4 видно, что эта величина незначительно зависит от ширины полотна и находится на уровне, соответствующем полотну неограниченных размеров (пунктирные линии). Поэтому при выборе ширины полотна следует руководствоваться соображениями, связанные с расходом материала и с появлением боковых электромагнитных сил, величина которых тем значительнее, чем больше отношение поперечного смещения соленоида возбуждения к ширине полотна. Возможно, указанные противоречивые соображения будут согласованы, если ширину полотна оценить по формуле $c = 2a(1 + \frac{a}{a+h})$.

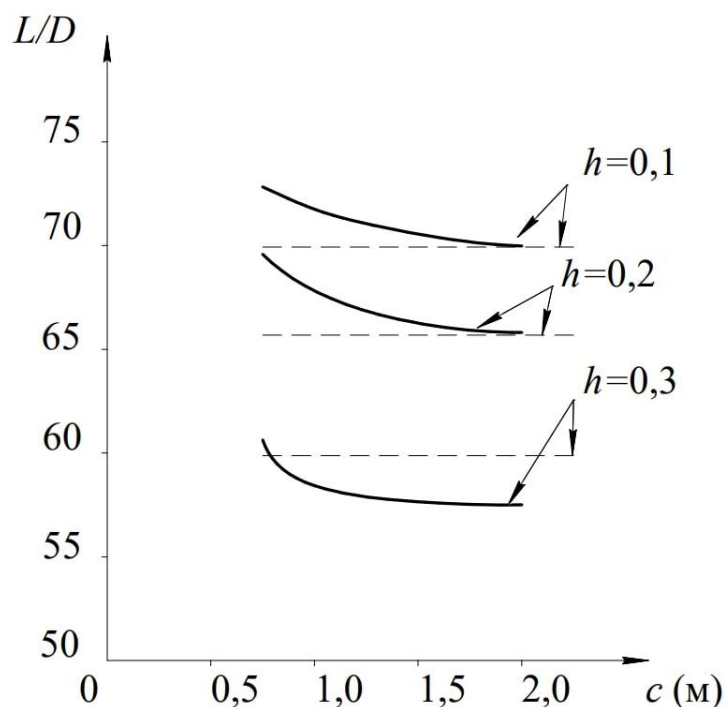


Рис. 4. Зависимость левитационного качества L/D от ширины полотна c при различных значениях высоты подвеса h

С уменьшением толщины полотна растет плотность вихревых токов. В связи с этим с этим увеличиваются джоулевые потери в полотне, следовательно, и тормозная сила (Рис. 5). Однако, из-за скин-эффекта, толщина полотна при высоких скоростях соленоида проявляются в меньшей степени. Поэтому с увеличением скорости соленоида зависимость электромагнитных сил от толщины полотна становится более слабой. Это касается как тормозной, так и подъемной силы (Рис. 6).

