

С.Т. Ахатов , **В.Г.Солоненко, Н.М.Махметова**
Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан
E-mail: semyat@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА ЭКИПАЖА ПРИ ЛЕВИТАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Аннотация. Система электромагнитного подвеса основана на эффекте магнитного притяжения электромагнита к феррорельсу. Сила притяжения к феррорельсу, называемая подъемной, должны уравновешивать все нагрузки, действующие на экипаж, в том числе и силу веса экипажа.

При движении электромагнита вдоль феррорельса в них наводятся вихревые токи, создающие магнитный поток. Для удержания экипажа над путевой структурой в общем случае необходимы две стабилизирующие системы; в вертикальной и горизонтальной плоскости. Одна из них осуществляет магнитное подвешивание экипажа в вертикальной плоскости другая является направляющей. Для этих целей целесообразно применять постоянные электромагниты в комплексе с электромагнитами.

В статье показана методика расчета конструктивных параметров электромагнитного подвеса, влияющих на качество левитационного движения экипажа.

Ключевые слова. Электромагнитный подвес, феррорельс, левитация, магнитный поток, магнитное поле, подъемная сила, горизонтальная сила, вихревые токи, торможение.

Введение.

Важным этапом проектирования системы электромагнитного подвеса является задача выбора из множества альтернативных вариантов одного варианта системы для дальнейшей детальной расчетной и конструкторской разработки.

Для детального расчета необходима последовательность расчета функциональных систем магнитного подвеса в зависимости от множества факторов. В известной методике подобного расчета [1], которая базируется на общей оптимизационной одноэтапной процедуре не учтены конструктивные формы магнитопровода электромагнита и не конкретизирована величина воздушного зазора между электромагнитом и феррорельсом, что является важным фактором при решении подобной задачи.

Материалы и методы.

Многочисленными экспериментами в области исследования эффекта магнитного притяжения электромагнита к феррорельсу для экипажей высокоскоростного наземного транспорта установлено, что взаимное влияние процессов регулирования тяговых и подъемных усилий незначительна [2].

Наиболее перспективным для этой цели является применение постоянных магнитов в комплексе с электромагнитами или применение только постоянных магнитов.

При выборе параметров магнитного подвеса экипажа необходимо выполнить расчеты электромагнитного подвеса и направления, режимы и условия работы, особенности конструктивной схемы электромагнитного подвеса и характеристики активных материалов. Кроме того, необходимо определить усилия, на которых должны

рассчитываться электромагниты. Значения этих усилий во многом зависят от профиля пути, климатический условий, требуемого уровня комфорта и конструктивной схемы экипажа.

Анализ действующих на экипаж вертикальных и горизонтальных нагрузок от массы экипажа, аэродинамического сопротивления, вертикальных сил линейного двигателя, неровностей пути, прохода сопряжений и кривых пути и снижение подъемного усилия электромагнита при движении вследствие размагничивающего влияния вихревых токов позволяет предложить следующие рекомендации.

Электромагнит подвеса рассчитывается на подъемное усилие:

- в длительном режиме при номинальном зазоре – $1,35gm_э$;
- кратковременном режиме при номинальном зазоре – $(1,8-2,0)gm_э$;
- кратковременном режиме при двойном зазоре (подъем экипажа из состояния покоя до состояния левитации) – $1,035gm_э$, где g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; $m_э$ – масса экипажа.

Для расчета и исследований электромагнитного направления в качестве эквивалентных режимов для тягового усилия предлагается при длительном режиме при номинальном зазоре – $0,25gm_э$; при кратковременном режиме и номинальном зазоре – $0,5gm_э$.

Следующим параметром, определяющим систему электромагнитного подвеса, является величина воздушного зазора δ между электромагнитом и феррорельсом. Этот параметр в значительной мере влияет на потребление энергии на подвес и общую массу электромагнитов. Естественно стремление принимать величину δ минимальной, однако при малом значении δ повышается требования к точности конструкции путевой структуры и возникают трудности по обеспечению вписывания экипажа в кривые участки пути и обеспечению заданного уровня комфорта для пассажиров. То есть зазор δ следует выбирать оптимизационным расчетом с учетом перечисленных выше факторов.

