



УДК 621.3.014.33:389

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ЯКОРЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОЙ КАТАПУЛЬТЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ГРАВИМЕТРА

В.Ф. Болюх, доктор технических наук, профессор Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ")

С.В. Олексенко, аспирант НТУ "ХПИ", г. Харьков

А.И. Винниченко, ведущий инженер ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



В.Ф. Болюх



С.В. Олексенко



А.И. Винниченко

Обоснована конструкція баллістического лазерного гравиметра з індукційно-динамічною катапульті, в якій електропровідний якорь здійснює вертикальне підбрасування пробного тіла. Розроблена математическа модель індукційно-динамічною катапульті, яка дозволяє урахувати початкове неосеве розташування якоря відносно обмотки індуктора і переміщення пробного тіла в баллістическому лазерному гравиметрі.

A design of a ballistic laser gravimeter with induction-dynamic catapult with an electrically conducting armature performing a vertical movement of a test object is substantiated. A mathematical model of the inductive-dynamic catapult which allows to take into account the initial off-axis position of the armature with respect to the winding of inductor and moving of the test body in the ballistic laser gravimeter is developed.

Введение

Для высокоточных измерений абсолютного значения ускорения свободного падения применяются баллистические лазерные гравиметры (БЛГ), в которых осуществляется подбрасывание пробного тела (ПТ), представляющего собой оптический уголкового отражателя в специальном корпусе и являющегося составной частью измерительной системы лазерного интерферометра Майкельсона [1–3]. В мировой практике используются

два типа гравиметров со свободным движением ПТ в гравитационном поле, которые реализуют симметричный и несимметричный методы измерения ускорения свободного падения. Гравиметры с симметричной схемой измерения имеют ряд достоинств. Поскольку сила сопротивления газовой среды воздействует на результат измерения с противоположными знаками при взлете и падении ПТ, то происходит их взаимная компенсация. Основным недостатком симметричных гравиметров – механическое воздействие, которое возникает при броске ПТ катапульты. Сравнительно короткий толчок катапульты порождает колебания фундамента, называемые автосейсмическими, и всех механических элементов гравиметра, что обуславливает соответствующую составляющую погрешности измерения ускорения свободного падения [4]. Один из возможных путей уменьшения автосейсмической составляющей погрешности измерения ускорения свободного падения при помощи БЛГ состоит в уменьшении массы ПТ и подвижных элементов. Для этого в БЛГ предложено использовать индукционно-динамическую катапульту (ИДК), обеспечивающую вертикальное подбрасывание якоря с ПТ относительно индуктора, возбуждаемого от емкостного накопителя энергии [5]. При этом осуществляется прямое электромеханическое преобразование энергии при свободном перемещении якоря и устраняется целый ряд систематических погрешностей.

Индукционно-динамические преобразователи обеспечивают прямое преобразование электрической энергии импульсного, как правило, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в линейное перемещение электропроводящего якоря [6]. Такие преобразователи широко используются в различных областях науки и техники [7–9]. В известных электромеханических преобразователях для центрированного аксиального перемещения якоря применяются специальные направляющие элементы. Однако для БЛГ необходима катапульта, в которой не должно быть взаимодействия между якорем и направляющими элементами, поскольку при этом нарушается динамика свободного полета ПТ и снижается точность гравиметра.

Исходя из этого, возникает вопрос оценки влияния несоосности начальной установки якоря относительно обмотки индуктора ИДК на характер свободного полета якоря с ПТ.

Конструктивная схема БЛГ с ИДК

Рассмотрим БЛГ с ИДК (рис. 1), в которой при соосности обмотки индуктора и якоря осуществляется свободный вертикальный полет ПТ. БЛГ содержит пробное тело 1 с оптическим уголковым отражателем 2, вакуумную камеру 3, на верхней стенке которой установлен оптический излучатель 4 [10, 11]. На днище 5 вакуумной камеры 3 на демпферах 6 установлена массивная силовая плита 7, на которой зафиксированы

