DOI: 10.25515/PMI.2018.1.62

УДК 621.3.049.77

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА И ЗАЩИТЫ СКИПА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

Б.А.ЖАУТИКОВ, А.А.АЙКЕЕВА
Карагандинский государственный индустриальный университет, г.Темиртау, Республика Казахстан

Работоспособность электромагнитной подъемной установки обеспечивается слаженной работой всех его узлов и элементов, а именно строго вертикальным движением скипа. Отклонение скипа от вертикальной оси может привести к остановке и повреждению как скипа, так и установки. Поэтому система регулирования воздушного зазора и защиты скипа электромагнитной подъемной установки, которая включает определение размера воздушного зазора между электромагнитом скипа и электромагнитом направляющего устройства, а также разработка системы стабилизации для обеспечения постоянной величины воздушного зазора и регулирования величины тока в обмотке электромагнита, обеспечивают как строго вертикальное движение скипа, так и его защиту.

Статья направлена на теоретическое определение величины воздушного зазора между электромагнитом направляющего устройства и электромагнитом скипа при помощи закона Био – Савара – Лапласа.

***Ключевые слова*:** электромагнит, магнитная левитация, электромагнитные силы, установка

***Как цитировать эту статью*:** Жаутиков Б.А. Разработка системы регулирования воздушного зазора и защиты скипа электромагнитной подъемной установки / Б.А.Жаутиков, А.А.Айкеева // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 62-69. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.62

Электромагнитная подъемная установка состоит из подъемного сосуда (скипа), электромагнитов (или постоянных магнитов) и направляющих проводников. Силой электромагнитного взаимодействия сосуд приводится в движение. Так как между скипом и направляющими устройствами существует зазор, трение исключается, и единственной тормозящей силой является аэродинамическое сопротивление. Магнитная левитация ранее для транспортировки горной массы нигде в мире не применялась и создание данной установки влечет внедрение новой инновационной технологии транспортировки горной массы в горнодобывающей промышленности и строительстве.

В отличие от существующих подъемных машин, установка обладает большей грузоподъемностью при меньших затратах электроэнергии и других энергетических ресурсов, поэтому данную технологию транспортировки можно отнести к энергосберегающей.

Электромагниты с большой подъемной силой применяются в технике для различных целей. Например, электромагнитный подъемный кран применяется на металлургических и металлообрабатывающих заводах, в портах для переноски железного лома и готовых изделий. На металлообрабатывающих заводах используют станки с магнитными столами, на которых обрабатываемое металлическое изделие закрепляется притяжением сильных электромагнитов [4, 7].

Рассмотрим электромагнит с аксиальным направлением намагниченности (рис.1), по обмотке которого течет намагничивающий ток I.

Магнитный момент электромагнита P может быть найден по формуле

$$P = jhS,$$

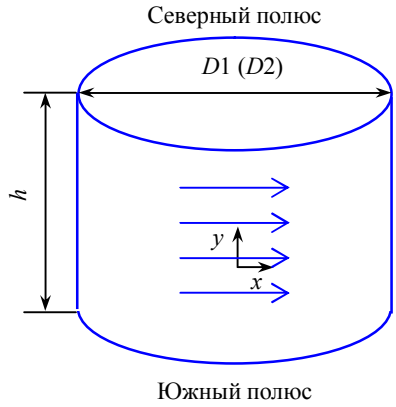


Рис.1. Электромагнит с аксиальным направлением намагниченности

где $j = I/h$ – линейная плотность намагничивающего тока, которая может быть выражена приближенной формулой

$$j = B_r / m_0,$$

B_r – остаточная индукция; $m_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Величину и направление вектора магнитной индукции $\overrightarrow{dB}$ в произвольной точке магнитного поля, создаваемого элементом проводника длиной $\overrightarrow{dl}$ с током I, можно найти с помощью закона Био – Савара – Лапласа [18]:

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r^3}\left[\overrightarrow{dl}\,\vec{r}\right],$$

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.62

где $\overrightarrow{dl}$ – вектор по модулю, равный длине dl элемента проводника и совпадающий по направлению с током; $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из элемента $\overrightarrow{dl}$ проводника в рассматриваемую точку поля.

Модуль вектора $\overrightarrow{dB}$ определяется формулой

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{Idl}{r^2}\sin a,$$

где α – угол между векторами $\overrightarrow{dl}$ и $\vec{r}$.

