ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.365.5

Ячиков И.М.

Положение равновесия тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком

Предложены математические модели для определения амплитуды напряженности магнитного поля и положения металлического тела при его удержании во взвешенном состоянии в индукторе с обратным витком. Проведено компьютерное моделирование возможных точек равновесия цилиндрического и шарообразного тел в магнитном поле индуктора. Установлено, что существует критическая плотность материала и некое минимальное значение тока через индуктор, которые характеризуют предельные теоретические возможности удержания тела данных размеров.

Ключевые слова: левитационная плавка, высокочастотный индуктор, напряженность магнитного поля, взвешенное состояние металла, электромагнитная сила, устойчивое равновесие.

Введение

Высокочастотное электромагнитное поле не только греет и плавит металл, но и позволяет удерживать его в пространстве без каких-нибудь тиглей или ограничивающих стенок. Плавку металла во взвешенном состоянии называют плавкой в электромагнитном тигле или просто левитационной плавкой (с англоязычного термина «*levitation melting*»). Удержание металла во взвешенном состоянии возможно только в неоднородном магнитном поле. При взаимодействии индуктированного тока с вызывающим его полем в поверхностном слое металла возникают механические силы давления. При определенных условиях результирующая электромагнитных сил может быть направлена противоположно силе гравитации и при достаточно большой мощности, подводимой к металлу, может обеспечивать удержание металла во взвешенном состоянии [1, 2].

Одним из простейших вариантов устойчивой левитационной плавки является использование конструкции индуктора, выполненного из медной трубки, содержащего несколько витков в прямом направлении и один – в обратном (противовиток). Такая конструкция нужна для того, чтобы внутри индуктора была область, в которой магнитное поле меньше, чем вокруг нее. Проводник, помещенный в переменное электромагнитное поле, выталкивается в область меньших полей и положение образца внутри индуктора будет более устойчивым. В настоящее время при большом интересе к левитационной плавке простые методы расчета поведения металла в индукторе с обратным витком практически отсутствуют.

Целью работы является разработка упрощенной методики расчета поведения магнитного поля в высокочастотном цилиндрическом индукторе с обратным витком и нахождение положения проводящего тела во взвешенном состоянии.

Моделирование поведения напряженности магнитного поля в цилиндрическом индукторе с обратным витком

Рассмотрим индуктор, содержащий в общем случае n витков диаметра $D=2R_ц$ и $n_{обр}$ верхних витков, намотанных в обратном направлении, того же диаметра. Основная и обратная катушки соединены последовательно, и по ним протекает одинаковый ток (**рис. 1, *а***). Считаем, что магнитное поле внутри индуктора с обратным витком будет определяться суперпозицией магнитных полей от двух винтовых проводников, через которые идут токи в разных направлениях [4, 5]. Расстояние между основной катушкой L и обратными витками L_0 составляет a_1.

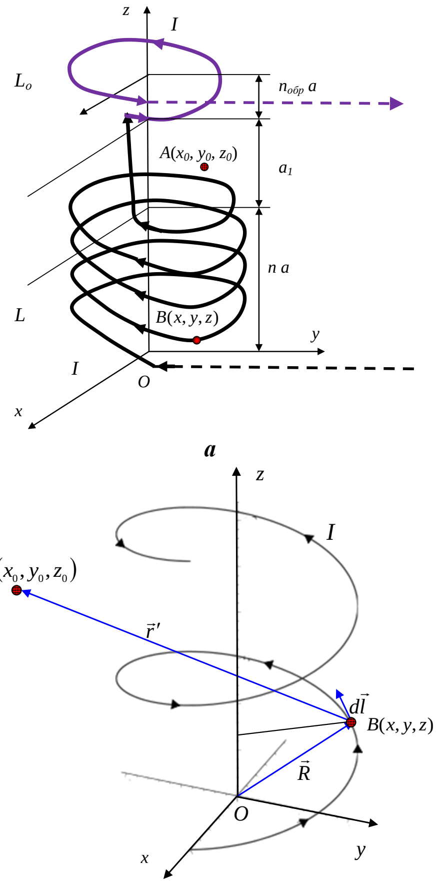


Рис. 1. К расчету магнитного поля в индукторе с обратным витком

Найдем напряженность магнитного поля вблизи проводника с током I в виде винтовой линии в произвольной точке не совпадающей с самой линией. Введем декартову (x, y, z) и цилиндрическую (r, φ, z) системы координат, причем они связаны между собой соотношениями: $r=\sqrt{x^2+y^2}$, $\varphi=\mathrm{arctg}(y/x)$.