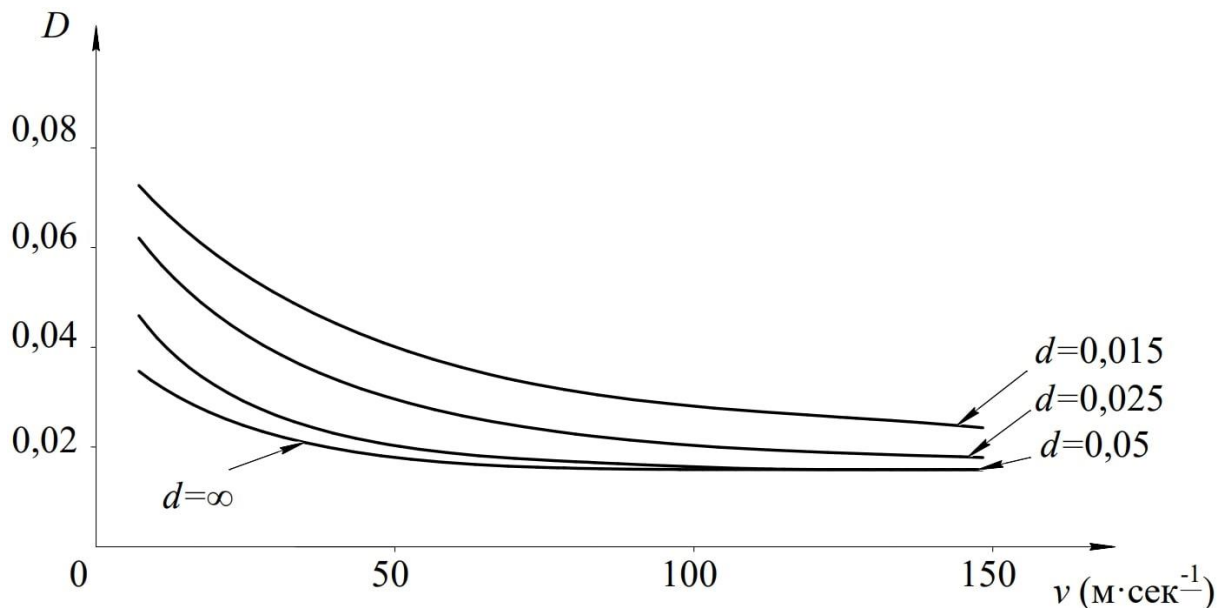


Рис. 5. Зависимость сил торможения D от скорости v при различных значениях толщины полотна d

В тонком полотне плотность вихревых токов (x -компонента) распределяется более равномерно по ширине полотна. Это вызывает ослабление вихревого поля в области, занятой продольными сторонами соленоида, и приводит к соответствующему изменению подъемной силы с уменьшением толщины полотна (Рис. 6).

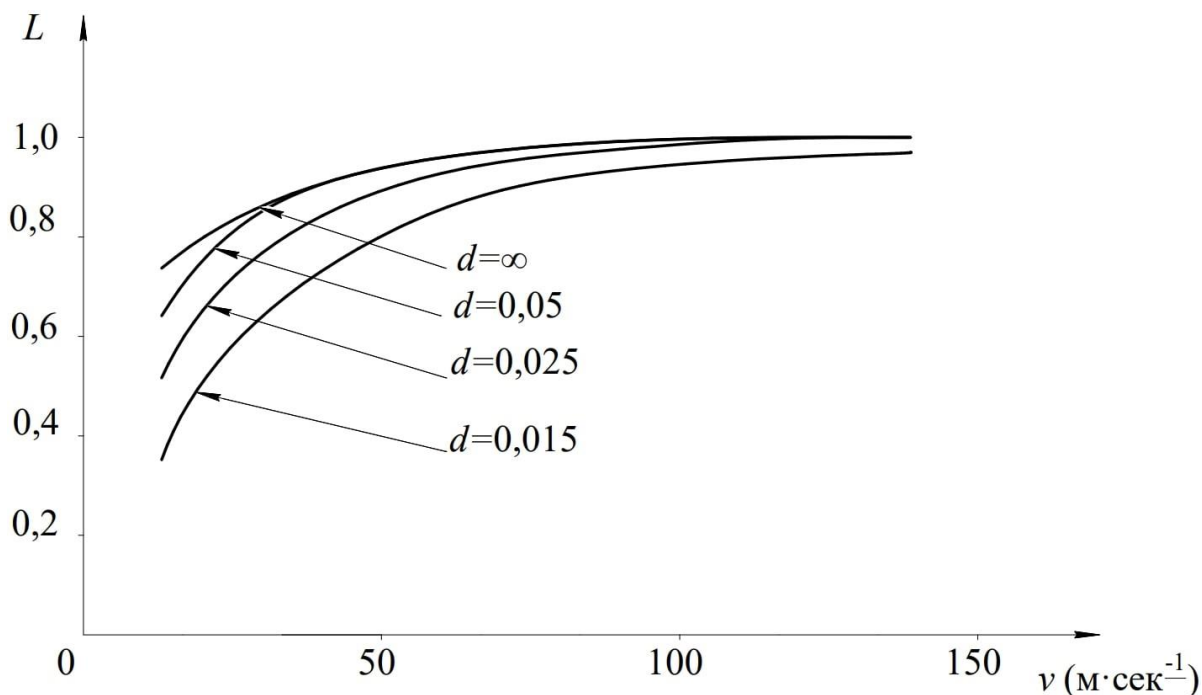


Рис. 6. Зависимость сил левитации L от скорости v при различных значениях толщины полотна d

Левитационное качество заметно зависит от толщины полотна (Рис. 7). Ухудшение этого показателя с уменьшением толщины объясняется ростом джоулевых потерь в полотне (Рис. 5), в то время как подъемная сила приближается к одному уровню. При толщине полотна $\sim 0,05$ м левитационное качество достигает уровня, соответствующего бесконечно толстому полотну. Эти закономерности наблюдаются и при других значениях ширины полотна (Рис. 8). Таким образом, с точки зрения электродинамики величину $\sim 0,05$ м можно рассматривать как верхний предел толщины полотна. Вопрос о конкретном значении толщины полотна, которая будет меньше $0,05$ м, должен решаться в соответствии с требованиями, связанными с механической прочностью и жесткостью полотна в условиях импульсивного действия механической и тепловой нагрузки.