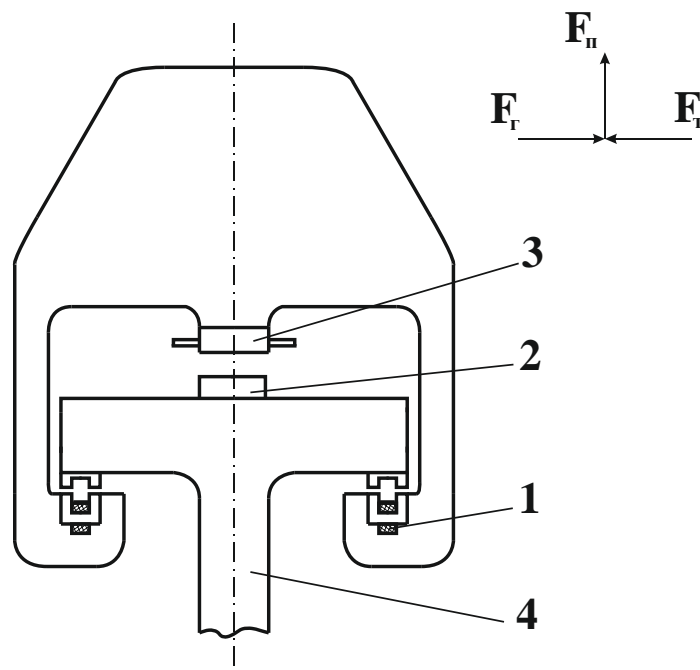


Рисунок 1 - Конструктивная схема экипажа серии TR (Германия)

1 – ферромагнит направления; 2 – электромагнит направления; 3 – статор линейного синхронного двигателя; 4 – путевая эстакада

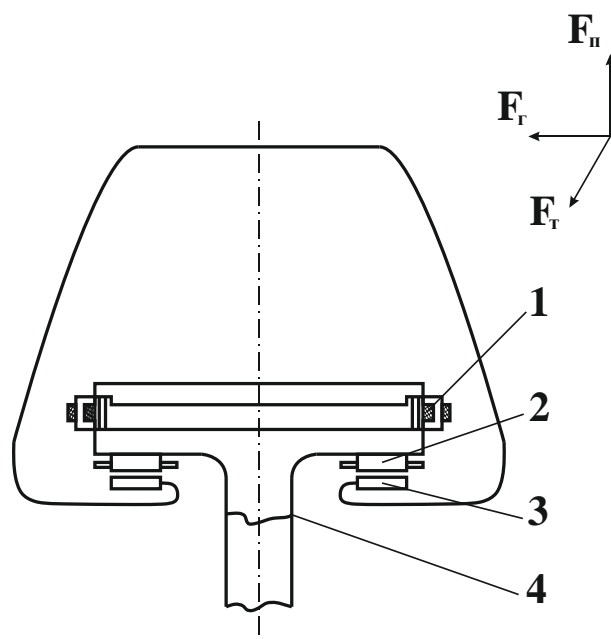


Рисунок 2 - Конструктивная схема экипажа совмещенная системой тяги и подвеса
1 – электромагнит направления; 2 – статор линейного синхронного двигателя; 3 – электромагнит направления; 4 – путевая эстакада

На рисунке 5 показана совмещенная система подвеса и направления применяемая на экипажах серий TR (Германия) и HSST (Япония).

Достигается это путем применения феррорельса П-образного профиля сечения и смещения электромагнитов на экипаже примерно на половину ширины полюсного наконечника от осевой линии в обе стороны в шахматном порядке. При таком смещении в электромагните относительно феррорельса возникает самостабилизирующая горизонтальная сила F_r , равная около 30% подъемной силы F_n , что может оказаться достаточным для прямолинейных участков пути.

Некоторое увеличение массы электромагнита подвеса, связанное с необходимостью обеспечить сохранение подъемной силы при его смешанном положении относительно феррорельса, компенсируется отсутствием электромагнита направления, соответствующей системы управления и упрощенной конструкцией путевой структуры.

Проведенные исследования в лабораторных условиях, были ориентированы в первую очередь на обеспечение повышения полезной нагрузки и провозной способности, по экипажной части на снижение его массы, приходящейся на одного пассажира, а также способствующих снижению затрат на строительство путевой структуры.