Зададим функцию винтовой линии проводника с током в параметрической форме

$$\begin{cases} x(\varphi)=R_{\text{ц}}\cdot\cos(\varphi), \\ y(\varphi)=R_{\text{ц}}\cdot\sin(\varphi), \\ z(\varphi)=\dfrac{a}{2\cdot\pi}\cdot\varphi, \end{cases} \tag{1}$$

где $R_{\text{ц}}$ – радиус винтовой линии; a – шаг винтовой линии (расстояние, на котором находятся витки друг от друга), причем если a>0, то винтовая линия находится в области z>0 и, наоборот, если a<0, то винтовая линия находится в области z<0.

Рассмотрим произвольную точку A, не принадлежащую винтовой линии и имеющую в декартовой системе координаты $A(x_0, y_0, z_0)$, а в цилиндрической $A(r_0, \;, z_0)$ (**рис. 1, *б***).

Величина и направление напряженности магнитного поля в точке A от тока, протекающего через элемент $d\vec{l}$ длины провода (точка B) определяется по закону Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме $d\vec{H}=\dfrac{I}{4\pi r^3}\left[d\vec{l}\times\vec{r}\,'\right]$, где $\vec{r}\,'$ — радиус-вектор, проведенный от элемента тока $d\vec{l}$ (направление $d\vec{l}$ совпадает с током) к точке A.

Распишем координаты векторов (см. **рис. 1, *б***):

$$\vec{OB}=\vec{R}=\left(R_{\text{ц}}\cdot\cos\varphi,\ R_{\text{ц}}\cdot\sin\varphi,\ \frac{a}{2\cdot\pi}\cdot\varphi\right),$$

$$\vec{BA}=\vec{r}\,'=\left(x_0-R_{\text{ц}}\cdot\cos\varphi,\ y_0-R_{\text{ц}}\cdot\sin\varphi,\ z_0-z\right).$$

Расстояние от точки A до точки B определяется модулем последнего вектора

$$r=\left|\vec{r}\,'\right|=\\ =\left((x_0-R_{\text{ц}}\cdot\cos\varphi)^2+(y_0-R_{\text{ц}}\cdot\sin\varphi)^2+\right.\\ \left.+(z_0-z)^2\right)^{1/2}.$$

Вектор $\vec{R}$ является вектором-функцией со скалярным аргументом, описывающей винтовую линию, поэтому направляющий вектор касательной к годографу

$$d\vec{l}=\frac{d\vec{R}}{d\varphi}=d\varphi\cdot\left(-R_{\text{ц}}\cdot\sin\varphi,\, R_{\text{ц}}\cdot\cos\varphi,\ \frac{a}{2\cdot\pi}\right).$$

Расписав векторное произведение $\left[d\vec{l}\times\vec{r}\,'\right]$, найдем напряженность магнитного поля в точке, заданной цилиндрическими координатами $A(r_0, \varphi_0, z_0)$ вблизи проводника в виде винтовой линии, содержащей n витков [3-5]:

$$H_x(r_0,\varphi_0,z_0)=\frac{I}{4\cdot\pi}\times\\ \times\int\limits_0^{2\cdot\pi\cdot n}\left(\frac{R_{\text{ц}}\cdot\cos\varphi\cdot(z_0-z)}{\eta(\varphi)}-\right.\\ \left.-\frac{\left(r_0\cdot\sin\varphi_0-R_{\text{ц}}\cdot\sin\varphi\right)\cdot a/(2\cdot\pi)}{\eta(\varphi)}\right)\cdot d\varphi; \tag{2}$$

$$H_y(r_0,\varphi_0,z_0)=\frac{I}{4\cdot\pi}\times\\ \times\int\limits_0^{2\cdot\pi\cdot n}\left(\frac{R_{\text{ц}}\cdot\sin\varphi\cdot(z_0-z)}{\eta(\varphi)}+\right.\\ \left.+\frac{\left(r_0\cdot\cos\varphi_0-R_{\text{ц}}\cdot\cos\varphi\right)\cdot a/(2\cdot\pi)}{\eta(\varphi)}\right)\cdot d\varphi; \tag{3}$$

$$H_z(r_0,\varphi_0,z_0)=\frac{I}{4\cdot\pi}\times\\ \times\int\limits_0^{2\cdot\pi\cdot n}\frac{R_{\text{ц}}{}^2-r_0\cdot R_{\text{ц}}\cdot\cos(\varphi-\varphi_0)}{\eta(\varphi)}\cdot d\varphi, \tag{4}$$

где $\eta(\varphi)=\left(R_{\text{ц}}^2+r_0^2-2R_{\text{ц}}r_0\cdot\cos(\varphi-\varphi_0)+(z_0-z)^2\right)^{\frac{3}{2}}$; $x(\varphi)$, $y(\varphi)$, $z(\varphi)$ определяются по выражению (1).