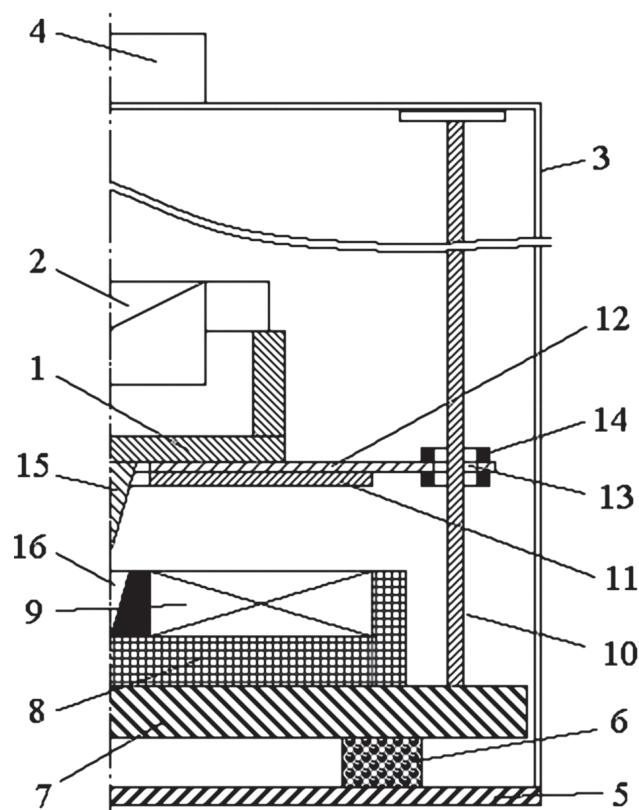


Рис. 1. Схема БЛГ с ИДК

ферромагнитный сердечник (ФС) 8 с обмоткой индуктора 9, направляющие вертикальные стойки 10. В вакуумной камере 3 расположен якорь 11, который соединен с силовым толкающим диском 12. В силовом толкающем диске 14 выполнены отверстия 13, коаксиально соединенные с подшипниками 14, которые охватывают вертикальные стойки 10. Подшипники 14 обеспечивают свободное перемещение вдоль направляющих стоек, осуществляя взаимодействие только при значительном отклонении якоря с ПТ от вертикальной оси. К днищу пробного тела 1 присоединен направляющий конус 15, форма боковых стенок которого совпадает с формой направляющей конусообразной выемки 16 сердечника 8. ФС выполнен из магнетодиэлектрика, что устраняет вихревые токи и обеспечивает экранирование магнитных полей рассеяния при сохранении магнитных характеристик.

При разряде ЕНЭ на обмотку индуктора 9 возникает первый импульс тока, под действием которого магнитное поле наводит в электропроводящем якорю 11 ток. Под действием аксиальных электродинамических сил (ЭДУ) f_z отталкивания якорь 11 вместе с силовым диском 12 и ПТ 1 совершают свободное вертикальное перемещение ΔZ . При этом включается оптический излучатель 4, воздействующий на оптический уголкового отражатель 2, и осуществляется измерение g . При падении якоря 11 вниз в момент приближения его к обмотке индуктора 9 возбуждают повторный импульс тока. Поскольку остаточное напряжение ЕНЭ меньше начального, то возникающие ЭДУ f_z отталкивания достаточны для плавного торможения якоря с ПТ.

Однако в данной ИДК возможны начальные отклонения якоря, такие как осевое смещение или поворот на некоторый угол относительно оси обмотки индуктора, что повлияет на характер перемещения якоря с ПТ, а значит и на точность измерения ускорения свободного падения. В результате перемещение якоря с ПТ будет происходить с отклонением от вертикальной оси, что может привести к механическому контакту подшипников с вертикальными стойками. В результате этого точность БЛГ снизится за счет появления тормозной силы трения.

Целью статьи является оценка влияния начальных отклонений якоря относительно обмотки индуктора на характеристики перемещения якоря с ПТ.

Математическая модель ИДК

Разработана компьютерная модель ИДК в программном пакете *COMSOL Multiphysics 4.4*, в основу которого заложен метод конечных элементов [12].