С точки зрения аэродинамических воздействий, характер этого взаимодействия подвижного состава и пути в значительной мере определяется конструкцией нижней части экипажа – ходовые части, подвижное пространство и т.д. и поверхностью пути. При охватываемой путевой структуре подъемная аэродинамическая сила, действующая на экипаж, по величине примерно в 2 раза больше, чем при охватываемой, сила лобового сопротивления движению экипажа при охватываемой путевой структуре выше на 20-30%, чем при охватываемой, то есть отношение подъемной силы, создаваемой воздушным потоком, к силе сопротивления движению экипажа более чем в 2 раза выше этого качества охватываемой структуры.

На рисунке 3 представлены аэродинамические характеристики экипажей существующего подвижного состава TR (кривая 1) полученного методами моделирования (кривая 2) совмещенной системой тяги и подвеса.

Исходя из аэродинамической характеристики предлагаемого экипажа следует, что его аэродинамическое сопротивление движению может быть принятым равным 35 кН при скорости 400 км/ч, что является довольно значительным преимуществом по отношению к экипажам серии TR, где сопротивление движению составляет 180 кН.

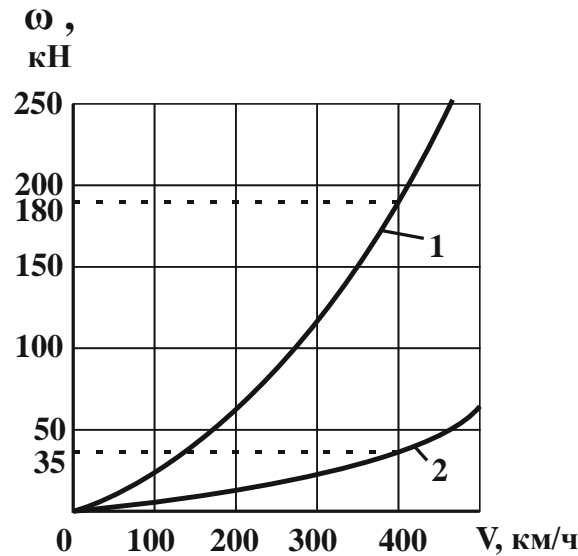


Рисунок 3 - Аэродинамические характеристики экипажей
кривая 1 – экипаж серии TR
кривая 2 – экипаж совмещенная тяги и подвеса

Методами моделирования, установлено что при взаимодействии между электромагнитом и феррорельсом, при заданном подъемном усилии минимальная масса электромагнита приближается по форме к квадрату, а минимальная масса ферромагнита – при минимальной ширине потока. Кроме того необходимо учитывать, что суммарная длина электромагнита вдоль экипажа должна быть максимально возможной, так как это снижает, удельную погонную нагрузку на феррорельс, что благоприятно отражается на стоимости и надежности путевой инфраструктуры [3]

Электромагниты водвеса и электромагниты направления для экипажей левитационного действия характеризуются следующими параметрами: подъемным уилием F_n , развиваемым электромагнитами; массой электромагнитов M_n , с учетом массы системы охлаждения; мощностью P_n обмотки электромагнита и системы охлаждения.

Для анализа параметров и сравнения различных типов электромагнитов удобнее пользоваться удельными показателями [4]. В качестве основных из них для электромагнита могут быть указано подъемное качество, то есть отношение подъемного усилия электромагнита к его весу совместно с системой охлаждения; удельная мощность, то есть отношение мощности, потребляемой электромагнитов совместно с системой охлаждения, к подъемному усилию.

В качестве удельных показателей для электромагнита и феррорельса учитывающих систему в целом, могут быть приняты погонное подъемное усилие, то есть отношение тягового усилия электромагнита к его длине; относительная масса электромагнита, а отношение массы электромагнита совместно с системой охлаждения к массе экипажа; погонная масса феррорельса, кг/м; скоростной фактор, то есть отношение подъемного

усилия при скорости $v = 100$ м/с к подъемным силам при скорости $v = 0$ м/с левитационное качество или отношение подъемного усилия к тормозному при скорости $v = 100$ м/с.

Результаты.

