

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА ПРИ ЕГО УДЕРЖАНИИ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.М. Ячиков<sup>1</sup>, В.И. Ширяев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

**Введение.** Существуют различные практические способы реализации магнитной левитации как метода удержания или подъема объекта с помощью одного только магнитного поля. В работе рассматривается следующий принцип создания равновесия тела. Небольшой цилиндрический неодимовый магнит удерживается при электромагнитном взаимодействии с пульсирующим током, протекающим через катушку. Для возникновения парящего эффекта при приближении магнита к катушке ток через нее отключается электронным ключом, срабатывающим от цифрового датчика Холла, расположенного на оси катушки. Вызывает практический интерес разработка простых рекомендаций, позволяющих прогнозировать факт удержания тела при данной конструкции катушки, токе через нее, размерах и свойствах постоянного магнита. Мало инженерных методик, позволяющих определять положение тела, его устойчивость и характер движения во взвешенном состоянии.

**Целью исследования** является теоретическое и экспериментальное исследование динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле и создание упрощенной расчетно-экспериментальной методики для определения характеристик поведения тела во взвешенном состоянии.

**Материалы и методы.** При выполнении работы применялись методы математического и компьютерного моделирования, а также экспериментального исследования. Созданное программное обеспечение с использованием средств разработки пакета *Mathcad* основывалось на известных методах численного интегрирования системы дифференциальных уравнений.

**Результаты.** Предложена упрощенная расчетно-экспериментальная методика по определению магнитных моментов для постоянного цилиндрического магнита и катушки с током, а также примерного значения координаты положения тела во взвешенном состоянии. Разработана математическая модель одномерного движения магнита под действием силы тяжести и электромагнитной силы взаимодействия с импульсным магнитным полем при известном состоянии, на котором происходит выключение тока.

**Заключение.** Экспериментально и посредством компьютерного моделирования установлено, что чем выше частота пульсаций, тем при удержании тела наблюдается его меньшая амплитуда пульсаций и устанавливается более устойчивое равновесие. Частота пульсаций уменьшается с увеличением массы постоянного магнита, причем есть критическая масса, которая уже не удерживается в электромагнитном поле. При увеличении напряжения, подаваемого на коммутатор катушки, возрастает частота пульсаций тела и потребляемая электрическая мощность, при этом коэффициент заполнения импульсов тока снижается.

*Ключевые слова:* постоянный магнит, импульсное магнитное поле, датчик Холла, остаточная магнитная индукция, электромагнитная сила, магнитная левитация, частота колебаний.

### Введение

Английский физик Самуэль Ирншоу в середине XIX века доказал теорему, что пассивная левитация магнита над другим магнитом невозможна, одним из ее следствий является невозможность левитировать одному магниту над другим. Однако эта теорема верна только для случая статического равновесия и не рассматривает ситуацию, когда магнитное поле является динамическим. Магнитная левитация (*magnetic levitation*) возможна в следующих случаях: когда магнитное поле изменяется во времени, когда нестабильный постоянный магнит стабилизирует свое положение с помощью активной системы управления и когда сама система состоит из элементов с некоторыми движущими силами.

Существуют различные практические способы реализации магнитной левитации как метода удержания или подъема объекта с помощью одного только магнитного поля. Это могут быть способы, связанные с использованием вихревых токов, удерживающих тело в потенциальной яме [1], или постоянного магнита, находящегося в обратной связи с импульсным магнитным полем [2]. Основная проблема магнитной левитирующей системы связана с ее динамической устойчивостью, то есть способностью подавлять любое возможное колебательное движение. Большинство существующих схем левитации имеют недостаточное подавление колебаний тела, и его вибрации могут вывести объект за пределы зоны равновесия. Подавление перемещения тела из зоны равновесия может осуществляться несколькими способами, одним из которых является использование электромагнитов, управляемых посредством электроники.

На сегодняшний день самыми сильными постоянными магнитами (ПМ) являются неодимовые магниты (NdFeB), в которых используется сплав, содержащий редкоземельный материал неодим, а также железо и бор. Рассматриваемые ПМ имеют высокие показатели остаточной магнитной индукции и устойчивости к размагничиванию, что позволяет использовать их в изделиях и оборудовании, где требуется сильное магнитное поле.

Рассматриваемая в настоящей работе идея левитации достаточно проста и широко рассмотрена в Интернете прежде всего для демонстрации магнитной левитации тела. Небольшой цилиндрический неодимовый магнит удерживается при электромагнитном взаимодействии с током, протекающим через катушку. Для возникновения парящего эффекта при приближении магнита к катушке ток через нее отключается электронным ключом, срабатывающим от фотодатчика или цифрового датчика Холла, расположенного на оси катушки [3, 4]. Одна из простейших электрических схем такого устройства показана на рис. 1. Магнит под действием силы тяжести начинает падать, удаляясь от катушки, при некотором расстоянии от нее ток подается вновь, удерживая магнит в «подвешенном» состоянии. В реальности его поднятие и опускание осуществляется в очень небольшом диапазоне высот, но с довольно высокой частотой. Эта система впервые была реализована Холмсом [5], который заставил находиться в «подвешенном» состоянии магнитную стрелку. Есть ряд работ, посвященных разработке различных методов управления системами магнитной левитации [6, 7].

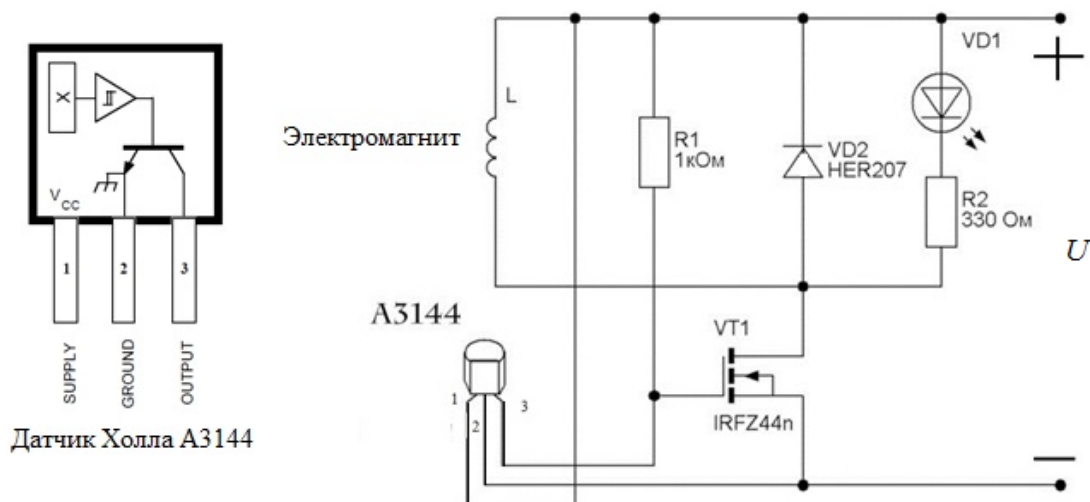


Рис. 1. Принципиальная схема электронного коммутатора тока через катушку управляемого сигналом датчика Холла, используемая для возникновения парящего эффекта при приближении постоянного магнита к катушке