Для нахождения магнитного поля внутри индуктора с обратным витком проекции напряженности магнитного поля в точке A определяем как алгебраическую сумму магнитных полей, создаваемых обеими катушками, используя принцип суперпозиции:

$$Hi_x(r_0,\varphi_0,z_0)=H^L{}_x(r_0,\varphi_0,z_0)-\\ -H^{L_0}{}_x(r_0,\varphi_0,z_0-na-a_1); \tag{5}$$

$$Hi_y(r_0,\varphi_0,z_0)=H^L{}_y(r_0,\varphi_0,z_0)-\\ -H^{L_0}{}_y(r_0,\varphi_0,z_0-na-a_1); \tag{6}$$

$$Hi_z(r_0,\varphi_0,z_0)=H^L{}_z(r_0,\varphi_0,z_0)-\\ -H^{L_0}{}_z(r_0,\varphi_0,z_0-na-a_1), \tag{7}$$

где H^L, H^{L0} - проекции напряженности магнитного поля от основной катушки и обратной катушки соответственно, определяемые по формулам (2)-(4).

Радиальная Hi_r и азимутальная Hi_φ проекции и модуль вектора напряженности магнитного поля Hi в точке A:

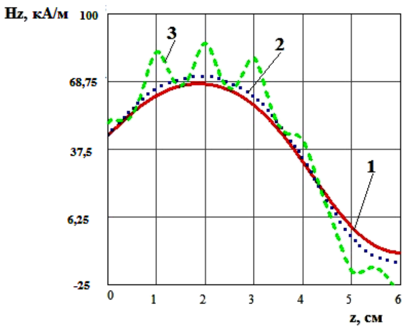
$$Hi_r(r_0,\varphi_0,z_0)=Hi_y(r_0,\varphi_0,z_0)\sin\varphi_0-\\ -Hi_x(r_0,\varphi_0,z_0)\cos\varphi_0; \tag{8}$$

$$Hi_{\varphi}(r_0,\varphi_0,z_0) = Hi_y(r_0,\varphi_0,z_0)\cos\varphi_0 - \\ - Hi_x(r_0,\varphi_0,z_0)\sin\varphi_0; \tag{9}$$

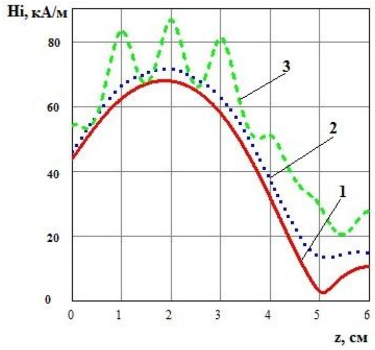
$$Hi(r_0,\varphi_0,z_0) = \sqrt{Hi_x(r_0,\varphi_0,z_0)^2 + \\ + Hi_y(r_0,\varphi_0,z_0)^2 + Hi_z(r_0,\varphi_0,z_0)^2}, \tag{10}$$

Полученные уравнения (5)-(10) дают математическую модель для определения магнитного поля вблизи индуктора с обратным витком.

С помощью созданной компьютерной программы [6] проведено моделирование поведения амплитуды магнитного поля в индукторе, имеющем следующие параметры: $R_ц$=20 мм; a=a_1=10 мм; n=4; I=1 кА - амплитуда тока. На **рис. 2, 3** приведены результаты исследования поведения вертикальной составляющей и модуля вектора напряженности магнитного поля по высоте и радиусу индуктора с обратным витком. Видно, что вертикальная составляющая магнитного поля вносит решающий вклад в модуль вектора магнитного поля, кроме этого, по радиусу индуктора от его оси до 0,5$R_ц$ модуль вектора напряженности магнитного поля меняется не более чем на 40%, поэтому можно в горизонтальной плоскости при r<0,5$R_ц$ считать его примерно однородным.