Для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции: вектор магнитной индукции результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равен векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом в отдельности [14]:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{n}\overrightarrow{B_i}.$$

Полное магнитное поле, созданное данным проводником с током в точке A, может быть вычислено как векторная сумма полей, создаваемых всеми отдельными элементами $\overrightarrow{dl}$ в этой же точке. Это суммирование в пределе переходит в действие интегрирования:

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi}\int\frac{\sin(\overrightarrow{dl}\wedge\vec{r})dl}{r^2}.$$

Определим выражение для магнитной индукции в центре одного витка с током катушки (рис.2).

Расстояние r от любого элемента $\overrightarrow{dl}$ до центра O одинаково – равно радиусу витка R. Все элементы перпендикулярны радиусу-вектору, поэтому $\sin(\overrightarrow{dl}\wedge\vec{r}) = 1$. Следовательно,

$$B = \int dB = \frac{\mu_0\mu I}{4\pi R^2}\int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0\mu I}{4\pi R^2}2\pi R = \frac{\mu_0\mu I}{2R}.$$

Если среда вокруг проводника немагнитная, $\mu = 1$. Тогда

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Если в катушке электромагнита имеется N витков с током, тогда

$$B = \frac{\mu_{0\mu} IN}{2R}.$$

Теперь определим индукцию магнитного поля витка с током в произвольной точке A на его оси. Ось витка z – прямая, проходит через центр витка и перпендикулярна плоскости поперечного сечения [16].

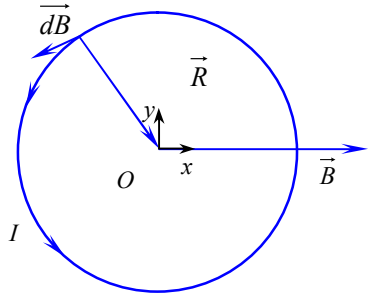


Рис.2. Индукция магнитного поля в центре витка катушки электромагнита с аксиальным направлением намагниченности

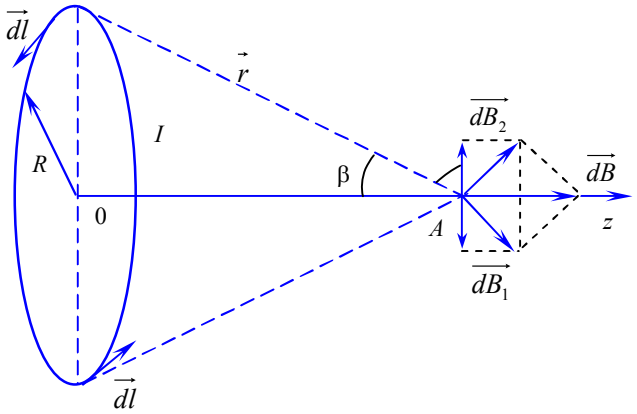


Рис.3. Индукция магнитного поля на оси кругового тока

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.62

На рис.3 показан круговой виток радиуса R, плоскость которого перпендикулярна плоскости чертежа. Расстояние элемента $\vec{dl}$ до точки A обозначим через $\vec{r}$. Угол между $\vec{dl}$ и $\vec{r}$ равен $\pi/2$ (как угол между образующей конуса и элементом окружности его основания).

В точке A на оси z векторы индукции полей, созданных различными малыми элементами витка с током, не совпадают по направлению. Магнитное поле витка с током обладает вращательной симметрией, поэтому векторы $\overrightarrow{dB_1}$ и $\overrightarrow{dB_2}$ для полей двух диаметрально противоположных элементов витка dl_1 и dl_2, имеющих одинаковую длину ($dl_1 = dl_2 = dl$), равны по модулю

$$\left|\overrightarrow{dB_1}\right| = \left|\overrightarrow{dB_2}\right| = \frac{\mu_0 Idl}{4\pi r^2}.$$

Результирующий вектор $\left|\overrightarrow{dB}\right| = \left|\overrightarrow{dB_1}\right| + \left|\overrightarrow{dB_2}\right|$ в точке A направлен по оси z и по модулю равен $\left|\overrightarrow{dB}\right| = \left|\overrightarrow{dB_1}\right|\sin\beta$, где $\sin\beta = R/r$.