Fig. 1. Schematic diagram of an electronic switch of current through a coil controlled by a signal Hall sensor used to create a hover effect when approaching a constant magnet to coil

В промышленной сфере самый большой объем исследований в области магнитной левитации связан с использованием транспортировки различных грузов. Его цель состоит в том, чтобы ис-

пользовать «парящий» транспорт и обеспечить максимально быструю и эффективную перевозку. Следующее использование левитации – это магнитные подшипники, предназначенные для удержания двух систем без непосредственного контакта. Вместо того чтобы изолировать компоненты от приложенных нагрузок, магнитная пара служит для передачи силы и вращающих моментов для соединения двух компонентов вместе без непосредственного контакта [8, 9].

Система магнитной левитации является нелинейной и открытой неустойчивой системой. Данные аспекты делают моделирование поведения и задачу управления такими системами довольно сложными. В настоящее время в литературе практически отсутствуют критерии, простые формулы и рекомендации по вопросу: будет ли наблюдаться взвешенное состояние при данной конструкции катушки, токе через нее, размерах и свойствах постоянного магнита. Нет инженерных методик, позволяющих прогнозировать положения тела, его устойчивость и характер движения во взвешенном состоянии.

**Целью работы** является теоретическое и экспериментальное исследование динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле и создание упрощенной расчетно-экспериментальной методики для определения характеристик поведения тела во взвешенном состоянии.

### 1. Расчет поля постоянного цилиндрического магнита и силы взаимодействия двух магнитов

Для постоянных магнитов, как правило, используются допущения, что намагниченность  $M$  однородна по всему объему и существует эквивалентность магнитного поля, создаваемого током катушки и постоянного магнита. Внутри самого магнита (без других внешних полей) индукция магнитного поля задается соотношением  $B = \mu_0 \cdot M$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – универсальная магнитная постоянная. Намагниченность постоянного магнита можно рассматривать как результат поверхностной плотности тока, которая определяется как  $J_m = \nabla \times M = \text{rot } M$ .

Для того чтобы различать индуцированное магнитное поле и то поле, что вызвано спонтанно магнитным материалом, вводится индуцированное магнитное поле, обозначаемое как  $H$ , и определяется оно как  $J_m = \nabla \times H = \text{rot } H$ .

Плотность магнитного потока внутри постоянного магнита является векторной суммой  $H$  и  $M$ , в то время как снаружи ПМ намагничивание  $M = 0$  и плотность магнитного потока  $B$  связана с напряженностью магнитного поля  $H$  константой. Это приводит к тому, что индукция магнитного поля  $B$  является непрерывной функцией, а  $M$  и  $H$  являются разрывными функциями.

Для точного расчета поля постоянного цилиндрического магнита вектор магнитной индукции определяется как  $\vec{B} = [\nabla \times \vec{A}]$ , где  $\nabla$  – оператор Набла,  $\vec{A}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J_m(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} dV'$  – векторный потенциал,  $J_m(\vec{x}')$  – плотность тока,  $dV'$  – элемент объема [10, 11]. В цилиндрической системе координат по этим уравнениям можно определить радиальную и осевую составляющие поля для ПМ с заданной намагниченностью  $M$ .

Для инженерного расчета воспользуемся алгоритмом, предложенным в работе [12]. В качестве упрощающих допущений принимаем, что мы рассматриваем магнитное поле на расстоянии существенно больше, чем размеры магнита. Если заменить магнит с однородной намагниченностью  $M$  круговым током  $I_m$ , текущим по боковой поверхности цилиндра радиуса  $R$ , то силу токов можно выразить через намагниченность магнита как  $I_m = M \cdot 2\pi \cdot R$ . Рассмотрим взаимодействие двух круговых токов, расположенных на одной оси  $Oz$  (рис. 2). Используя правило левой руки, можно показать, что осевая составляющая магнитного поля  $B_z$  приводит к появлению сил Ампера, стремящихся растянуть (или сжать) кольцо, – векторная сумма этих сил равна нулю. Наличие радиальной составляющей поля  $B_r$  приводит к возникновению сил Ампера, направленных вдоль оси магнитов, то есть к их притяжению или отталкиванию.

Так как рассматриваемая система обладает осевой симметрией, то модуль радиальной составляющей постоянен во всех точках кольцевого тока второго магнита. Следовательно, проекция силы, действующей на второй магнит, с учетом правила левой руки определяется как

$F = -I_2 B_r 2\pi r_2$ . Положительное направление силы соответствует притяжению магнитов, положительное направление тока традиционно – против часовой стрелки.