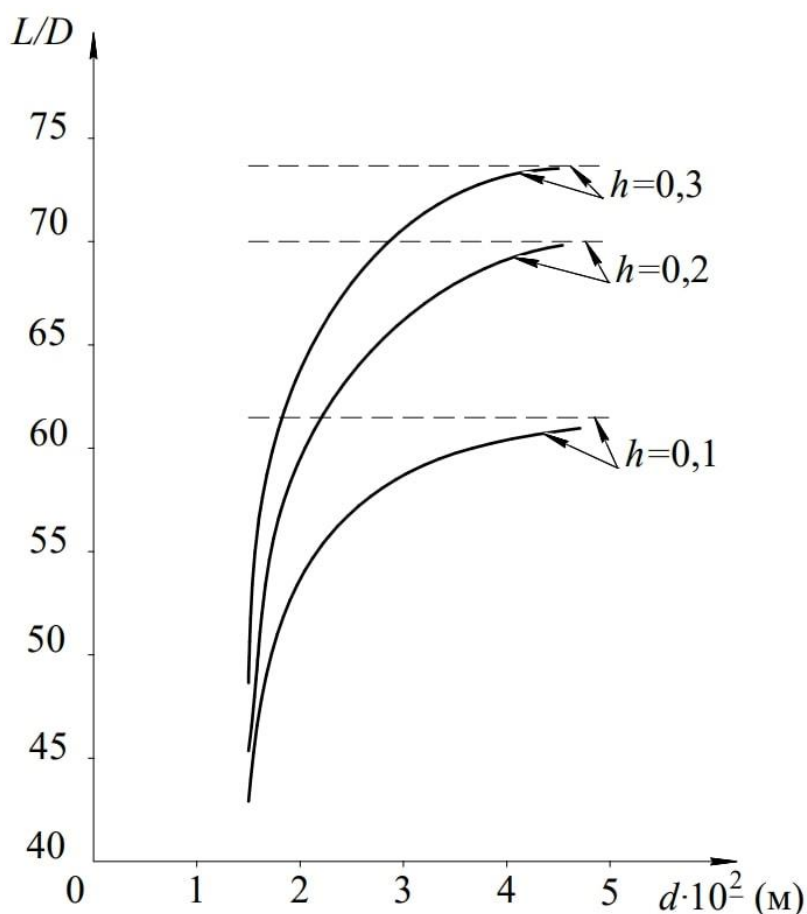


Рис. 7. Зависимость левитационного качества L/D от толщины полотна d при различных значениях высоты подвеса h