Электромагнитный процесс описывается системой дифференциальных уравнений для каждого узла в системе координат (rz) в зависимости от комплексного векторного магнитного потенциала $\bar{A} = (A_r, A_{\text{phi}}, A_z)$:

для немагнитных материалов

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \cdot (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \bar{B}) - \sigma \cdot \bar{v} \cdot \bar{B} = \bar{J}_e; \quad (1)$$

$$\bar{B} = \nabla \cdot \bar{A}; \quad (2)$$

для ферромагнитного сердечника

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \cdot \bar{H} - \sigma \cdot \bar{v} \cdot \bar{B} = \bar{J}_e; \quad (3)$$

$$\bar{H} = f(\bar{B}), \quad (4)$$

где σ – электрическая проводимость; μ_0, μ_r – абсолютная и относительная магнитная проницаемость материала; \bar{v} – скорость узла; \bar{J}_e – плотность тока в узле.

Ток в обмотке индуктора ИДК I описывается уравнением

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \cdot (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \bar{B}) - \sigma \cdot \bar{v} \cdot \bar{B} = \frac{I \cdot N}{S}, \quad (5)$$

где N – число витков обмотки индуктора; S – сечение витка обмотки индуктора.

Силы, действующие на ускоряемый якорь, определяются при помощи тензора натяжения Максвелла T :

$$\bar{f} = 2 \cdot \pi \cdot r \int_{\Omega} \bar{n} \cdot T dS; \quad (6)$$

$$\bar{\tau} = 2 \cdot \pi \cdot r \int_{\Omega} (\bar{r} - r_0) \cdot (\bar{n} \cdot T) dS, \quad (7)$$

где $\bar{f}, \bar{\tau}$ – нормальное и радиальное значение электродинамической силы; \bar{n} – вектор внешней нормали к поверхности интегрирования dS .

Система уравнений (1)–(7) содержит начальные условия

$$\bar{A}_{t=0}(\bar{A}_r, \bar{A}_{\text{phi}}, \bar{A}_z) = \bar{A}(0, 0, 0) \quad (8)$$

и граничные условия

$$\bar{n} \cdot \bar{A} = 0. \quad (9)$$

Решение полученной системы уравнений (1)–(9) производится методом BDF (backward differentiation formula) с фиксированным шагом по времени и использованием решателя PARDISO.

Результаты расчета ИДК

Рассмотрим ИДК, параметры которой представлены в таблице.

Параметры ИДК

Показатель	Обозначение	Значение
Внешний диаметр обмотки индуктора	D_{ex1} , мм	100
Внутренний диаметр обмотки индуктора	D_{in1} , мм	10
Высота обмотки индуктора	H_1 , мм	10
Внешний диаметр якоря	D_{ex2} , мм	100
Внутренний диаметр якоря	D_{in2} , мм	10
Высота якоря	H_2 , мм	3
Начальное аксиальное расстояние между обмоткой индуктора и якорем	δ , мм	1
Количество витков обмотки индуктора	N_1 , шт.	46
Количество витков якоря	N_1 , шт.	1
Сечение шины обмотки индуктора	мм ²	8,64
Толщина изоляционной прокладки	ξ , мм	1
Масса ПТ	m_e , кг	0,204
Высота дискового основания ФС	H_{3a} , мм	8
Высота обечайки ФС	H_{3b} , мм	24
Внешний диаметр обечайки ФС	D_{ex3} , мм	118
Емкость ЕНЭ	C , мкФ	2850
Зарядное напряжение ЕНЭ	U_0 , В	400

Высота подбрасывания якоря с ПТ составляет 200 мм.

Электромеханические характеристики базового варианта ИДК, в котором отсутствуют боковые смещения и наклоны якоря относительно обмотки индуктора, представлены в работе [5]. На рис. 2 показано распределение магнитных полей в ИДК в момент максимума ЭДУ.

Как следует из представленных результатов, магнитные поля практически полностью экранированы внутри ИДК. Указанное экранирование осуществляется ФС и электропроводящим якорем.