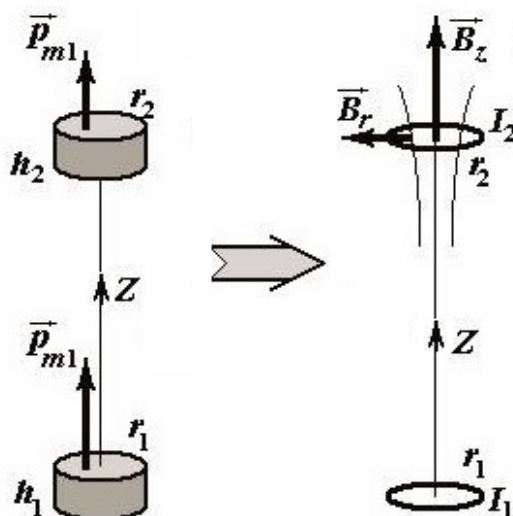


Рис. 2. Взаимодействие двух цилиндрических постоянных магнитов, расположенных на одной оси (а), и эквивалентная замена их круговыми токами (б)  
 Fig. 2. Interaction of two cylindrical permanent magnets, located on the same axis (a), and their equivalent replacement by circular currents (б)

Магнитное поле, создаваемое первым магнитом, эквивалентно полю кругового тока. В рамках сделанных приближений ( $z \gg r, h$ ) осевая составляющая поля определяется формулой

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot P_{m1}}{2\pi \cdot z^3}, \quad (1)$$

где  $P_{m1} = I_1 S_1 = J_1 h_1 \pi r_1^2 = J_1 V_1$  – магнитный момент первого магнита ( $V_1$  – его объем).

Радиальная составляющая поля

$$B_r = \frac{r_2}{2} \frac{\Delta B_z}{\Delta z} = \frac{3\mu_0 \cdot P_{m1}}{4\pi \cdot z^4} r_2. \quad (2)$$

Сила взаимодействия между магнитами определяется скоростью изменения осевой составляющей поля  $dB_z/dz$ . Подставляя выражение для радиальной составляющей поля, получим формулу для вычисления силы взаимодействия двух магнитов

$$F_m = -2\pi r_2 I_2 B_r = -I_2 \cdot 2\pi \cdot r_2 \frac{3\mu_0 \cdot P_{m1}}{4\pi \cdot z^4} r_2 = \frac{3\mu_0 \cdot P_{m1} \cdot P_{m2}}{2\pi \cdot z^4}. \quad (3)$$

В полученной зависимости (3) в качестве характеристик магнитов входят только их магнитные моменты, поэтому она может применяться для магнитов и катушек с током любой формы, важно только, чтобы расстояние между ними превышало их размеры и их магнитные моменты были параллельны.

## 2. Математическая модель поведения постоянного магнита в импульсном магнитном поле

Считаем, что на ПМ в «подвешенном» состоянии действуют две противоположно направленные силы: тяжести  $mg$  и электромагнитного взаимодействия  $F_m$  с полем катушки. Выберем цилиндрическую систему координат с началом, расположенным на пересечении оси катушки и нижнего ее торца (рис. 3).

Согласно закону Ньютона  $m dW/dt = mg - F_m$ , где  $m, W$  – масса и скорость тела соответственно.

Для обеспечения динамического равновесия тела применяется датчик Холла со схемой коммутации, позволяющей при координате  $z$  тела меньшей или равной  $Z_{off}$  отключать магнитную силу (ток через катушку  $I = 0$ ), а при координате  $z$  более или равной  $Z_{on}$  – ее включать (ток через катушку  $I \neq 0$ ).

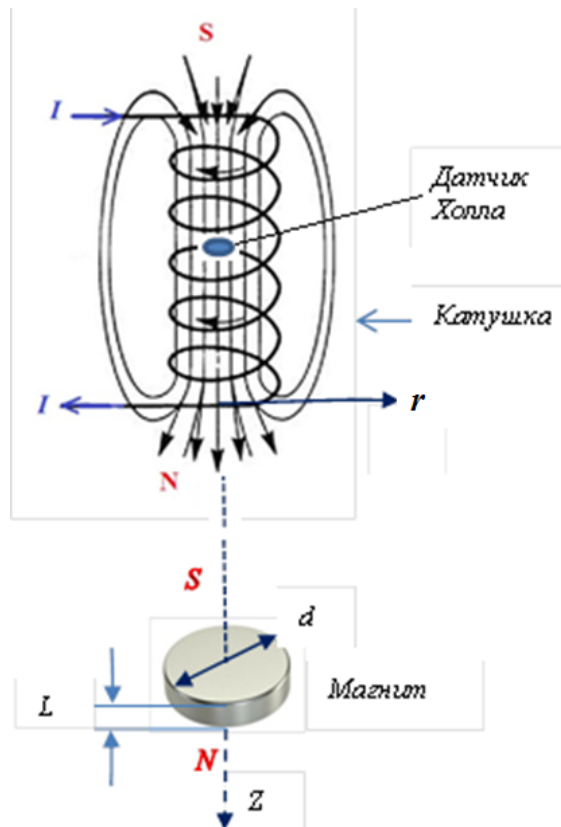


Рис. 3. Система координат при расчете движения магнита  
в импульсном магнитном поле катушки  
Fig. 3. Coordinate system for calculating the movement of the magnet

С учетом включения и выключения электромагнитной силы, определяемой по формуле (3), движение тела в вертикальном направлении приближенно можно записать системой дифференциальных уравнений (СДУ):

$$\frac{dW}{dt} = g - \alpha \cdot \frac{3\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{2\pi \cdot m \cdot z^4} \tag{4}$$

$$\frac{dz}{dt} = W \tag{5}$$

где параметр коммутации тока, проходящего через катушку,

$$\alpha = \begin{cases} 0, & z \leq Z_{off} \\ 1, & z \geq Z_{on} \\ \alpha, & Z_{on} < z < Z_{off} \end{cases} .$$

Обозначив за  $\beta = \frac{3\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{2\pi \cdot m}$ , можно СДУ (4)–(5) записать как

$$\frac{dW}{dt} = g - \alpha \cdot \frac{\beta}{z^4}, \tag{6}$$

$$\frac{dz}{dt} = W. \tag{7}$$

Для решения задачи Коши систему (6)–(7) дополним начальными условиями. Будем полагать, что тело в начальный момент времени помещается с нулевой скоростью в область между  $Z_{off}$  и  $Z_{on}$ , при этом магнитное поле катушки включено. Имеем:

$$z(0) = 0,5(Z_{on} + Z_{off}),$$

$$W(0) = 0, \quad (8)$$

$$\alpha = 1.$$

Для предложенной математической модели (6)–(8) в среде *Mathcad* создана программа «Движение постоянного магнита», позволяющая проводить компьютерное моделирование движения ПМ в импульсном магнитном поле. В качестве исходных данных необходимо экспериментально определить магнитные моменты ПМ и катушки  $P_{m1}$ ,  $P_{m2}$ , массу магнита  $m$  и координаты  $Z_{\text{off}}$  и  $Z_{\text{on}}$ .