а

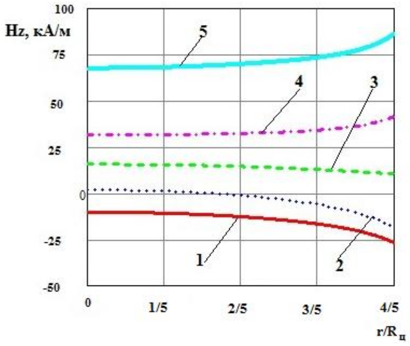


б

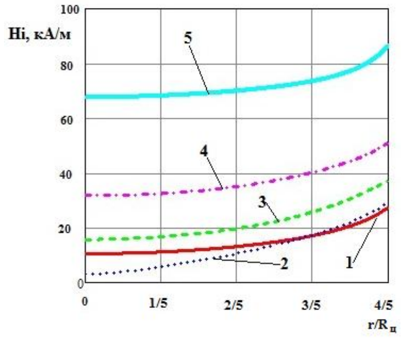
Рис. 2. Вертикальная составляющая (а) и модуль вектора напряженности магнитного поля (б) по высоте индуктора на разных расстояниях от его оси (φ=0): 1 – r=0; 2 – r=$R_ц$/2; 3 – r=4$R_ц$/5

Для амплитуды вертикальной проекции напряженности магнитного поля на оси индуктора получено уравнение регрессии в виде полинома четвертой степени при амплитуде тока через индуктор I_0=1 кА (z – задается в метрах)

$$H_0(z) = 38613078016z^4 - \\ - 3461824256z^3 + 24046264z^2 + \\ + 1775109z + 44681{,}285,\ \text{А/м}.$$



а



б

Рис. 3. Вертикальная составляющая (а) и модуль вектора напряженности магнитного поля (б) по относительному радиусу индуктора на разной его высоте (φ=0): 1 - z=a(n+1)+a_1; 2 - z=an+a_1; 3 - z=an+a_1/2; 4 - z=an; 5 - z=an/2

При этом средняя относительная ошибка аппроксимации составила около 3%. Так как напряженность магнитного поля линейно зависит от тока через индуктор, поэтому распределение напряженности магнитного поля на оси данного индуктора для других токов можно записать как $H(z)=H_0(z)\cdot I/I_0$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ИНДУКТОРЕ С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ

Нагреваемый металл или капля расплава в индукторе будет удерживаться во взвешенном состоянии при условии, что напряженность поля под телом будет больше напряженности поля над ним. Электромагнитное давление на металл при ярко выраженном поверхностном эффекте проникновения поля в проводник выражается формулой [1, 2] $P_{эм}=\mu\mu_0H^2/4$, Па, где H - амплитуда напряженности магнитной составляющей поля на поверхности металла, А/м; $\mu_0=4\pi10^{-7}$ В·с/(А·м) - магнитная постоянная. Из формулы видно, что электромагнитное давление на металл полностью определяется напряженностью магнитного поля. Кроме этого, так как напряженность магнитного поля в индукторе пропорциональна току, то электромагнитное давление на металл пропорционально квадрату силы тока.

Зная магнитное поле, можно проанализировать характер движения и положение металла при его удержании во взвешенном состоянии в индукторе. Рассмотрим поведение в индукторе немагнитного цилиндрического тела диаметром d и высотой h_0. Считаем, что положительное направление силы направлено вертикально вверх. Начало координат находится на оси основания нижнего торца цилиндрической катушки индуктора (**рис. 4, *а***). Пусть положение тела определяется координатой z. На цилиндрическое тело действует электромагнитная сила

$$\vec{F}_{эм} = \vec{P}_{эм} S = \frac{\mu_0 S}{4}\left[H^2(z) - H^2(z+h_0)\right], \qquad (11)$$

сила тяжести $m_0\vec{g}$, сила Архимеда $\vec{F}_а = m_0\vec{g}(\rho_ж/\rho_0)$ и сила сопротивления среды направленная в противоположную сторону движения тела $F_{тр} = \frac{c_x \rho_ж S_0}{2}\left(\frac{dz}{dt}\right)^2$ Уравнение одномерного движения тела с учетом воздействия данных сил можно записать как

$$\frac{d^2 z}{dt^2} m_0 = F_{эм} - g m_0\left(1 - \frac{\rho_ж}{\rho_0}\right) - \operatorname{sign}\left(\frac{dz}{dt}\right)\frac{c_x \rho_ж S_0}{2}\left(\frac{dz}{dt}\right)^2, \qquad (12)$$

где C_x - коэффициент сопротивления движению тела; $m_0 = \rho_0 h_0 S = \rho_0 h_0 \pi d^2/4$ - масса тела; ρ_0, $\rho_ж$- плотность металла и окружающей среды соответственно; $S = \pi d^2/4$ - площадь воздействия электромагнитного давления; S_0 - площадь контакта поверхности гидравлического трения («миделево сечение»).