Подставив значение $\sin\beta$, получим

$$dB = \frac{\mu_0 IRdl}{4\pi r^3}.$$

Индукция магнитного поля, созданного всем витком, имеет то же направление, а ее модуль равен [12]

$$B = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 IRdl}{4\pi r^3} = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3}\int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 IR^2}{2r^3}.$$

Из рис.3 видно, что $r^2 = R^2 + z^2$, где z – расстояние от центра сечения 0 до точки A. Тогда

$$r^3 = (R^2 + z^2)\sqrt{R^2 + z^2} = R^3\left[1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}.$$

Подставив это значение в предыдущую формулу, вычислим индукцию поля по оси витка с током:

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2R^3\left[1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 I}{2R\left[1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}.$$

Если число витков в катушке электромагнита N, то полученное выражение нужно умножить на N.

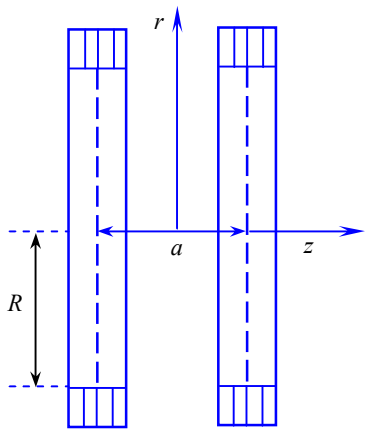


Рис.4. Взаимодействие электромагнитов

Для теоретического расчета результирующего поля взаимодействия электромагнитов поместим начало координат в точку, лежащую на линии, соединяющей их центры на одинаковом расстоянии, и воспользуемся формулой расчета магнитной индукции $\vec{B}$ для одного электромагнита [13].

Очевидно, что индукция $\vec{B}$ магнитного поля в точке на оси двух одинаковых электромагнитов (рис.4) на расстоянии A_1 и A_2 от них равна

$$B(x, r=0) = \frac{\mu\mu_0 NI}{2R}\left[\frac{1}{\left(1 - A_1^2\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\left(1 + A_2^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right],$$

где $A_1 = \dfrac{z + \frac{a}{2}}{R}$, $A_2 = \dfrac{z - \frac{a}{2}}{R}$; a – расстояние между электромагнитами.

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.62*

При $z = 0$ и $a < R$ индукция магнитного поля имеет максимальное значение, если $a > R$ – минимальное значение. Если $a = R$, то поле практически однородно в диапазоне $-R < z < +R$. Тогда

$$B = \int_{-R}^{R} \frac{\mu\mu_0 NI}{2R} \left[\frac{1}{\left(1 - \left(\frac{z + \frac{a}{2}}{R}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{z - \frac{a}{2}}{R}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right] dz.$$

Для расчета системы «электромагнит скипа – электромагнит направляющего устройства» электромагнитной подъемной установки предпочтительнее использовать систему цилиндрических координат. Центр системы координат в данном случае удобно поместить на оси электромагнитной системы посередине между электромагнитами, т.е. на расстоянии по $s/2$ как от верхнего основания электромагнита 1, так и от нижнего (рис.5) [8].

Так как магнитная система состоит из двух электромагнитов, то в соответствии с принципом суперпозиции ее магнитное поле равно сумме магнитных полей электромагнитов. Введем следующие обозначения. Магнитная индукция электромагнита 1 имеет радиальную $B1_x(X, 0, Z)$ и аксиальную $B1_z(X, 0, Z)$ составляющие (рассчитываются по закону Био – Савара – Лапласа относительно центра электромагнита 1 с остаточной индукцией B_r1). Магнитная индукция электромагнита 2 имеет радиальную $B2_x(X, 0, Z)$ и аксиальную $B2_z(X, 0, Z)$ составляющие (рассчитываются по закону Био – Савара – Лапласа относительно центра электромагнита 2 с остаточной индукцией B_r2). Магнитная индукция $B12(X, 0, Z)$ электромагнитной системы имеет радиальную $B12_x(X, 0, Z)$ и аксиальную $B12_z(X, 0, Z)$ составляющие, рассчитываемые относительно центра опоры с учетом того, что электромагниты находятся на расстоянии s друг от друга [10, 11, 15]:

$$B12_x(X, 0, Z) = B1_x\left(X - \frac{h_2}{2} - \frac{s}{2}, 0, Z\right) + B2_x\left(X + \frac{h_2}{2} + \frac{s}{2}, 0, Z\right);$$

$$B12_z(X, 0, Z) = B1_z\left(X - \frac{h_2}{2} - \frac{s}{2}, 0, Z\right) + B2_z\left(X + \frac{h_1}{2} + \frac{s}{2}, 0, Z\right).$$