### 3. Экспериментальное определение параметров постоянного магнита и катушки

Для экспериментальных исследований и проведения моделирования был использован цилиндрический постоянный магнит NdFeB с аксиальной намагниченностью, имеющий диаметр  $d = 14$  мм, высоту  $L = 5$  мм, массу  $m = 5,76$  г и объем  $V = \pi d^2 \cdot L / 4 \approx 770$  мм<sup>3</sup>. Созданная экспериментальная установка включала в себя неподвижную катушку высотой 19 мм с внутренним и внешним диаметром обмотки 35 мм и 59 мм соответственно. Используемая катушка без сердечника имела активное сопротивление  $R_a = 155$  Ом и индуктивность  $L = 160$  мГ. Для управления током через катушку использовался цифровой датчик Холла А3141. В качестве источника питания выбран CPS-3205 с возможностью точной регулировки напряжения от 0 до 32 В. Для измерения параметров импульсов тока, подаваемых на катушку в процессе левитации магнита, использовался осциллограф Tektronix DPO 3012.

Для определения параметров используемого постоянного магнита был взят второй такой же магнит, и, подкладывая между деревянным бруском и верхним магнитом листы бумаги, определялось максимальное расстояние  $r_{\text{max}}$ , на котором верхний магнит еще удерживает нижний в поле тяжести земли. Экспериментально для рассмотренного выше ПМ было получено значение  $r_{\text{max}} \approx 44$  мм. Далее определяли величину магнитного момента ПМ, приравняв силу притяжения

двух магнитных диполей  $F_m = \frac{3\mu_0 \cdot P_m^2}{2\pi \cdot r_{\text{max}}^4}$  силе тяжести  $F_T = mg$ . Были получены следующие число-

вые значения: магнитный момент  $P_m = r_{\text{max}}^2 \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot g}{3 \cdot \mu_0}} \approx 0,46$  (А·м<sup>2</sup>); намагничивание  $M = \frac{P_m}{V} \approx 7,58 \cdot 10^5$  (А/м) и остаточная магнитная индукция  $B_r = \mu_0 M \approx 0,953$  (Тл).

При аналогичном характере взаимодействия катушки и рассмотренного выше магнита при постоянном токе через катушку  $I_0 = 0,12$  А (напряжение  $U_0 \approx 19$  В) экспериментально получили расстояние, на котором электромагнитная сила взаимодействия ПМ с полем катушки перестает удерживать силу тяжести. Для полученного значения  $r_{\text{max}} \approx 22$  мм определен магнитный момент катушки

$P_{m2}(I_0) = \frac{2\pi \cdot r_{\text{max}}^4 \cdot mg}{3\mu_0 \cdot P_{m1}} \approx 0,036$  (А·м<sup>2</sup>). Для произвольного тока  $I$  через катушку имеем эмпи-

рическое уравнение  $P_{m2}(I) = P_{m2}(I_0) \cdot I / I_0 \approx 0,3 \cdot I$  (А·м<sup>2</sup>). Можно определить также константу  $\beta$ , например, для тока через катушку  $I_0$  получим  $\beta \approx 2,27 \cdot 10^{-6}$  (м<sup>5</sup>/с<sup>2</sup>).

### 4. Результаты экспериментального и теоретического исследования динамических параметров поведения ПМ при его удержании в импульсном магнитном поле

Для полученных экспериментальных параметров катушки и ПМ на рис. 4, а показано расчетное значение его ускорения под действием электромагнитной силы в зависимости от расстояния до катушки. Видно, что на некотором расстоянии ускорение становится равным ускорению свободного падения  $g$  и, видимо, это критическое расстояние при действии статических сил  $Z_{\text{кр}} \approx 22$  мм, на котором поле перестает удерживать тело. Полученное расчетное значение соответствует экспериментальному значению  $r_{\text{max}}$ .

Экспериментально было получено, что под действием поля только постоянного магнита используемый датчик Холла срабатывает на выключение и включение тока на расстоянии от него  $z_1 \approx 20$  мм и  $z_2 \approx 25$  мм соответственно.

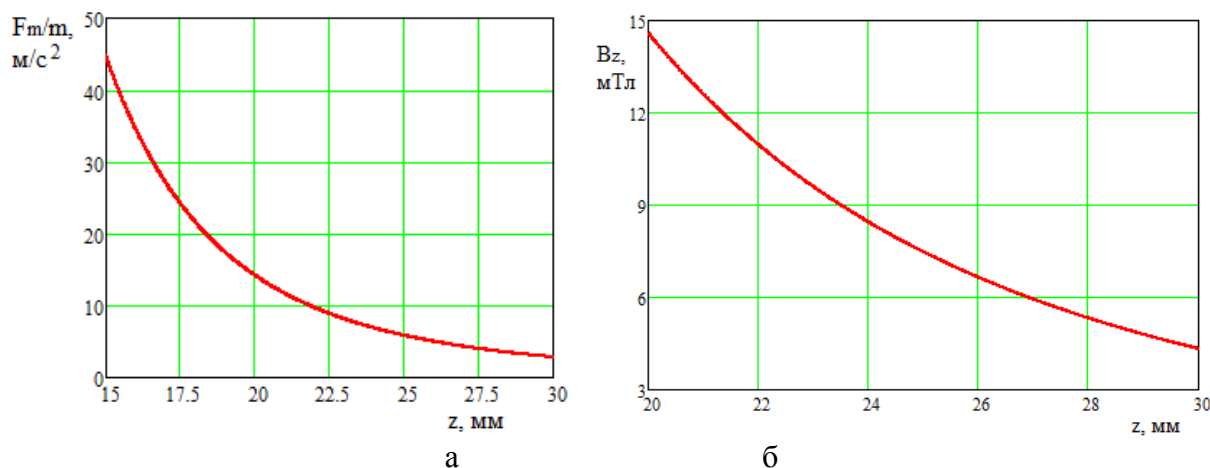


Рис. 4. Расчетное значение ускорения ПМ под действием электромагнитной силы  $F_m$  от расстояния до катушки (ток через катушку  $I = 10$ ) (а) и расчетная осевая составляющая индукции магнитного поля на оси ПМ (б)

Fig. 4. The calculated value of the acceleration of a permanent magnet under the action of the electromagnetic force  $F_m$  from the distance to the coil (current through the coil  $I = 10$ ) (а) and the calculated axial component of the magnetic field induction on the axis of the permanent magnet (б)

При прохождении через катушку тока  $I_0$  и установке датчика на оси катушки на расстоянии  $z_0 = -13$  мм он выключает ток при  $z = X_{\text{off}} \approx 9$  мм. При дальнейшем перемещении магнита вдоль оси  $Oz$  наблюдался автоколебательный режим (включения и выключения тока) с изменяющейся частотой. Постоянный ток через катушку устанавливался на расстоянии большем  $X_{\text{on}} \approx 13$  мм (колебания тока пропадали). С учетом установки датчика в точке  $z_0$  полное выключение и включение тока происходило на расстоянии от магнита до катушки  $X_{\text{off}} - z_0 \approx 22$  мм и  $X_{\text{on}} - z_0 \approx 26$  мм.