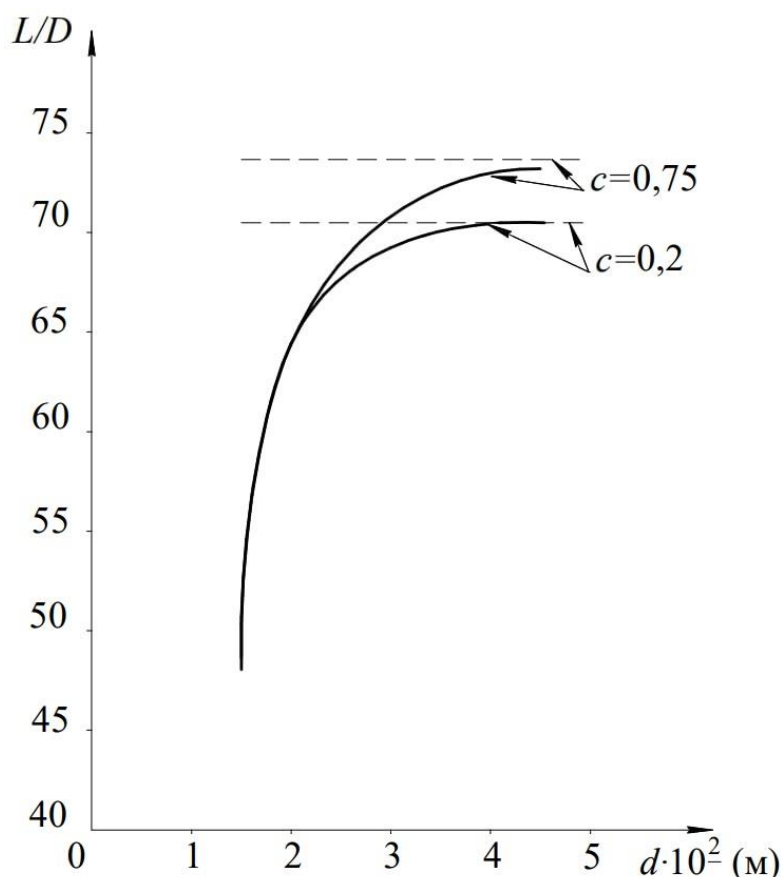


Рис. 8. Зависимость левитационного качества L/D от толщины полотна d при различных значениях ширины полотна c

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выборе ширины левитационного полотна следует руководствоваться соображениями, связанными с минимизацией расхода металла, и с появлением боковых электромагнитных сил дестабилизирующего характера, величина которых тем значительнее, чем больше отношение поперечного смещения соленоида возбуждения к ширине полотна. С точки зрения электродинамики величину порядка нескольких сантиметров можно рассматривать как верхний предел толщины левитационного полотна.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Borcherts RH, Davis LC, Reitz JR, Wilkie DF. Baseline specifications for a magnetically suspended highspeed vehicle. Proc. IEEE. 1973;61(5):569-578. doi: 10.1109/PROC.1973.9113
2. Gutberlet H. The German magnetic transportation program. IEEE Transactions on Magnetics. 1974;10(3):417-420. doi: 10.1109/tmag.1974.1058431
3. Reitz JR, Davis LC. (). Force on a Rectangular Coil Moving above a Conducting Slab. Journal of Applied Physics, 1972;43(4):1547-1553. doi: 10.1063/1.1661359
4. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости (монография). – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 360 с. – ISBN 978-5-89035-527-0. [Kim KK. *Sistemy elektrodvizheniy s ispol'zovaniyem magnitnogo podvesa i sverkhprovodimosti* (monograph). Moscow: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte; 2007. 360 p. (In Russ.)].
5. Кузнецов А.А., Мешкова О.Б. Модернизация спектрального оборудования для диагностирования и ремонта подвижного состава // Транспорт Урала. – 2009. – № 2. – С. 86–90. [Kuznetsov AA, Meshkova OB. Spectral equipment retrofit for rolling stock diagnosis and repair. *Transport Urala*. 2009;2:86-90. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.usurt.ru/transporturala/rus/magazines>. Ссылка активна на: 25.02.2020.
6. Бахвалов Ю.А., Бочаров В.И., Винокуров В.А., Нагорский В.Д. Транспорт с магнитным подвесом / под ред. В.И. Бочарова. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с. [Bakhvalov YuA, Bocharov VI, Vinokurov VA, Nagorskiy VD. *Transport s magnitnym podvesom*. Bocharov VI, editor. Moscow: Mashinostroyeniye; 1991. 320 p. (In Russ.)]. Доступно по <http://padabum.com/d.php?id=38516>. Ссылка активна на: 25.02.2020.
7. Бочаров В.И., Салли И.В., Дзензерский В.А. Транспорт на сверхпроводящих магнитах / под ред. Ю.А. Бахвалова. Ростов: Изд-во Ростовского университета, 1988. – 152 с. [Bocharov VI, Salli IV, Dzenzerskiy VA. *Transport na sverkhprovodyashchikh magnitakh*. Bakhvalov YuA, editor. Rostov: Izd-vo Rostovskogo universiteta; 1988. 152 p. (In Russ.)].
8. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014 476 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://book2.org/book/2901328/800f1a>. Ссылка активна на: 25.02.2020.
9. Кузнецов А.А., Зверев А.Г., Бураченко К.А., Власов В.С., и др. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с электромеханическими коммутационными элементами / Сборник трудов международной научно-практической конференции «Инженерные и научные приложения с использованием технологий National Instruments – 2012». 6–7 декабря 2012 года; – М.: МТУСИ, 2012. – С. 231–233. [Kuznetsov AA, Zverev AG, Burachenko KA, Vlasov VS, et al. *Issledovaniye perekhodnykh protsessov v lineynykh elektricheskikh tsepyakh s elektromekhanicheskimi kommutatsionnymi elementami*. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Inzhenernyye i nauchnyye prilozheniya s ispol'zovaniyem tekhnologiy National Instruments – 2012”. 2012 Dec 6–7; Moscow: MTUSI; 2012. pp.231–233 (In Russ.)]. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22849447>

Ссылка активна на: 25.02.2020.