Модуль магнитной индукции системы $B12(X, 0, Z)$

$$B12(X, 0, Z) = \sqrt{[B12_x(X, 0, Z)]^2 + [B12_z(X, 0, Z)]^2}.$$

Для расчета силы взаимодействия (притяжения или отталкивания) магнитов укажем, что магнитное поле электромагнита 1 с радиальной $B1_x(X, 0, Z)$ и аксиальной $B1_z(X, 0, Z)$ составляющими магнитной индукции (рассчитываются по закону Био – Савара – Лапласа относительно центра электромагнита 1) действует на другой такой же электромагнит с линейной плотностью тока $j_2 = \pm\frac{B_r 2}{m_0}$, создавая силу Ампера (сила Ампера – сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током). Сила Ампера dF, действующая на малый элемент dl длины проводника, по которому идет электрический ток I, равна

$$\overrightarrow{dF} = I[\overrightarrow{dl} \wedge \overrightarrow{B}],$$

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.62

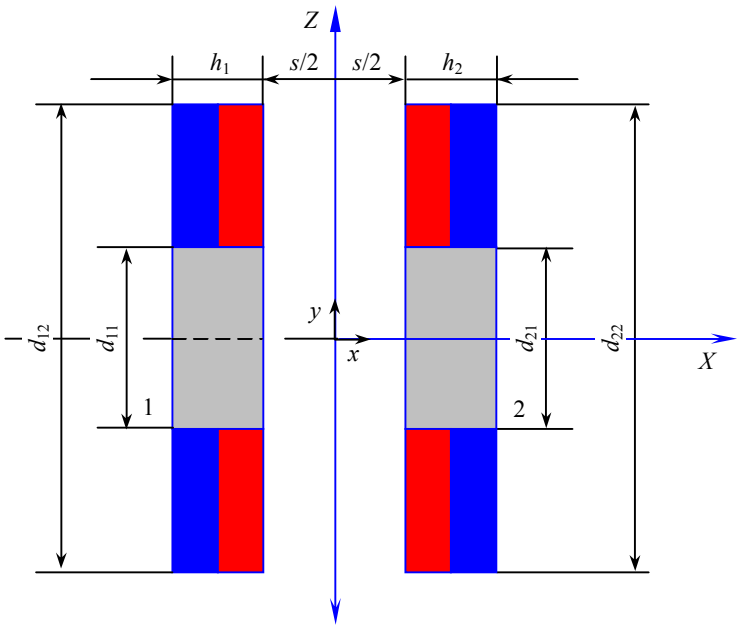


Рис.5. Схема магнитной системы из двух электромагнитов (центр координат – на оси системы посередине между электромагнитами); X – радиальная координата; Z – аксиальная координата

где $\vec{dl}$ – вектор, численно равный длине dl элемента проводника и направленный в ту же сторону, что и вектор $\vec{j}$ плотности тока в этом элементе проводника [9].

Если векторы $\vec{dl}$ и $\vec{B}$ взаимно перпендикулярны, то направление силы $\vec{dF}$ можно найти по правилу левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали бы направление электрического тока, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей со стороны поля на проводник [19].

Сила взаимодействия, возникающая за счет аксиальной компоненты магнитной индукции поля магнита, имеет только радиальную составляющую. Ее воздействие на соленоид сводится к его радиальному сжатию (растяжению). Таким образом, искомая сила определяется только радиальной компонентой $B1_x$ индукции магнитного поля электромагнита 1. Причем радиальная компонента индукции магнитного поля электромагнита 1 и вектора линейной плотности тока $\vec{j}_2$ в электромагните 2 взаимно перпендикулярны.