Объяснить возникающие колебания тока можно следующим образом: датчик Холла работает в инверсном режиме: при его срабатывании ток через катушку выключается и наоборот. По паспортным данным А3141 он включается при магнитном поле в среднем около 10 мТл и выключается при поле в среднем около 4,5 мТл, гистерезис может составлять от 2 до 8 мТл (в среднем 5,5 мТл) [13]. На рис. 4, б показана осевая составляющая магнитного поля на оси постоянного магнита, рассчитанная по формуле (1). Видно, что на расстояниях, где возможно равновесие ПМ от 22 мм до 26 мм, магнитное поле падает на 4–5 мТл. Поле, включающее датчик, является суммой полей ПМ и катушки. Отключение тока в катушке в точке  $X_{\text{off}}$  приводит к тому, что магнитное поле вблизи датчика падает на поле катушки, что приводит к фактическому уменьшению расстояния  $X_{\text{on}}$ , где ток опять включается. Все это ведет к возникновению автоколебательного режима. В этом режиме и устанавливается динамическое равновесие тела.

На рис. 5 а, б для полученных экспериментальных параметров показан пример расчета движения тела при магнитной левитации с использованием программы «Движение постоянного магнита». Наблюдаемые колебания при удержании постоянного магнита близки к гармоническому сигналу, анализ с использованием дискретного преобразования Фурье показал малую мощность гармонических составляющих (рис. 5 в, г).

Экспериментально было установлено, что чем выше частота пульсаций, тем при удержании тела наблюдается более устойчивое равновесие. Это было подтверждено посредством компьютерного моделирования. Было получено, что чем меньше расстояние между координатами  $\Delta X = X_{\text{on}} - X_{\text{off}}$ , тем выше частота пульсаций и меньше их амплитуда, а значит, положение равновесия более устойчиво. Данный вывод можно получить из сравнения рис. 5 а и 5 б и из расчета частоты пульсаций в зависимости от  $\Delta X$ , показанного на рис. 6.

Частота пульсаций ПМ как характеристика, влияющая на устойчивость динамического равновесия, зависит от множества других параметров, например, она определяется массой постоянного магнита при его удержании. При экспериментальном исследовании для того чтобы у магнита оставался постоянным магнитный момент, его массу изменяли за счет приклеивания к нему снизу кусочков неферромагнитного материала. На рис. 7 приведены расчетное и эксперимен-

## Автоматизированные системы управления...

тальное изменения частоты пульсаций от суммарной массы ПМ. Видно, что с увеличением массы удерживаемого тела частота колебаний падает, а их амплитуда растет, кроме того, есть некая критическая масса, которая уже не удерживается в электромагнитном поле.

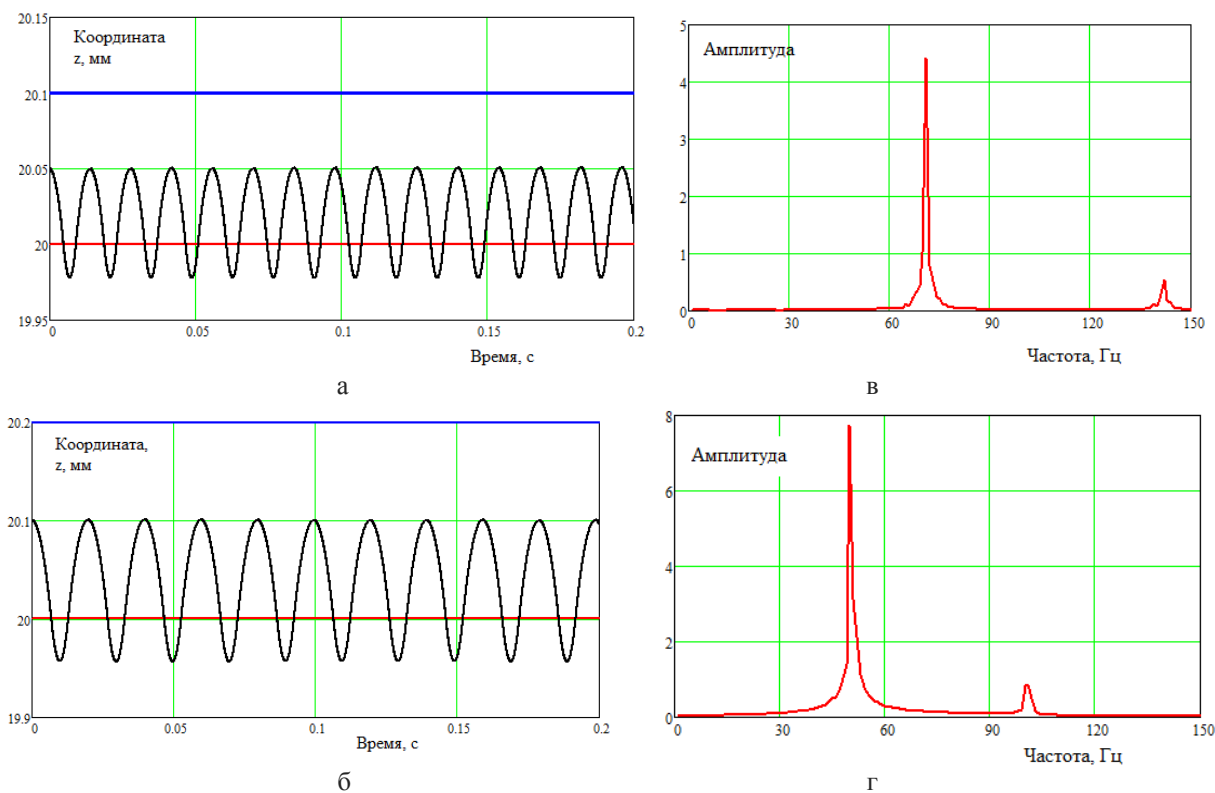


Рис. 5. Расчетные колебания ПМ от времени при его удержании в импульсном магнитном поле (а, б) и дискретное преобразование Фурье этих колебаний (в, г) при: а, в –  $X_{\text{off}} = 20$  мм,  $X_{\text{on}} = 20,1$  мм; б, г –  $X_{\text{off}} = 20$  мм,  $X_{\text{on}} = 20,2$  мм