10. Иванов С.Н. Системы управления электротехническими устройствами для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3. – С. 249–257. [Ivanov SN. Electrical Devices Control Systems for Thermal Energy Generation and Heat Carrier Transportation. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2010; (3): 249-257. (In Russ)]. Доступно по <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-upravleniya-elektrotehnicheskimi-ustroystvami-dlya-generatsii-teplovoy-energii-i-transportirovaniya-teplonositelya>. Ссылка активна на: 25.02.2020.
11. Никитин В.В., Стрепетов В.М. Энергообеспечение бортовых электромагнитов комбинированной системы левитации и тяги на переменном токе // Транспортные системы и технологии. – 2017, – Т. 3. – № 3. – С. 25–38. [Nikitin VV, Strepetov VM. Vehicle Electromagnets Energy Supply of A.C. Combined Levitation and Traction System. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(3):25-38. (Russ., Engl.)]. doi.org/10.17816/transsyst20173272-74
12. Никитин В.В., Стрепетов В.М., Волювач А.С. Варианты схем электроснабжения транспортного средства с комбинированной системой левитации и тяги на переменном токе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3–4, – С. 54–62. [Nikitin VV, Strepetov VM, Volyuvach AS. Variants of electric supply schemes for the vehicle with alternative current levitation and traction combined system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2010;(3-4):54-62. (In Russ.)]. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15211805>. Ссылка активна на: 25.02.2020.
13. Никитин В.В., Стрепетов В.М. Оценка энергетической эффективности пусковых режимов работы комбинированной системы левитации и тяги на однофазном переменном токе // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 2(7). – С. 145–159. [Nikitin VV, Strepetov VM. Otsenka energeticheskoy effektivnosti puskovykh rezhimov raboty kombinirovannoy sistemy levitatsii i tyagi na odnofaznom peremennom toke. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2006;(2):145-159. (In Russ.)]. Доступно по <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-energeticheskoy-effektivnosti-puskovyh-rezhimov-raboty-kombinirovannoy-sistemy-levitatsii-i-tyagi-na-odnofaznom-peremennom>. Ссылка активна на: 25.02.2020.
14. Сика З.К., Куркалов И.И., Петров Б.А. Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем. – Рига: Зинатне, 1988. – 258 с. [Sika ZK, Kurkalov II, Petrov BA. *Elektrodinamicheskaya levitatsiya i lineynyye sinkhronnyye dvigateli transportnykh sistem*. Riga: Zinatne; 1988. 258 p. (In Russ.)]
15. Кочетков В.М. О левитационном качестве систем электродинамического подвешивания со сплошной путевой структурой // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1983. – № 2. – С. 5–10. [Kochetkov VM. O levitatsionnom kachestve sistem elektrodinamicheskogo podveshivaniya so sploshnoy putevoy strukturoy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 1983;(2):5-10. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор;
адрес: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Вешкин Вадим Витальевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 1829-2845; ORCID: 0000-0002-7363-9919;
E-mail: vadim.veshkin@mail.ru

Крон Игорь Романович, студент;
eLibrary SPIN: 6604-2966; ORCID: 0000-0003-1690-0524;
E-mail: mechenu@yandex.ru

Information about the authors:

Konstantin K. Kim Doctor of Technical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Vadim V. Veshkin, graduate student;
eLibrary SPIN: 1829-2845; ORCID: 0000-0002-7363-9919;
E-mail: vadim.veshkin@mail.ru

Igor R. Kron, student;
eLibrary SPIN: 6604-2966; ORCID: 0000-0003-1690-0524;
E-mail: mechenu@yandex.ru

Цитировать:

Ким К.К., Вешкин В.В., Крон И.Р. Расчет геометрических размеров левитационного полотна // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 47–60. doi: 10.17816/transsyst20206247-60

To cite this article:

Kim KK, Veshkin VV, Kron IR. Calculation of Geometric Dimensions of the Levitation Track. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(2):47-60. doi: 10.17816/transsyst20206247-60