Расчеты для экипажа массой до 40 т электромагнитного подвеса при отдельной независимой системе магнитного подвеса и магнитного направления линейного асинхронного двигателя показывает, что исходя из условий высокого технологического уровня необходимо обеспечить следующее значение удельных показателей: удельная мощность (кВт/кН) $\leq 0,3$; относительная масса $\leq 0,2$; подъемное усилие (кН/м) ≥ 20 ; погонная масса (кг/м) ≤ 65 ; скоростной фактор $\geq 0,85$; левитационное качество ≥ 150 . Однако достижение таких высоких удельных показателей является сложной задачей и возможно лишь путем оптимального расчета с учетом применения электротехнических материалов с повышенными свойствами и интенсивного охлаждения катушек электромагнитов.

При расчете электромагнита необходимо учитывать условия его работы, нагрузочная характеристика электромагнита $F_n(I)$ при $\delta = const$ должна удовлетворять двум требованиям: при номинальном δ_n и номинальном подъемном усилии F_n ток возбуждения электромагнита I_n должен находиться на прямолинейной части характеристики таким образом, чтобы при увеличении подъемного усилия в 2 раза. Ток возбуждения также изменится не более чем в два раза.

Обсуждение.

Первое условие необходимо для обеспечения быстродействия системы в динамическом режиме при компенсации внешних возмущений, действующих на экипаж.

Второе условие связано с обеспечением подъема экипажа из опущенного положения при $\delta = 2\delta_n$ до рабочего. Ток возбуждения при этом также не должен превышать $I = 2I_n$.

Вышеперечисленные требования должны быть учтены в программе оптимизационного расчета электромагнита как контрольные для предварительных расчетов достаточно принять индукцию в воздушном зазоре $B_\delta = 0,5 - 0,6$ Т и индукцию в магнитопроводе – не более 1,0 Т, что обеспечивает нахождение номинальной точки на прямолинейной части характеристики.

При предварительном расчете электромагнита исходя из общей массы экипажа и его принципиальной схемы определяем необходимую подъемную силу, общую длину электромагнита, длину единичного электромагнита, подъемную силу, общую длину электромагнита, подъемное усилие на единичный магнит. Считаем заданными зазор δ и индукцию в нем B_δ . Из большого многообразия возможных конструктивных форм магнитопровода электромагнита наиболее приемлемой является П-или Ш-образная при плоской соответственно формам поперечного сечения феррорельса. Суммарная плоскость S полюсных наконечников определяется по формуле:

$$F_n = \frac{B_\delta^2 S K_\delta}{2\mu_0}, \quad (1)$$

где K_δ – коэффициент, учитывающий выпучивание магнитного потока, принимается равным 1,2-1,5; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная.

Приняв длину магнита, из площади находим ширину наконечников электромагнита. Далее ширину наконечников электромагнита. Далее методами расчета магнитной цепи определяем размеры магнитопровода, принимая индукцию в нем не более

1Т, плотность тока в катушке возбуждения с классом изоляции F или H-не более 10 А/мм² при криогенном охлаждении непосредственно проводников катушки. В тоже время для получения коэффициента рассеивания магнитного потока не более 1,5 необходимо стремиться принять внутреннее окно магнитного провода близким к квадратному. Полученные таким образом параметры электромагнита и феррорельса могут быть использованы для предварительной компоновки экипажа.

Электромагниты для магнитного подвеса экипажа и другие устройства, обеспечивающие работу, имеют суммарную массу, составляющие значительную часть полной массы экипажа. Задача разработки электромагнита с применением электромагнитного подвеса с оптимальными параметрами, масса которого должна быть минимальной является актуальной. В работе [5] было предложено понятие транспортной массы системы $M_{\text{п}}$. Применительно к электромагнитному подвесу с обмотками из криопроводника транспортная масса магнитного подвеса выражается формулой:

$$M_{\text{п}} = \{[M_0 + m_1 p_0 + 4m_2(b + h)\alpha\vartheta]2l + M_{\text{вттп}}\} \left(1 + \frac{m_3}{M} F_{\text{азр}}\right) + m_3 \frac{g(M)}{K_{\text{лк}}}, \quad (2)$$