Fig. 5. The Calculated oscillations of the PM from time to time when it is held in a pulsed magnetic field (a, б) and the discrete Fourier transform of these oscillations (c, d) at: a, c –  $X_{\text{off}} = 20$  mm,  $X_{\text{on}} = 20.1$  mm; b, d –  $X_{\text{off}} = 20$  mm,  $X_{\text{on}} = 20.2$  mm



Рис. 6. Расчетное изменение частоты пульсаций ПМ от координаты включения датчика при  $X_{\text{off}} = 20$  мм,  $m = 5,57$  г

Fig. 6. Calculated change in the pulsation frequency of a permanent magnet from the sensor switching on coordinate at  $X_{\text{off}} = 20$  mm,  $m = 5.57$  g



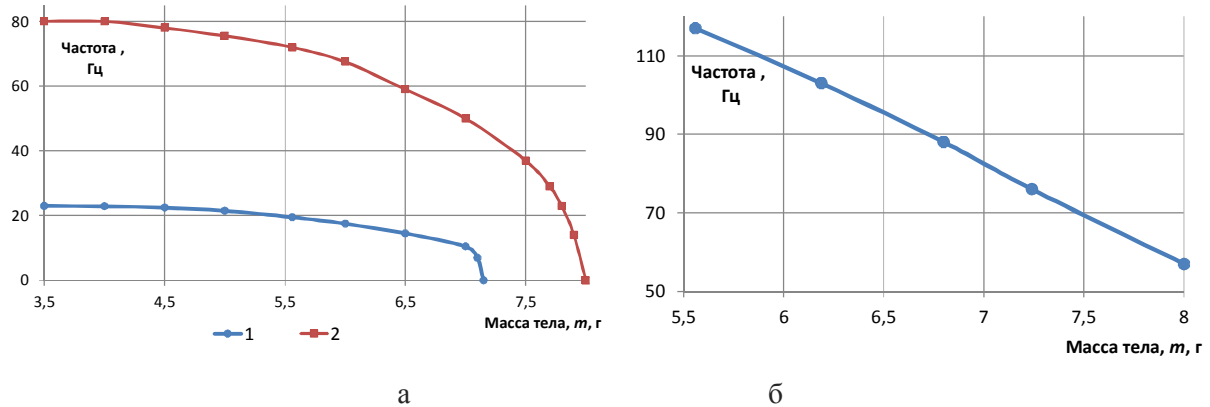


Рис. 7. Расчетное (а) (при: 1 –  $X_{off} = 20$  мм и  $X_{on} = 21,1$  мм; 2 –  $X_{off} = 20$  мм и  $X_{on} = 20,1$  мм) и экспериментальное (б) изменение частоты пульсаций от суммарной массы ПМ  
 Fig. 7. Calculated (a) (for: 1 –  $X_{off} = 20$  mm and  $X_{on} = 21.1$  mm; 2 –  $X_{off} = 20$  mm and  $X_{on} = 20.1$  mm) and experimental (б) change in the pulsation frequency from the total mass of the permanent magnet

Были также экспериментально исследованы параметры электрических пульсаций в зависимости от подаваемого на коммутатор напряжения при удержании ПМ массой  $m$ . Напряжение на катушке всегда имело форму меандра, при этом менялись частота, амплитуда и коэффициент заполнения импульсов. Под последним параметром понимается отношение длительности импульса к периоду.

На рис. 8 показано полученное изменение частоты пульсаций, среднего и амплитуды импульсного тока через катушку от подаваемого на электронный ключ напряжения  $U$ . Видно, что при увеличении напряжения в 1,78 раза существенно растет частота пульсаций примерно в 2,9 раза. Амплитуда импульсов тока растет нелинейно примерно в 1,3 раза, что связано с наличием в катушке индуктивного сопротивления. При этом средний ток падает примерно на 30 % и связано это со снижением коэффициента заполнения импульсов, показанным на рис. 9. Хотя ширина импульса уменьшается, потребляемая катушкой мощность увеличивается примерно на 25 %.