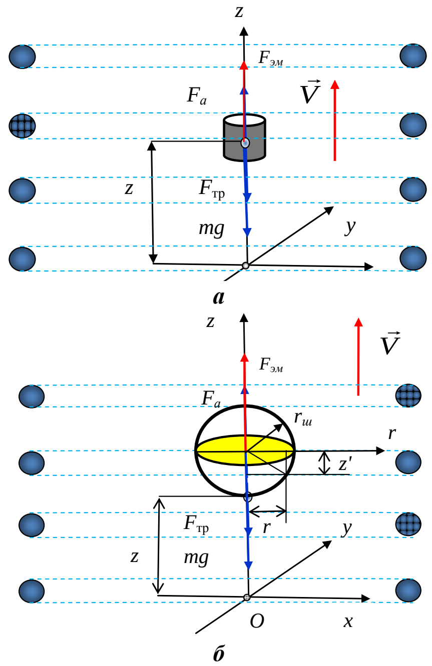


Рис. 4. Основные силы, действующие в индукторе: а – на цилиндрическое тело; б – на шарообразное тело

Найдем положение тела, при котором наступит его равновесие в вертикальном неоднородном электромагнитном поле. Учитывая, что динамические составляющие равны нулю ($z''=0$, $z'(t)=0$), получим выражение для равнодействующей силы на цилиндрическое тело, находящееся в индукторе, в зависимости от его положения

$$F(z) = \frac{\mu_0 m_0}{4\rho_0 h_0}\left(H(z)^2 - H(z+h_0)^2\right) - m_0 g\left(1 - \frac{\rho_ж}{\rho_0}\right).$$

При неоднородном поле $H(z)$ положения равновесия тела определяются корнями уравнения

$$\frac{\mu_0}{4\rho_0 h_0}\left(H(z)^2 - H(z+h_0)^2\right) - g\left(1 - \frac{\rho_ж}{\rho_0}\right) = 0. \qquad (13)$$

Напряженность магнитного поля на оси индуктора задавалась в виде полинома заданной степени. Нелинейное уравнение (13) решалось итерационным методом, находились действительные корни большие или равные нулю, которые и определяют положения равновесия тела находящегося во взвешенном состоянии в индукторе.

Проведено моделирование поведения амплитуды напряженности магнитного поля и положения равновесия тела в индукторе, имеющем следующие параметры: $R_ц$=20 мм - радиус цилиндрического индуктора; $a=a_1$=10 мм; n=4; $n_{обр}$=1. Общая высота индуктора $L=n{\cdot}a+a_1+n_{обр}a$=60 мм.

Для цилиндрических алюминиевых тел диаметром d=5 мм (ρ_0=2,7 г/см^3) получена зависимость равнодействующей силы по высоте индуктора (**рис. 5**).

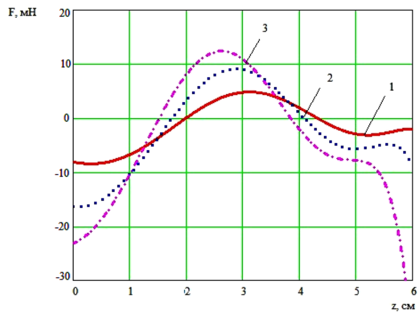


Рис. 5. Равнодействующая сила, воспринимаемая алюминиевым цилиндром диаметром *d*=5 мм в зависимости от его положения в индукторе при высоте цилиндра: 1 – h_0=5 мм; 2 – h_0=10 мм; 3 – h_0=15 мм

Имеются два положения равновесия для алюминиевых тел высотой: для h_0=5 мм (m_0=0,265 г) - z_0=43 мм и z_1=20 мм; для h_0=10 мм (m_0=0,53 г) - z_0=40,8 мм и z_1=17,5 мм; для h_0=15 мм (m_0=0,795 г) -

z_0=38,5 мм и z_1=15,2 мм. При заданных условиях расчета положение равновесия тела возможно вблизи второго и четвертого витка индуктора. Рассмотрим более подробно характер равнодействующей силы вблизи точек положения равновесия (см. **рис. 5**). Видно, что при отклонении тела из первой точки равновесия вниз ($z<z_1$) или вверх ($z>z_1$) равнодействующая сила $F(z)$ не возвращает цилиндр в положение равновесия, то есть оно является неустойчивым. Устойчивым является положение равновесия, находящееся вблизи минимума магнитного поля, расположенного около четвертого витка индуктора (точка z_0).