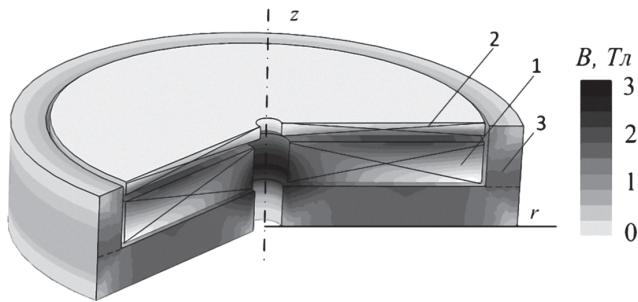


Рис. 2. Распределение магнитных полей в момент максимума воздействия ЭДУ базового варианта ИДК: 1 – обмотка индуктора; 2 – якорь; 3 – ФС

Исследуем влияние угла наклона α и бокового смещения Δx якоря относительно обмотки индуктора на показатели ИДК (рис. 3, ФС не показан).

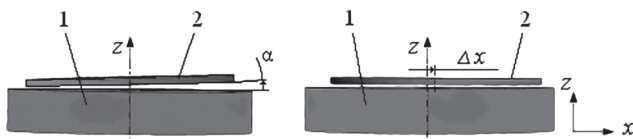


Рис. 3. Схема расположения обмотки индуктора 1 и якоря 2

На рис. 4 представлено распределение плотности тока j_2 и удельных ЭДУ f_z' в якоря при наличии угла отклонения $\alpha=2^\circ$ и бокового смещения $\Delta x=3$ мм якоря относительно обмотки индуктора в момент максимума ЭДУ. Наименьшая плотность тока индуцируется в области центральной оси якоря, а наибольшая – в его средней части.

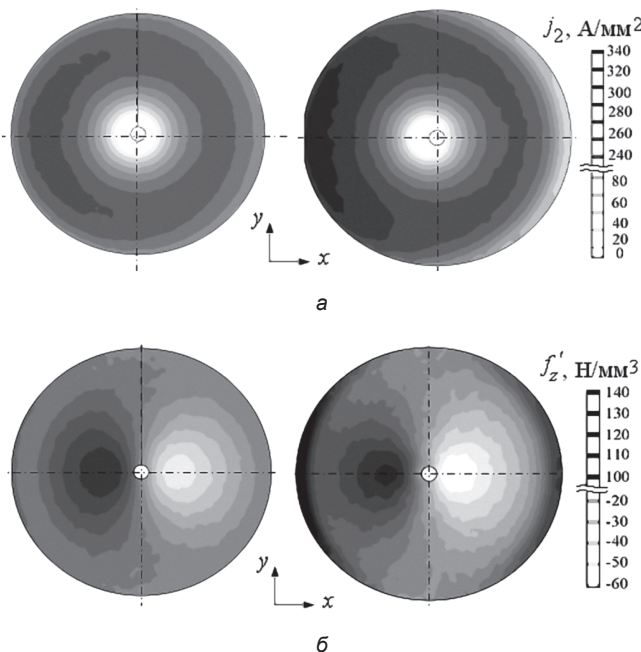


Рис. 4. Распределение плотности тока (а) и удельных ЭДУ (б) в якоря при наличии угла отклонения $\alpha=2^\circ$ (слева) и бокового смещения $\Delta x=3$ мм (справа) якоря относительно обмотки индуктора

При наклоне якоря относительно обмотки индуктора на угол α наибольшая плотность тока

в якоря возникает в прилегающей к обмотке части, в то время как в удаленной части плотность тока снижается.

При боковом смещении якоря относительно обмотки индуктора на величину Δx происходит смещение индуцированных токов в якоря в противоположном направлении: область максимальной плотности тока в якоря смещается к наружной поверхности, в ту же сторону смещается центральная область низкого тока. При этом область низкого тока на наружной поверхности в направлении смещения уменьшается и расширяется.

В результате наклона на угол α и смещения на расстояние Δx относительно обмотки индуктора в якоря происходит существенное перераспределение ЭДУ. При наклоне якоря в прилегающей к обмотке части якоря формируется область с повышенными силовыми нагрузками, а в области, удаленной от обмотки, формируется область с пониженными силовыми нагрузками. Указанные области расположены в средней части якоря, ближе к центру.