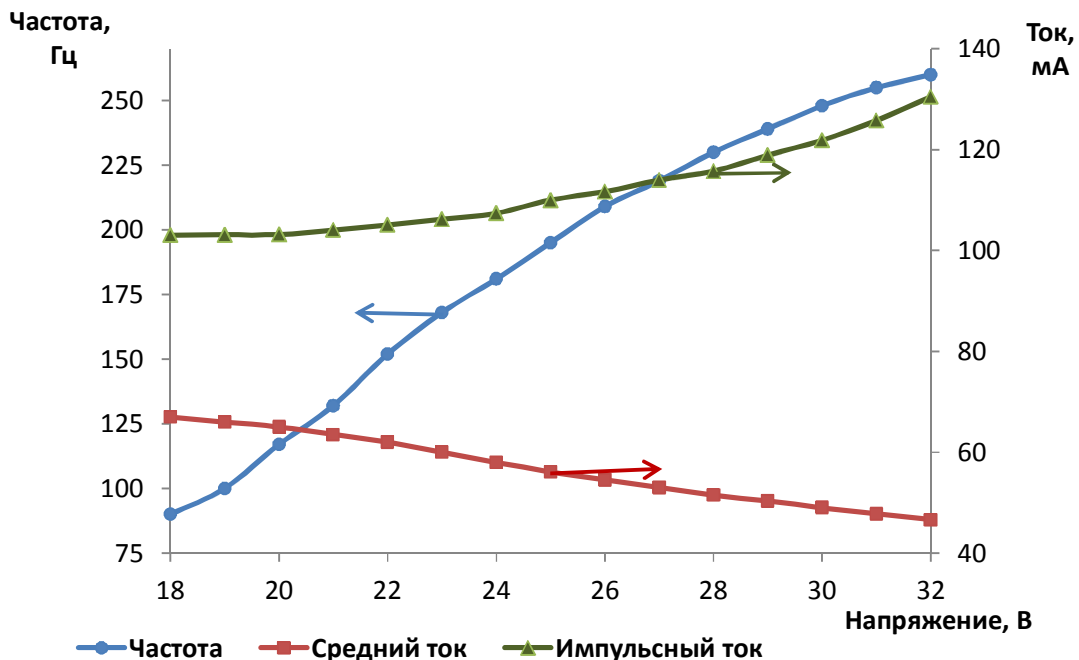
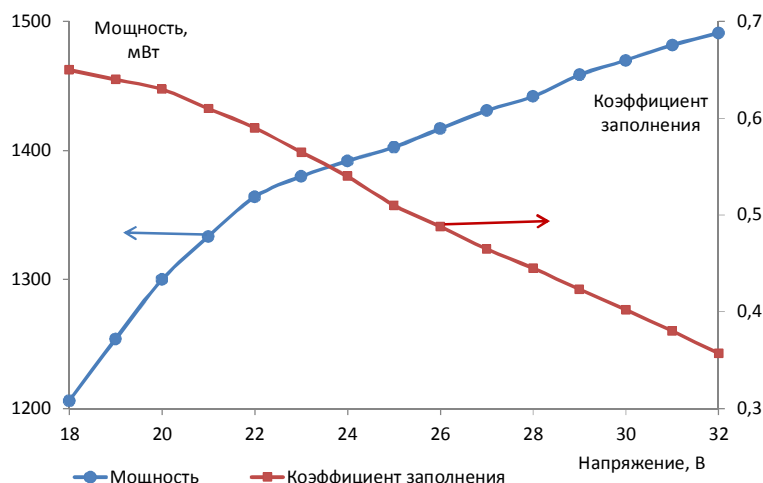


Рис. 8. Экспериментально полученное изменение частоты пульсаций, среднего и амплитуды импульсного тока через катушку от подаваемого напряжения  
 Fig. 8. Experimentally obtained change in the ripple frequency, average and amplitude of the pulse current through the coil from the applied voltage



**Рис. 9. Изменение потребляемой мощности и коэффициента заполнения импульсов тока, проходящих через катушку, от подаваемого напряжения**  
**Fig. 9. Change in power consumption and duty cycle of current pulses passing through the coil from the applied voltage**

### Выводы

1. Предложена упрощенная расчетно-экспериментальная методика по определению магнитных моментов для постоянного цилиндрического магнита и катушки с током, а также значения координаты положения тела во взвешенном состоянии.
2. Создана математическая модель движения постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле, включающая в себя параметр коммутации тока, проходящего через катушку.
3. Экспериментально и посредством компьютерного моделирования было установлено, что чем выше частота пульсаций, тем при удержании тела наблюдается его меньшая амплитуда пульсаций и устанавливается более устойчивое равновесие.
4. Частота пульсаций при прочих равных условиях уменьшается с увеличением массы постоянного магнита, причем есть критическая масса, которая уже не удерживается в электромагнитном поле.
5. При увеличении напряжения, подаваемого на коммутатор катушки, увеличивается частота пульсаций тела и потребляемая электрическая мощность, при этом коэффициент заполнения импульсов тока снижается.
6. Результаты моделирования и созданное программное обеспечение можно использовать для упрощенной инженерной методики, позволяющей прогнозировать положение цилиндрического магнита, определять его относительную устойчивость при изменении параметров в импульсном магнитном поле и параметры движения во взвешенном состоянии.

### Литература

1. Ячиков, И.М. Исследование поведения напряженности магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в коническом индукторе с противовитком / И.М. Ячиков, Т.П. Ларина, О.Н. Вострокнутова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2018. – № 1(38). – С. 55–62.
2. Уразаев, В. Техническая левитация: обзор методов / В. Уразаев // *Технологии в электронной промышленности*. – 2007. – № 6. – С. 10–17.
3. IT-лента. Магнитная левитация. – <http://itlenta.ru/chto-takoe-magnitnaya-levitatsiya> (дата обращения 12.10.2019).
4. Левитрон на датчике Холла. – [http://samodelkilab.ucoz.ru/news/levitron\\_92\\_sobrat\\_svoimi\\_rukami/2014-01-19-321](http://samodelkilab.ucoz.ru/news/levitron_92_sobrat_svoimi_rukami/2014-01-19-321) (Дата обращения 20.09.2019).
5. Al-Muthairi, N.F. Sliding mode control of a magnetic levitation system / N.F. Al-Muthairi, and M. Zribi // *Mathematical Problems in Engineering* 2004. – 2004. – Vol. 2. – P. 93–107.
6. Edward, P.F. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices. Material, Analysis, and Applications* / P.F. Edward. – San Diego: Academic Press, 2001. – 518 p.

7. Коген-Далин, В.В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами / В.В. Коген-Далин, Е.В. Комаров. – М.: Энергия, 1977. – 248 с.
8. Активные магнитные подшипники. – <http://amblab.narod.ru/Book/Chapter1.htm> (дата обращения 02.10.2018).
9. Магнитный подшипник. – <http://myfta.ru/articles/magnitnyepodshipniki> (дата обращения: 03.10.2019)
10. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. II. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 8-е изд., стереот. – М.: Физматлит, 2001. – 536 с.
11. Арнольд, Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами / Р.Р. Арнольд. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
12. Слободянюк, А.И. Физика 10 /13.6. Взаимодействие магнетиков с постоянным магнитным полем / А.И. Слободянюк. – <http://physbook.ru/index.php> (дата обращения 04.06.2020).
13. Платт, Ч. Электроника: логические микросхемы, усилители и датчики для начинающих / Ч. Платт // СПб.: ВХВ-Петербург, 2015. – 448 с.

**Ячиков Игорь Михайлович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; [jachikov@mail.ru](mailto:jachikov@mail.ru).