где M_0 – удельная масса электромагнита и криостата; m_1 – удельная масса источника электронергии, системы управления; p_0 – удельная мощность потерь на 1м длины электромагнита; m_2 – удельная масса источников электроэнергии, приходящаяся на 1 Вт ее холодопроизводительности; b, h - размеры площади поперечного сечения криостата, в который помещена обмотка электромагнита; α – коэффициент теплопритока от стенки криостата ($\text{т}/^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$); ϑ – превышение температуры окружающей среды под температурой охлаждающей креогенной; $2l$ – суммарная длина электромагнита экипажа; $M_{\text{вттп}}$ – масса вторичного рессорного подвеса; m_3 – удельная масса энергетической установки, приходящейся на 1Н сил сопротивления движению экипажа; M – полная масса экипажа; $F_{\text{азр}}$ – сила аэродинамического сопротивления действующая на экипаж; $K_{\text{лк}} = \frac{F_{\text{л}}}{F_{\text{т}}}$ – левитационное качество электромагнитного подвеса; $F_{\text{л}}$ - левитационная сила; $F_{\text{т}}$ – тормозная сила.

Для электромагнитного подвеса последний член в формуле (2) составляет менее 5% транспортной массы $M_{\text{п}}$ и поэтому можно считать, что минимуму $M_{\text{п}}$ соответствует минимуму выражения:

$$M_{\text{п}} = M_0 + m_1 p_0 + 4m_2(b + h)\alpha\vartheta. \quad (3)$$

Выразим сумму H через параметры электромагнита. Следует исходить из того, что магнит подвеса осуществляется по принципу «электромагнитного колеса», когда с каждой стороны экипажа располагается серия отдельных электромагнитов, образующих в электромагнитном отношении непрерывную систему. Так как длина каждого электромагнита примерно в 10 раз больше его ширины, то расчет магнитного поля может быть сведен к двумерной задаче, соответствующей поперечному сечению электромагнита, рисунок 6.

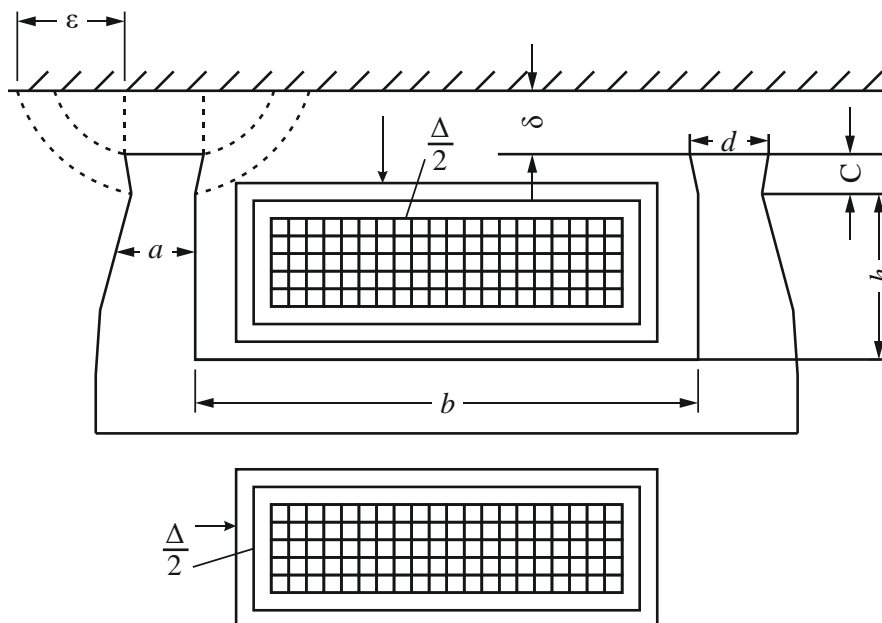


Рисунок 4 - Схема поперечного разреза электромагнита

Обмотка электромагнита располагаются на ярме, что позволяет осуществлять непрерывность магнитного потока в зоне между полюсными наконечниками в соседних электромагнитах и этим снизить потери энергии в феррорельсах на вихревые токи. Электромагнит, рисунок 4, соответствует электромагниту с обмоткой из криопроводника, помещенный в криоген.