Линейная плотность тока в электромагните 2 для внутреннего диаметра $D21$ электромагнита

$$j_2\left(X, 0, \frac{D21}{2}\right) = -\frac{B_r 2}{m_0}.$$

Тогда для элементарной силы Ампера

$$d^2F = \left[j_2\left(X, 0, \frac{D22}{2}\right) B1_x\left(X, 0, \frac{D22}{2}\right)\frac{D22}{2} dfdX + j_2\left(X, 0, \frac{D21}{2}\right) B1_x\left(X, 0, \frac{D21}{2}\right)\frac{D21}{2} dfdX \right],$$

где $\frac{D22}{2}df$ и $\frac{D21}{2}df$ – элементы длины проводника обмотки электромагнита в цилиндрической системе координат [5].

С учетом осевой симметрии системы

$$\int_0^{2\pi} df = 2\pi;$$

$$dF = \frac{\pi B_r 2}{\mu_0}\left[D22B1_x\left(X, 0, \frac{D22}{2}\right) + D21B1_x\left(X, 0, \frac{D21}{2}\right) dX \right].$$

С учетом положения центра координат пределы интегрирования по Z будут от $\frac{s}{2}$ до $\frac{s}{2} + h_2$, а радиальную составляющую магнитной индукции электромагнита 1 $B1_x$ надо брать в точках

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.62

$\left(X+\frac{h_1}{2}+\frac{s}{2},0,\frac{D22}{2}\right)$ и $\left(X+\frac{h_1}{2}+\frac{s}{2},0,\frac{D21}{2}\right)$, т.е. относительно центра координат магнитной опоры

$$F=\frac{\pi B_r 2}{\mu_0}\int_{\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}+h_2}\left[D22B1_x\left(X+\frac{h_1}{2}+\frac{s}{2},0,\frac{D22}{2}\right)+D21B1_x\left(X+\frac{h_1}{2}+\frac{s}{2},0,\frac{D21}{2}\right)dX\right].$$

Подставив выраженные значения магнитной индукции, получаем выражение для определения силы взаимодействия электромагнитов [1]:

$$F=\frac{\pi B_r 2}{\mu_0}\int_{\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}+h_2}D22\frac{\mu\mu_0 NI}{D22}\left[\frac{1}{1-\frac{(2x+s+h)^2}{D22^2}}+\frac{1}{1+\frac{(2x-s-h)^2}{D22^2}}\right]+D21\frac{\mu\mu_0 NI}{D21}\times$$

$$\times\left[\frac{1}{1-\frac{(2x+s+h)^2}{D21^2}}+\frac{1}{1+\frac{(2x-s-h)^2}{D21^2}}\right]dX.$$

Упростив полученные значения, получаем результирующее выражение:

$$F=\frac{\pi B_r 2\mu IN}{1}\int_{\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}+h_2}\left[\frac{1}{1-\frac{(2x+s+h)^2}{D22^2}}+\frac{1}{1+\frac{(2x-s-h)^2}{D22^2}}\right]+\left[\frac{1}{1-\frac{(2x+s+h)^2}{D21^2}}+\frac{1}{1+\frac{(2x-s-h)^2}{D21^2}}\right]dX.$$

Согласно третьему закону Ньютона, подъем скипа электромагнитной подъемной установки будет осуществлен при условии равенства силы взаимодействия электромагнитов и силы тяжести скипа. Тогда максимальная грузоподъемность

$$m_c=\frac{\pi B_r 2\mu IN}{g}\int_{\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}+h_2}\left[\frac{1}{1-\frac{(2x+s+h)^2}{D22^2}}+\frac{1}{1+\frac{(2x-s-h)^2}{D22^2}}\right]+\left[\frac{1}{1-\frac{(2x+s+h)^2}{D21^2}}+\frac{1}{1+\frac{(2x-s-h)^2}{D21^2}}\right]dX,$$

где m_c – масса скипа; g – ускорение свободного падения.

Расчеты проводились по определению силы взаимодействия двух идентичных электромагнитов с количеством витков N, равных 500, 1000, 1500 и 2000, и с диаметром сердечника 0,016 м, расположенных друг от друга на расстоянии от 0 до 3 см. На каждый электромагнит подавалось постоянное напряжение 30 В. Материалом сердечника была выбрана сталь, материал обмотки – медный провод диаметром 0,5 мм. Ширина каждого электромагнита 0,035 м.