На **рис. 6** показаны результаты компьютерного моделирования положения точек равновесия тела от тока индуктора для двух алюминиевых цилиндрических тел, имеющих разную высоту h_0, находящихся в воздухе и воде. Видно, что есть некое значение тока $I_{мин}$, ниже которого поле не удерживает цилиндрическое тело данных размеров. Значение $I_{мин}$ снижается с увеличением плотности окружающей среды и уменьшением h_0. Видно также, что, начиная с некоторого значения тока $I_{мах}$, при его увеличении положение тела меняется незначительно.

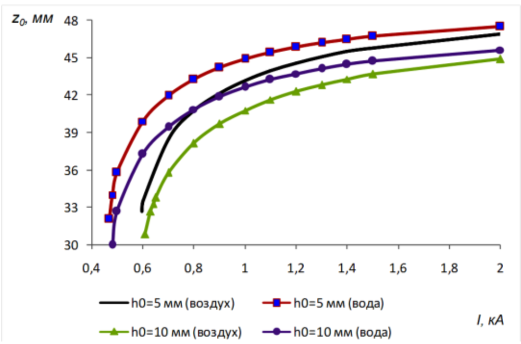


Рис. 6. Положение точек равновесия тела от тока индуктора для двух алюминиевых цилиндрических тел, имеющих разную высоту, находящихся в воздухе и воде

Необходимо отметить, что положение точек равновесия тела не зависит от диаметра цилиндра, кроме этого, с увеличением плотности удерживаемого в индукторе металла кривая равнодействующей силы (см. **рис. 5**) опускается в сторону отрицательных значений. При некоторой критической плотности $\rho_{кр}$ в решении уравнения (13) пропадают действительные положительные корни, что говорит о невозможности удержания тела электромагнитными силами. На **рис. 7** показана расчетная зависимость положения точек равновесия для цилиндрического тела (h_0=5 мм, d=5 мм) от разности плотностей материала, из которого оно изготовлено, и окружающей среды при разных токах индуктора. Видно, что для каждого тока существует своя критическая плотность, например, при I=1 кА можно удерживать только тела плотностью меньшей 7,7 г/см^3, то есть теоретически невозможно удержать медный цилиндр данных размеров (ρ_0=8 г/см^3). Установлено, что рассматриваемая критическая плотность пропорциональна квадрату силы тока $\rho_{кр} \sim I^2$.

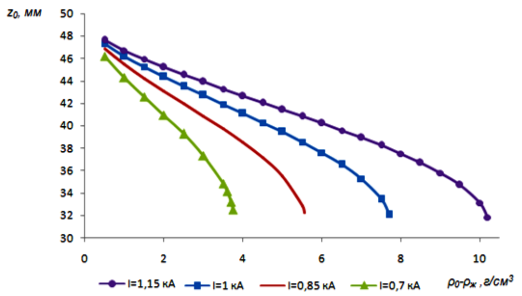


Рис. 7. Положение точек равновесия цилиндрического тела от плотности, материала из которого оно изготовлено, при разных токах индуктора

Моделирование положения равновесия во взвешенном состоянии шарообразного тела в индукторе с обратным витком

Найдем положение шарообразного тела радиусом $r_ш=d_ш/2$, при котором наступит его равновесие в электромагнитном поле. Как и в случае цилиндрического тела, на шарообразное тело действуют электромагнитная сила, сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления среды направленная в противоположную сторону движения тела (см. **рис. 4, *б***).

Пусть динамические составляющие сил равны нулю, тогда выражение для равнодействующей силы на тело, находящееся в индукторе, в зависимости от его положения можно записать как $F(z)=F_{эм}(z)-m_0 g(1-\rho_ж/\rho_0)$, где $m_0=(4/3)\pi \cdot r_ш^3 \rho_0$ - масса шарообразного тела.