Масса электромагнита с криогеном приходящий на 1м длины:

$$M_0 = 2\gamma_{Cu}\delta + \gamma_{Fe}a(1 + K_{pacc})h + \gamma_{Fe}aK_{pacc}(b \div 2aK_{pacc}) + 2\gamma_{Fe}ca + \delta\beta_\gamma(b + h) + (hb - S)\gamma_{охл}, \quad (4)$$

где γ_{Cu} – плотность проводного материала катушки; γ_{Fe} – плотность материала магнитопровода; K_{pacc} – отношение ширины полюса в нижней части к ширине полюса в верхней части, принятое равным коэффициенту рассеивания магнитного потока; c – высота полюсного наконечника; h - толщина стенок резервуара для хлодогента; S – площадь поперечного сечения катушки; h - высота полюса, связанная площадью поперечного сечения катушки рис. 6 соотношением:

$$h = (S/b - \Delta) + \Delta, \quad (5)$$

где Δ – двойное значение зазора между поверхностью катушки и резервуара для криогена; γ – плотность материала криогена; $\gamma_{охл}$ – плотность криогена.

Оптимальные параметры электромагнита определяем из условия минимума (3), которые с учетом (4) сводятся к отысканию минимума:

$$H(a, S, P_0) = C_1S + aC_2S + a^2C_3 + aC_4 + C_5 + m_1P_0, \quad (6)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – постоянные, определяемые по исходным данным. Площадь поперечного сечения обмотки S можно выразить в виде функции P_0 и d , а ширину полюса a – в виде функции d . С учетом сказанного функция H является неявной функцией двух переменных - d и P_0 .

Условиями минимума этой функции являются [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial P_0} &= (C_1 + aC_2) \frac{\partial S}{\partial P_0} + m_1 = 0; \\ \frac{\partial H}{\partial d} &= (C_1 + aC_2) \frac{\partial S}{\partial d} + (C_2S + a2C_3 + C_4) \frac{\partial a}{\partial d} = 0 \end{aligned}$$

и неравенство для точки экстремума

$$\left(\frac{\partial^2 H}{\partial d \partial P_0} \right)^2 - \left(\frac{\partial^2 H}{\partial d^2} \right) \left(\frac{\partial^2 H}{\partial P_0^2} \right) < 0.$$

Выполнив преобразования для S и вставив в формулу (4), находим.

$$M_0 = \left[(2\gamma_{Cu} - \gamma_{охл}) + \frac{K}{b-\Delta} \right] \frac{2p(Iw)^2 K_{MC}^2}{K_{зап} P_0} + K\Delta + C, \quad (7)$$

где
$$K = \gamma_{Fe} a(1 + K_{pacc}) + 8\beta_\gamma b + b\gamma_{охл}, \quad (8)$$

$$C = \gamma_{Fe} [aK_{pacc}(b + 2aK_{pacc}) + 2ca] 8\beta_\gamma b. \quad (9)$$

Подставив выражение (7) в (3), получаем функцию, подлежащую минимизации:

$$H(P_0) = \frac{K_1}{P_0} + m_1 P_0 + (K + m_2 4a\vartheta)\Delta + 4m_2 ba\vartheta + C, \quad (10)$$

где
$$K_1 = \left[2\gamma_{Cu} - \gamma_{охл} + \frac{K + m_2 4a\vartheta}{b-\Delta} \right] \frac{2p(Iw)^2 K_{MC}^2}{K_{зап}} \quad (11)$$

в случае выполнения обмотки электромагнита из обычного проводника с криогенным охлаждением, когда отсутствует второй (вакуумный) резервуар, в формулах (8) и (9) перед членом $\beta\gamma$ должен быть множитель 4 и, как было указано выше, в этом случае $a = 0$.

$$\frac{\partial H(P_0)}{\partial P_0} = -\frac{K_1}{P_0^2} + m_1 = 0 \text{ и } \frac{\partial^2 H(P_0)}{\partial P_0^2} = \frac{2K_1}{P_0^3} > 0.$$

Отсюда получают оптимальное значение удельных потерь P_0 , соответствующих минимуму транспортной массы подвеса:

$$P_0 = \sqrt{\frac{K_1}{m_1}}.$$

Заключение.