**Ширяев Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [shiriaevvi@susu.ru](mailto:shiriaevvi@susu.ru).

Поступила в редакцию 4 июня 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200312

## DETERMINATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF A PERMANENT MAGNET WHILE I HOLD IN A PULSE MAGNETIC FIELD

**I.M. Yachikov**<sup>1</sup>, [jachikov@mail.ru](mailto:jachikov@mail.ru),

**V.I. Shiryayev**<sup>2</sup>, [shiriaevvi@susu.ru](mailto:shiriaevvi@susu.ru)

<sup>1</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

<sup>2</sup>South Ural state University, Chelyabinsk, Russian Federation

**Introduction.** There are various practical ways to implement magnetic levitation as a method of holding or lifting an object using a magnetic field alone. The following principle of creating the balance of the body is considered in the work. A small cylindrical neodymium magnet is held during electromagnetic interaction with a pulsating current flowing through the coil. For a soaring effect to occur when the magnet approaches the coil, the current through it is switched off by an electronic key that is activated by a digital Hall sensor located on the axis of the coil. Of practical interest is the development of simple recommendations to predict the fact of body retention with a given coil design, current through it, dimensions and properties of a permanent magnet. There are few engineering techniques to determine the position of the body, its stability and the nature of movement in suspension.

**The aim of the study** is a theoretical and experimental study of the dynamic parameters of a permanent magnet when it is held in a pulsed magnetic field and the creation of a simplified computational-experimental technique for determining the characteristics of the body in suspension.

**Materials and methods.** When performing the work, methods of mathematical and computer modeling were used, as well as experimental studies. The created software using the development tools of the Mathcad package was based on well-known methods: numerical integration of a system of differential equations.

**Results.** A simplified computational and experimental technique is proposed for determining magnetic moments for a permanent cylindrical magnet and coil with current, as well as an approximate

value of the coordinate of the position of the body in suspension. A mathematical model of the one-dimensional motion of a magnet under the influence of gravity and electromagnetic forces of interaction with a pulsed magnetic field at a known distance at which the current is turned off is developed.

**Conclusion.** It was established experimentally and through computer simulation that the higher the frequency of the pulsations, the more rigid the pulsation amplitude is observed when the body is held and a more stable equilibrium is established. The ripple frequency decreases with increasing mass of the permanent magnet, and there is a critical mass that is no longer held in the electromagnetic field. As the voltage supplied to the coil switch increases, the frequency of the pulsations of the body and the consumed electric power increase, while the duty cycle of the current pulses decreases.

*Keywords:* permanent magnet, pulsed magnetic field, Hall sensor, residual magnetic induction, electromagnetic force, magnetic levitation, vibration frequency.

### References

1. Jachikov I.M., Larina T.P., Vostroknutova O.N. *Issledovanie povedenija naprjazhennosti magnitnogo polja i polozhenija tela vo vzveshennom sostojanii v konicheskom induktore s protivovotkom* [Investigation of the behavior of magnetic field strength and suspended position of a body in a conical inductor with a countercurrent]. *Jeletrotehniczeskie sistemy i komplekсы*. 2018. № 1(38). P. 55–62.
2. Urazaev V. *Tehnicheskaja levitacija: obzor metodov* [Technical levitation: a review of methods] *Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti*, 2007. № 6. P. 10–17.
3. *IT-lenta. Magnitnaja levitacija* [Magnetic levitation]. – <http://itlenta.ru/chto-takoe-magnitnaya-levitatsiya> (Data obrashhenija 12.10.2019).
4. *Levitron na datchike Holla* [Levitron on the Hall sensor]. – [http://samodelki-lab.ucoz.ru/news/levitron\\_92\\_sobrat\\_svoimi\\_rukami/2014-01-19-321](http://samodelki-lab.ucoz.ru/news/levitron_92_sobrat_svoimi_rukami/2014-01-19-321) (Data obrashhenija 20.09.2019).
5. Al-Muthairi N.F., Zribi M. Sliding mode control of a magnetic levitation system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2004, vol. 2, 2004, pp. 93–107.
6. Edward P.F. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices. Material, Analysis, and Applications*. San Diego: *Academic Press*, 2001. – 518 p.
7. Kogen-Dalin V.V., Komarov E.V. *Raschet i ispytanie sistem s postojannymi magnitami* [Calculation and testing of permanent magnet systems]. M. Jenergija, 1977. – 248 p.
8. *Aktivnye magnitnye podshipniki* [Active magnetic bearings] [Jeletkronnyj resurs]. – URL: <http://amblab.narod.ru/Book/Chapter1.htm> (Data obrashhenija 02.10.2018)
9. *Magnitnyj podshipnik* [Magnetic bearing] [Jeletkronnyj resurs]. – URL: <http://myfta.ru/articles/magnitnyepodshipniki> (Data obrashhenija: 03.10.2019)
10. Landau L.D., Lifshic E.M. *Teoreticheskaja fizika* [Theoretical physics]: *ucheb. posob. dlja vuzov*. V 10 t. T. II. *Teorija polja*. – 8-e izd., stereot. – M.: FIZMATLIT, 2001. – 536 p.
11. Arnol'd R.R. *Raschet i proektirovanie magnitnyh sistem s postojannymi magnitami* [Calculation and design of permanent magnet magnets] M. Jenergija, 1969. – 184 p.
12. Slobodjanjuk A.I. *Fizika 10 /13.6. Vzaimodejstvie magnetikov s postojannym magnitnym polem*. [Physics 10 / 13.6. The interaction of magnets with a constant magnetic field] [Jeletkronnyj resurs]. – URL <http://physbook.ru/index.php> (Data obrashhenija 04.06.2020).
13. Platt Ch. *Jeletronika: logicheskie mikroshemy, usiliteli i datchiki dlja nachinajushhih* [Electronics: logic, amplifiers and sensors for beginners]. SPb.: VHV-Peterburg, 2015. – 448 p.

Received 4 June 2020

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ячиков, И.М. Определение динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле / И.М. Ячиков, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 111–122. DOI: 10.14529/ctcr200312

### FOR CITATION

Yachikov I.M. Shiryayev V.I. Determination of Dynamic Parameters of a Permanent Magnet while I Hold in a Pulse Magnetic Field. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 111–122. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200312