При известном локальном электромагнитном давлении на металл полную электромагнитную силу в зависимости от положения шарообразного тела можно найти как $F_{эм}(z)=2\pi \int_0^{r_ш} P(z,\, r) r \cdot dr$, где $P(z, r)=(\mu_0/4)(H^2(z+r_ш-z')-H^2(z+r_ш-z'+2z'))$ - локальное электромагнитное давление. С учетом того, что $z'=\sqrt{r_ш^2-r^2}$, получим

$$F(z)=\frac{\pi\mu_0}{2}\int_0^{r_ш}\left(H^2\left(z+r_ш-\sqrt{r_ш^2-r^2}\right)-\right.$$
$$\left.-H^2\left(z+r_ш+\sqrt{r_ш^2-r^2}\right)\right)\cdot r\cdot dr-$$
$$-m_0 g\left(1-\frac{\rho_ж}{\rho_0}\right).$$

Равновесие шарообразного тела определяются корнями уравнения

$$\frac{\mu_0}{2}\int_0^{r_ш}\left(H^2\left(z+r_ш-\sqrt{r_ш^2-r^2}\right)-\right.$$
$$\left.-H^2\left(z+r_ш+\sqrt{r_ш^2-r^2}\right)\right)\cdot r\cdot dr- \qquad (14)$$
$$-\frac{4}{3}r_ш^3\rho_0 g\left(1-\frac{\rho_ж}{\rho_0}\right)=0.$$

Получена зависимость равнодействующей силы по высоте индуктора для шарообразных алюминиевых тел с диаметром $d_ш$=5 мм (m_0=0,177 г), $d_ш$=10 мм (m_0=1,41 г) и $d_ш$=12,5 мм (m_0=2,76 г) (**рис. 8**). Положения равновесия для шарообразных тел очень близки с положениями равновесия для цилиндрических тел при $d_ш$=h_0. Была проанализирована производная равнодействующей силы в точке равновесия z_1 при изменении амплитуды тока через индуктор. Производная должна быть отрицательной и чем выше по модулю, тем равновесие будет более устойчивым.

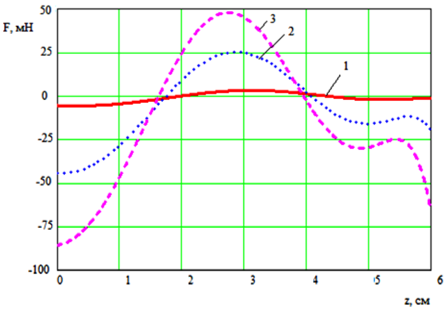


Рис. 8. Равнодействующая сила, воспринимаемая алюминиевым шаром, находящимся в воздухе, в зависимости от его положения по высоте индуктора при: 1 – $d_ш$=5 мм; 2 – $d_ш$=10 мм; 3 – $d_ш$ =12,5 мм

Из **рис. 9** видно, что производная равнодействующей силы в точке равновесия z_1 при уменьшении тока падает практически линейно и при I=$I_{мин}$ $dF(z_1)/dz$=0. Видно также, что для цилиндрического тела $|dF(z_1)/dz|$ примерно в 1,4 раза больше, чем для шарообразных. Поэтому при одинаковом токе индуктора положение равновесия для цилиндрических тел более устойчивое, чем для шарообразных.

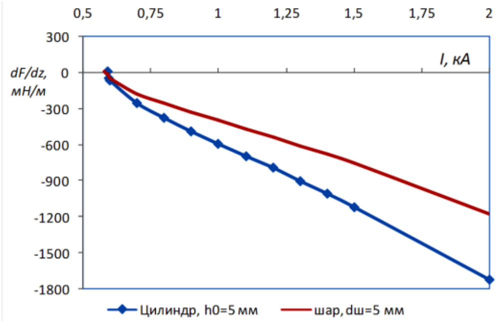
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана математическая модель поведения амплитуды напряженности магнитного поля в высокочастотном цилиндрическом индукторе с обратным витком. Предложен алгоритм расчета положения равновесия во взвешенном состоянии цилиндрического и сферического тела.

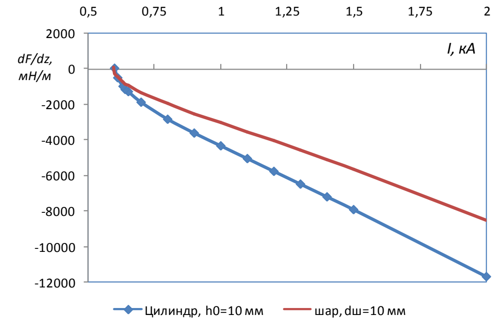
2. Установлено, что положение равновесия металлического тела во взвешенном состоянии в индукторе зависит от его конструкции (от количества витков, от расстояния между витками, от положения обратного витка и др.), от протекающего через индуктор тока, от формы и размеров тела.