При боковом смещении якоря относительно обмотки индуктора указанные области с повышенной и пониженной силовой нагрузкой практически такие же. Однако в этом случае в области наружных поверхностей вдоль направления смещения формируется область повышенной силовой загрузки. В результате таких отклонений якоря относительно обмотки индуктора, помимо аксиальных составляющих скорости V_z и ЭДУ f_z , возникают и боковые составляющие скорости V_x и ЭДУ f_x . Кроме того, в верхней точке подбрасывания якоря отклоняется от вертикальной оси на расстояние Δx .

На рис. 5 представлены относительные составляющие скорости и ЭДУ в зависимости от начального бокового смещения якоря относительно обмотки индуктора Δx_0 . Все указанные значения представлены в безразмерном виде и обозначены звездочкой. Составляющие скорости и ЭДУ нормированы соответствующими величинами базового варианта ИДК при отсутствии наклона и смещения якоря относительно обмотки индуктора, а величины смещений Δx_0 и Δx нормированы внешним диаметром якоря $D_{\text{сх2}}$.

При увеличении бокового смещения аксиальные составляющие ЭДУ и скорости несколько уменьшаются. Так, при относительном начальном смещении якоря $\Delta x_0^*=0,03$ его относительная скорость составляет $V_z^*=0,973$, а относительные ЭДУ – $f_z^*=0,992$, что не представляет существенной проблемы. Однако при этом появляются боковые составляющие скорости и ЭДУ. Так, при относительном начальном смещении якоря $\Delta x_0^*=0,03$ относительная скорость составляет $V_x^*=0,095$, а относительные ЭДУ – $f_x^*=0,004$. В результате этого в верхней точке подбрасывания якоря с ПТ смещается на относительное расстояние $\Delta x^*=0,16$ от центральной оси.

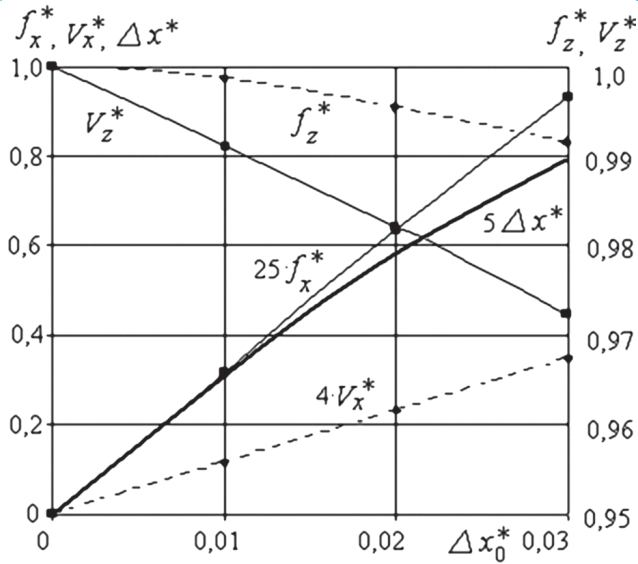


Рис. 5. Зависимость относительных значений составляющих скоростей, ЭДУ и смещения в верхней точке подбрасывания ПТ от относительного начального бокового смещения якоря

На рис. 6 представлены относительные составляющие скорости и ЭДУ в зависимости от наклона якоря относительно обмотки индуктора на угол α . При увеличении угла наклона якоря аксиальные составляющие ЭДУ и скорости также несколько уменьшаются. Так, при угле наклона $\alpha=2^\circ$ его относительная скорость составляет $V_z^*=0,97$, а относительные ЭДУ – $f_z^*=0,86$. При этом также возникают боковые составляющие скорости и ЭДУ. При угле наклона якоря $\alpha=2^\circ$ относительная скорость составляет $V_x^*=0,06$, а относительные ЭДУ – $f_x^*=0,026$. В результате этого в верхней точке подбрасывания якорь с ПТ смещается на относительное расстояние $\Delta x^* = 0,12$ относительно центральной оси. Таким образом, наклон якоря относительно обмотки индуктора на угол $\alpha=2^\circ$ менее опасен, чем начальное смещение якоря на относительную величину $\Delta x_0^*=0,03$.