Расчеты силы взаимодействия для каждой испытуемой пары электромагнитов проводились в программе MathCad 15. По результатам расчета были составлены графики зависимости силы взаимодействия двух электромагнитов от величины воздушного зазора. На графике представлены кривые с экстремумами непрерывной функции $F_i(s)$, носящие локальный характер. Это значит, что функция, составленная для каждого электромагнита, имеет одно наибольшее значение функции по сравнению с близлежащими значениями (рис.6). Точка, в которой находится экстремум функции силы взаимодействия, определяет размер воздушного зазора для исследуемого электромагнита [1-3, 6, 8].

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.62

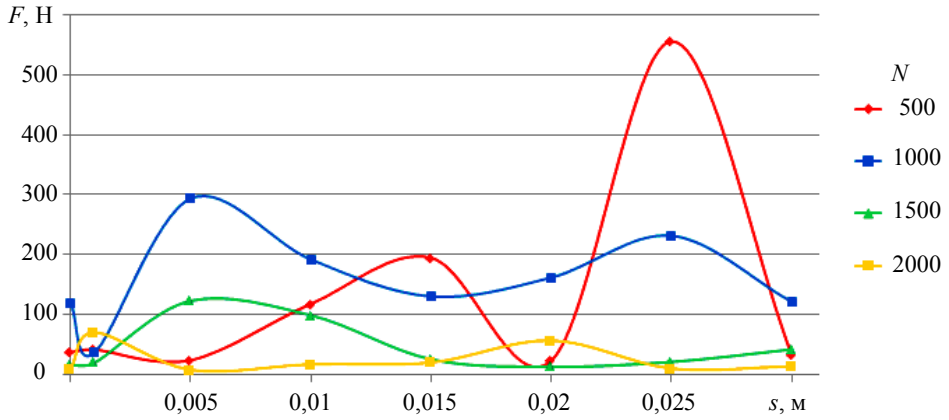


Рис.6. Результаты расчетов силы взаимодействия электромагнитов

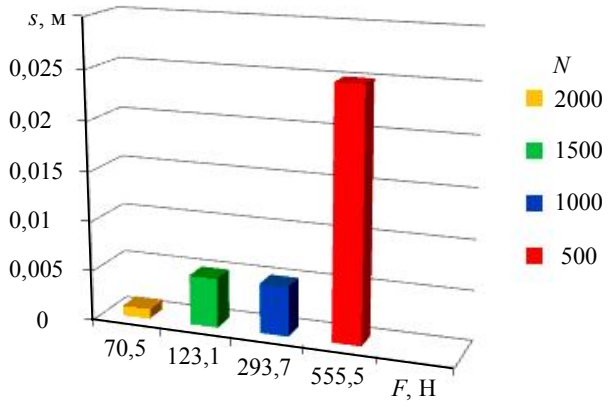


Рис.7. Определение зазора для электромагнитов с различным количеством витков *N*

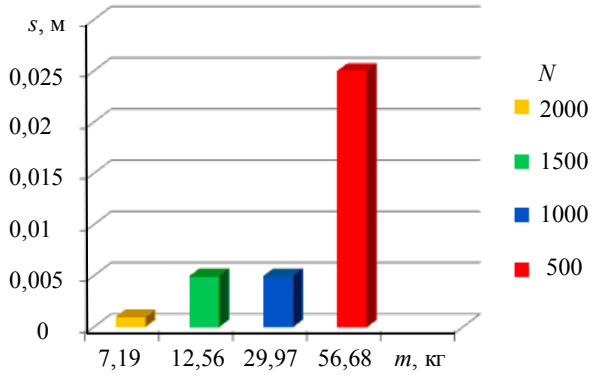


Рис.8. Зависимость зазора от возможной грузоподъемности

Величины зазоров для электромагнитов с количеством витков 500, 1000, 1500 и 2000 установлены в соответствии с рис.7.

Таким образом, по результатам исследований был определен размер воздушного зазора исследуемых электромагнитов, а также максимальная грузоподъемность электромагнитов для определенных зазоров. Диаграмма зависимости размера воздушного зазора от возможной грузоподъемности представлена на рис.8.

Выводы

1. Разработана система регулирования воздушного зазора и защиты скипа электромагнитной подъемной установки. По закону Био – Савара – Лапласа получено выражение для определения магнитной индукции при взаимодействии двух идентичных электромагнитов и проведен векторный анализ и расчет результирующего поля.

2. Методом цилиндрических координат получено выражение для определения силы взаимодействия между электромагнитом скипа и электромагнитом направляющего устройства.