3. Существует критическая плотность материала, выше которой индуктор, имеющий включенный последовательно с основной катушкой противовиток с заданным током, не может удержать металлическое тело данной формы. Критическая плотность материала пропорциональна квадрату амплитуды силы тока, протекающего через индуктор. Есть некое минимальное значение тока через индуктор, ниже которого поле не удерживает тело заданной плотности и данных размеров.

4. Установлено, что при одномерном движении тел и заданном токе индуктора положение равновесия для цилиндрического тела более устойчивое, чем для шарообразного, при одинаковых диаметре и высоте цилиндра и диаметре шара.



а



б

Рис. 9. Производная в точке равновесия для цилиндрического и шарообразного тела от тока через индуктор при: а – h_0=$d_ш$=5 мм; б – h_0=$d_ш$=10 мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Л.: Машиностроение, 1979. 104 с.

2. Глебовский В.Г., Бурцев В.Т. Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии. М.: Металлургия, 1974. 176 с.

3. Моделирование поведения магнитного поля в ванне ДППТ при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду/ И.М. Ячиков, И.В. Портнова, Р.Ю. Заляутдинов // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 183-190.

4. Ячиков И.М., Заляутдинов Р.Ю. Исследование магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной форме токоподводящей шины к подовому электроду // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. №3. С.58-63.

5. Моделирование поведения магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком/ И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, М.О. Шмелев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. №1. С. 47-53.

6. Ячиков И.М., Шмелев М.О. Моделирование напряженности магнитного поля в индукторе с противовитком: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614306. 2014.

INFORMATION IN ENGLISH

POSITION BALANS OF BODY SUSPENDED IN HIGH-FREQUENCY INDUCTOR WITH REVERSE COIL

Yachikov I.M.

The mathematical model to determine the amplitude of magnetic field and the position of a metal body held in suspension in the inductor coil with reverse coil. Computer simulation of the possible equilibrium points of the cylindrical and spherical bodies in the magnetic field of the inductor was made. It is established that there is a critical density of the material and the minimum value of current through the inductor, which characterizes the maximum theoretical capacity of retaining the body of given sizes.

Keywords: levitation melting, high-frequency inductor, magnetic field strength, suspension of metal, electromagnetic force, stable equilibrium.

REFERENCES

1. Fogel A.A. *Induktsionnyy metod uderzhaniya zhidkikh metallov vo vzveshennom sostoyanii* [Induction method of liquid metals retention in suspended state]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1974. 104 p.

2. Glebovsky V.G., Bourtsev V.T. *Plavka metallov i splavov vo vzveshennom sostoyanii* [Melting of metals and alloys in suspended state]. Moscow: Metallurgy, 1974. 176 p.

3. Yachikov I.M., Portnova I.V., Zalyautdinov R.Yu. *Modelirovaniye povedeniya magnitnogo polya v vanne dugovoy pechi postoyannogo toka pri raznykh konstruktsiyakh tokopodvoda k podovomu elektrodu* [Modeling of magnetic field behavior in the bath of a DC arc furnace at different structures of current supply to the bottom electrode]. Mathematical and software in the industrial and social spheres: Magnitogorsk: Publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 183 190.

4. Yachikov I.M., Zalyautdinov R.Yu. *Issledovaniye magnitnogo polya v vanne dugovoy pechi postoyannogo toka pri raznoy forme tokopodvodyashchey shiny k podovomu elektrodu* [Investigation of magnetic field in the bath of a DC arc furnace at different forms of the busbar connected to the bottom electrode]. Proceedings of universities. Iron and steel. 2014, № 3, pp. 58 63.

5. Yachikov I.M., Vdovin K.N., Shmelev M.O. *Modelirovaniye povedeniya magnitnogo polya i polozheniya tela vo vzveshennom sostoyanii v vysokochastotnom induktore s obratnym vitkom* [Modeling of magnetic field behavior and position of a body suspended in the high-frequency inductor with reverse coil]. Mathematical and software systems in industrial and social spheres. 2013, №1, pp. 47 53.

6. Yachikov I.M., Shmeliov M.O. Modelirovaniye napryazhennosti magnitnogo polya v induktore s protivovitkom [Modeling of magnetic field in the inductor with reverse coil]. Certificate of state registration of software № 2014614306. 2014.