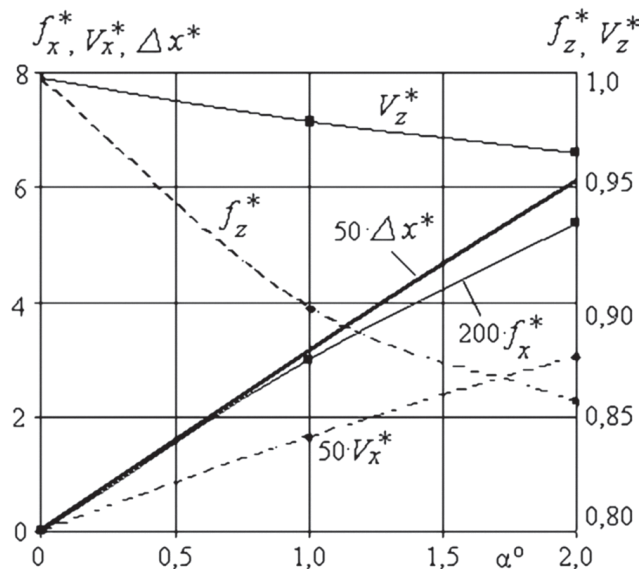


Рис. 6. Зависимость относительных значений составляющих скоростей, ЭДУ и смещения в верхней точке подбрасывания ПТ от угла наклона якоря

На практике возможен вариант, при котором якорь имеет как начальное боковое смещение Δx_0 , так и угол наклона α . Рассмотрим один из таких вариантов. На рис. 7 представлены относительные значения составляющих скоростей, ЭДУ и смещения в верхней точке подбрасывания ПТ от относительного начального бокового смещения якоря при угле наклона $\alpha=1^\circ$.

Аксиальная скорость V_z будет наибольшей при относительном начальном смещении якоря $\Delta x_0^*=-0,1$. При уменьшении бокового смещения от $\Delta x_0^*=-0,1$ до величины $\Delta x_0^*=0,1$ эта скорость снижается на 3,5 %. При этом аксиальные ЭДУ будут максимальными при отсутствии бокового смещения. Боковые составляющие скорости V_x , силы f_x и смещения этого в верхней точке подбрасывания якоря с ПТ Δx^* при увеличении относительного начального смещения якоря Δx_0^* от $-0,1$ до $+0,1$ возрастают.

Таким образом, получены зависимости составляющих скоростей, электродинамических усилий и смещений от вертикальной оси в верхней точке подбрасывания ПТ в зависимости от начального бокового смещения и угла наклона якоря относительно обмотки индуктора.

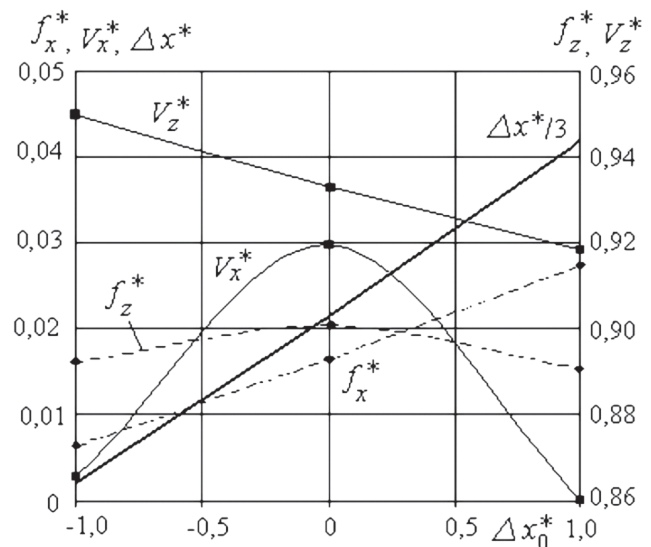


Рис. 7. Зависимость относительных значений составляющих скоростей, ЭДУ и смещения в верхней точке подбрасывания ПТ от относительного начального бокового смещения якоря при угле наклона $\alpha=1^\circ$

Выводы

Обоснована конструкция БЛГ с ИДК, в которой осуществляются прямое электромеханическое преобразование энергии и вертикальное подбрасывание ПТ электропроводящим якорем без взаимодействия с направляющими элементами.