3. Определен размер воздушного зазора для электромагнитов с количеством витков 500, 1000, 1500, 2000 в зависимости от силы взаимодействия электромагнитов.

4. Обоснован выбор наиболее эффективного электромагнита с количеством витков 1500 и определен для него оптимальный размер воздушного зазора 5 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вейц В.Л.* Динамика машинных агрегатов. М.: Машиностроение, 1969. 285 с.

2. *Вейц В.Л.* Динамические расчеты приводов машин / В.Л.Вейц, А.Е.Кочура, А.М.Мартыненко. Л.: Машиностроение, 1971. 182 с.

3. *Вейц В.Л.* Динамика и моделирование электромеханических приводов / В.Л.Вейц, Г.В.Царев. Саранск: Изд-во Мордовского государственного университета, 1992. 291 с.

4. Инновационный патент на изобретение № 27177 МЮ РК. Электромагнитная подъемная установка (варианты) / Б.А.Жаутиков, А.А.Айкеева, Ф.Б.Жаутиков, П.А.Мухтарова. Зарег. 25.06.2013.

5. *Дегтярев Ю.И.* Исследование операций. М.: Высшая школа, 1986. 320 с.

6. *Марк Д.А.* Методология структурного анализа и проектирования / Д.А.Марк, К.Мак-Гоуен. М.: Метатехнология, 1993. 240 с.

7. *Николаев Ю.А.* Разработка методики определения допустимой толщины стенки скипа / Ю.А.Николаев, Б.А.Жаутиков, А.А.Айкеева // Труды Междунар. научн. конф. «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030» / КарГТУ, 2006. С. 314-317.

8. *Пугачев В.С.* Теория стохастических систем / В.С.Пугачев, И.Н.Синицын. М.: Логос, 2000. 161 с.

9. *Свечарник Д.В.* Линейный электропривод. М.: Энергия, 1979. 152 с.

10. *Appunn R.* Modern high speed elevator systems for skyscrapers / R.Appunn, K.Hameyer // Maglev-2014. Rio de Janeiro, Brazil. 2014. P.24.

11. *Appunn R.* Electromagnetic guiding of vertical transportation vehicles: experimental evaluation / R.Appunn, B.Schmulling, K.Hameyer // IEEE Trans ind Electron. 2010. N 57(1). P. 335-343.

12. Control design of passive magnetic levitation tray / C.H.Kim, J.Lim, C.Ahn, J.Park, D.Y.Park // International conference on electrical machines and systems. Busan, Korea. 2013. P. 79.

13. Controller design with high fidelity model for a passive maglev tray system / J.W.Park, C.H.Kim, D.Y.Park, C.Ahn // Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2014. N 15(8). P. 1521-1528.

14. Dynamic analysis of a Maglev conveyor using an EM-PM hybrid magnet / K.J.Kim, H.S.Han, C.H.Kim, S.J.Yang // J Electr. Eng. Technol. 2013. N 8(6). P. 1571-1578.

15. Integrated dynamic simulation of a magnetic bearing stage compatible for particle free environment / B.S.Kim, J.K.Park, D.I.Kim, S.M.Kim, H.G.Choi // Proceedings of the 14theuspen international conference. Dubrovnik, Croatia. 2014. P. 98.

16. Development of a maglev LCD glass conveyor / C.H.Kim, J.M.Lee, H.S.Han, C.W.Lee // Maglev-2011. Daejeon, Korea. 2011. P. 36.

17. *Li S.E.* Design and control of a passive magnetic levitation carrier system / S.E.Li, J.W.Park, C.Ahn // Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2015. N 16(4). P. 693-700.

18. *Ohsaki H.* Japanese superconducting maglev-development and commercial serviceplan // Maglev-2014. Rio de Janeiro, Brazil. 2014. P. 21.

19. *Zhao C.F.* Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality / C.F.Zhao, W.M.Zhai // Veh. Syst. Dyn. 2002. N 38(3). P. 185-210.

***Авторы*: Б.А.Жаутиков**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *info@kgiu.kz* (*Карагандинский государственный индустриальный университет*, *г.Темиртау*, *Республика Казахстан*), **А.А.Айкеева**, *канд. техн. наук*, *доцент*, *aikeeva@mail.ru* (*Карагандинский государственный индустриальный университет*, *г.Темиртау*, *Республика Казахстан*).

Статья принята к публикации 03.05.2017.