Изложенная методика определения оптимальных параметров электромагнита основана на допущениях, что магнитопровод не насыщен и его магнитное сопротивление можно учесть коэффициентом K_{MC} . Кроме того, при расчете оптимальных параметров

электромагнита считается заданным коэффициент рассеивания, равный отношению магнитных потоков в середине ярма и в верхнем строении полюса. Сила тяги электромагнита с оптимальными параметрами может выполняться проверочными расчетами магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Нагорский Ф.Д., Чернов С.В. Методика выбора системы электромагнитного подвеса. - М.: Известия высших учебных заведений. № 1, 2001 г. С 78-81

[2] Motor lineal y sistencion magnetica en la R.F. Alemana (del informe presentagopor el Ministerio Federal para la investigation y la Technologie). – Revista AIT, 2009, Nr 30. P.19-54.

[3] Zurec R. Stend der Entwichlund des elektromagnetiscen Schnetilahn Aystemen. – Clos. Ann., 2do, Nr/ 89, p.233-240.

[4] Gottzein E., Meisinger R., Miller H. Anwendung des “Magnes isschen Rades” in Hochgeschwindigheits magnetschwelehne: - ZEV-Glasinn, 2019, 103, Nr 5, p.227-230.

[5] Вопросы магнитного подвеса экипажа высокоскоростного наземного транспорта/под.ред. В.Д. Нагоскорого. - М., 2017. 107с. труды МИИТ.

[6] Смирнов В.И. Курс высшей математики. - М.: Физматгиз, 1999, 628 с.

Семят Ахатов, магистр, ассистент оқытушы, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, semyat@mail.ru

Владимир Солоненко, т.ғ.д, профессор, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, v.solonenko@mail.ru

Нарзанкул Махметова, т.ғ.д, профессор, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, makhmetova_n1958@mail.ru

ЛЕВИТАЦИЯЛЫҚ РЕЖИМ КЕЗІНДЕ ЭКИПАЖДЫҢ ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ІЛУ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ

Аңдатпа. Электромагниттік суспензия жүйесі электромагниттің феррорельске магниттік тарту әсеріне негізделген. Көтергіш деп аталатын феррорельске тарту күші экипажға әсер ететін барлық жүктемелерді, соның ішінде экипаж салмағының Күшін теңестіруі тиіс.

Феррорельс бойымен электромагнит қозғалғанда оларға магнит ағынын тудыратын құйынды токтар түседі. Экипажды жол құрылымының үстінде ұстау үшін жалпы жағдайда екі тұрақтандыру жүйесі қажет; тік және көлденең жазықтықта. Олардың бірі экипаждың магниттік суспензиясын тік жазықтықта жүзеге асырады, екіншісі бағыттаушы болып табылады. Осы мақсаттар үшін тұрақты электромагниттерді электромагниттермен бірге қолданған жөн. Мақалада экипаждың левитациялық қозғалысының сапасына әсер ететін электромагниттік суспензияның құрылымдық параметрлерін есептеу әдісі көрсетілген.

Түйінді сөздер. Электромагниттік суспензия, феррорель, левитация, магнит ағыны, магнит өрісі, көтеру күші, көлденең күш, құйынды токтар, тежеу.

Semyat Akhatov, master's degree, assistant-teacher, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, semyat@mail.ru

Vladimir Solonenko, doctor of technical sciences, professor, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, v.solonenko@mail.ru

Narzankul Makhmetova, doctor of technical sciences, professor, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, makhmetova_n1958@mail.ru

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF THE ELECTROMAGNETIC SUSPENSION OF THE CREW IN THE LEVITATION MODE

Abstract. The electromagnetic suspension system is based on the effect of magnetic attraction of an electromagnet to a ferrorail. The force of attraction to the ferrorail, called lifting, should balance all the loads acting on the crew, including the force of the weight of the crew. When the electromagnet moves along the ferrorail, eddy currents are induced in them, creating a magnetic flux. To keep the crew above the track structure, in general, two stabilizing systems are needed; in the vertical and horizontal plane. One of them carries out magnetic suspension of the crew in a vertical plane, the other is a guide. For these purposes, it is advisable to use permanent electromagnets in combination with electromagnets.

The article shows a method for calculating the design parameters of an electromagnetic suspension that affect the quality of the crew's levitation movement.

Keywords. Electromagnetic suspension, ferrorail, levitation, magnetic flux, magnetic field, lifting force, horizontal force, eddy currents, braking.