Разработана компьютерная 3D модель ИДК в программном пакете *COMSOL Multiphysics 4.4*, в основу которого заложен метод конечных элементов. Математическая модель учитывает

начальное неосевое расположение и перемещение якоря относительно обмотки индуктора в БЛГ.

Установлен характер распределения индуцированного тока и удельных электродинамических сил в электропроводящем якоре в зависимости от величины начального бокового смещения и угла наклона якоря относительно обмотки индуктора.

Показано уменьшение осевых и увеличение боковых составляющих скоростей, электродинамических усилий и смещение якоря от вертикальной оси в верхней точке подбрасывания ПТ в зависимости от величины начального бокового смещения и угла наклона якоря относительно обмотки индуктора.

Список литературы

1. Лазерные интерферометры перемещений с субнанометровым разрешением в абсолютных баллистических гравиметрах / Л.Ф. Витушкин, О.А. Орлов, А. Джермак, Д. Д'агостино // Измерительная техника. — 2012. — № 3. — С. 3–8.
2. *D'Agostino G.* Absolute Measurements of the Free-Fall Acceleration g in Sèvres (ICAG09) / G. D'Agostino, A. Germak, C. Origlia // Technical report I.N.R.I.M. — 2009. — RT N. 31/2009 (November) — 36 p.
3. Final report on the Seventh International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG-2005) / Z. Jiang, O. Francis, L. Vitushkin [et al.] // Metrologia. — 2011. — № 48. — P. 246–260.
4. *Болюх В.Ф.* Влияние автосейсмических колебаний фундамента на показания баллистического гравиметра с индукционно-динамической катапульты / В.Ф. Болюх, А.В. Омельченко, А.И. Винниченко // Измерительная техника. — 2015. — № 2. — С. 19–23. (*Bolyukh V.F.* Effect of self-seismic oscillations of the foundation on the readout of a ballistic gravimeter with an induction-dynamic catapult / V.F. Bolyukh, A.V. Omel'chenko, A.I. Vinnichenko // Measurement Techniques. — 2015. — Vol. 58, № 2. — P. 137–142).
5. *Болюх В.Ф.* Концепция индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра / В.Ф. Болюх, А.И. Винниченко // Измерительная техника. — 2013. — № 10. — С. 6–10. (*Bolyukh V.F.* Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter / V.F. Bolyukh, A.I. Vinnichenko // Measurement Techniques. — 2014. — Vol. 56, № 1. — Issue 10. — P. 1098–1104).
6. *Болюх В.Ф.* Линейные индукционно-динамические преобразователи / В.Ф. Болюх, И.С. Щукин. — Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. — 496 с.
7. *Татмышевский К.В.* Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности / К.В. Татмышевский, С.Н. Марычев, С.А. Козлов // Современные технологии безопасности. — 2005. — № 4. — С. 8–11.
8. High-efficiency impact electromechanical converter / V.F. Bolyukh, V.F. Luchuk, M.A. Rassokha, I.S. Shchukin // Russian electrical engineering. — 2011. — Vol. 82, № 2. — P. 104–110.
9. *Bissal A.* Comparison of two ultra-fast actuator concept / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // IEEE Trans. Magnetics. — 2012. — Vol. 48, № 11. — P. 3315–3318.
10. Пат. 96904 Україна, МПК G01V7/14. Балістичний гравіметр з індукційно-динамічним приводом для симетричного способу вимірювань прискорення вільного падіння / В.Ф. Болюх, О.І. Вінніченко. — Заявка № 201103304; заявл. 21.03.2011; надрук. 12.12.2011, Бюл. № 20.
11. Пат. 2491581 Российская Федерация, МПК G01V7/14. Баллистический гравиметр с индукционно-динамическим приводом для симметричного способа измерений ускорения свободного падения / В.Ф. Болюх, А.И. Винниченко. — Заявка № 2011128560/28; заявл. 08.07.2011; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24.
12. *Bolyukh V.F.* The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter / V.F. Bolyukh, S.V. Oleksenko, I.I. Katkov // Refrigeration Science and Technology: 13th International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics, CRYOGENICS 2014. — Prague, Czech Republic; April 7–11, 2014. — P. 268–275.