

УДК 621.3.014.33:389

Болюх В.Ф., Винниченко А.И.

КОНЦЕПЦИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ГРАВИМЕТРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Введение. Одной из задач, возникающих при модернизации баллистического лазерного гравиметра (БЛГ) с симметричной схемой измерения ускорения свободного падения g (вертикальное подбрасывание и свободное падение пробного тела (ПТ) с оптическим отражателем) является повышение его эффективности [1–3]. Особенно актуальна указанная задача для БЛГ ДЕГУ 02-02-96, являющегося государственным первичным эталоном ускорения свободного падения g [4, 5].

Трудность задачи заключается в том, что БЛГ с одной стороны является оптико-электромеханическим, а с другой стороны – вакуумным прибором. При этом оптические и механические детали БЛГ работают в вакууме в течение продолжительного времени при изменяемых условиях окружающей среды. Погрешности современных баллистических лазерных гравиметров можно разделить на две основные составляющие: случайную, которая обусловлена влиянием некомпенсированной части вибросейсмических помех и уменьшается путем усреднения результатов многократных измерений, и систематическую, вызванную нестабильностью и неопределенностью параметров измерительной установки. Величина случайной погрешности после статистической обработки составляет 1 мкГал, в то время как суммарная среднеквадратичная систематическая погрешность достигает 3,5 мкГал. Основными источниками систематической погрешности являются (в мкГал): остаточный газ в вакуумной камере – 2,0; вертикальные и наклонные колебания постаментов, на которых поднимают гравиметр для увеличения высоты полета ПТ – 1,5; погрешность измерения времени свободного полета ПТ – 1,5; градиент температур внутри вакуумной камеры – 1,0; отклонение от вертикали лазерного луча и траектории полета ПТ – 1,0; погрешность измерения пути полета ПТ – 1,0 [6].

Таким образом, основные погрешности вызваны электромеханической катапультой, осуществляющей подбрасывание ПТ с оптическим отражателем, который взаимодействует с интерферометром БЛГ, и неравномерностью распределения температуры внутри вакуумной камеры, поскольку из-за температурных градиентов возникают дополнительные силы, изменяющие характер движения ПТ [6, 7].

БЛГ государственного первичного эталона g ДЕГУ 02-02-96 состоит из вакуумной камеры 1, в которой расположены пантограф 2, соединенный с кареткой 3 сверху и с якорем 4 тягового электромагнита 5 внизу (рис. 1а). Сверху вакуумной камеры установлено кварцевое стекло 6, через которое лазерный интерферометр 7 взаимодействует с оптическим отражателем, закрепленном на ПТ 8. На наружной поверхности вакуумной камеры расположены электрические нагреватели 9, обеспечивающие необходимый уровень температуры, и пенопластовая теплоизоляция 10. На силовом фланце 11 сверху установлен защитный кожух 12 вакуумной камеры, а снизу – кожух 13 электромагнита.

Электрические нагреватели 9 пропитаны лаком со специальной пастой, покрыты стеклотканью и подключены к электронному блоку термостатирования, который обеспечивает поддержание температуры $+40 \pm 2$ °С стенок вакуумной камеры. Однако, как показывают расчеты распределения температуры, проведенные с использованием полевой модели методом конечных элементов по программе FEMM, при данном распо-

ложении нагревателей внутри вакуумной камеры возникает существенный аксиальный градиент температур (рис. 1б). Кроме того, температура на оси гравиметра несколько отличается от температуры стенок, особенно вверху и внизу вакуумной камеры.

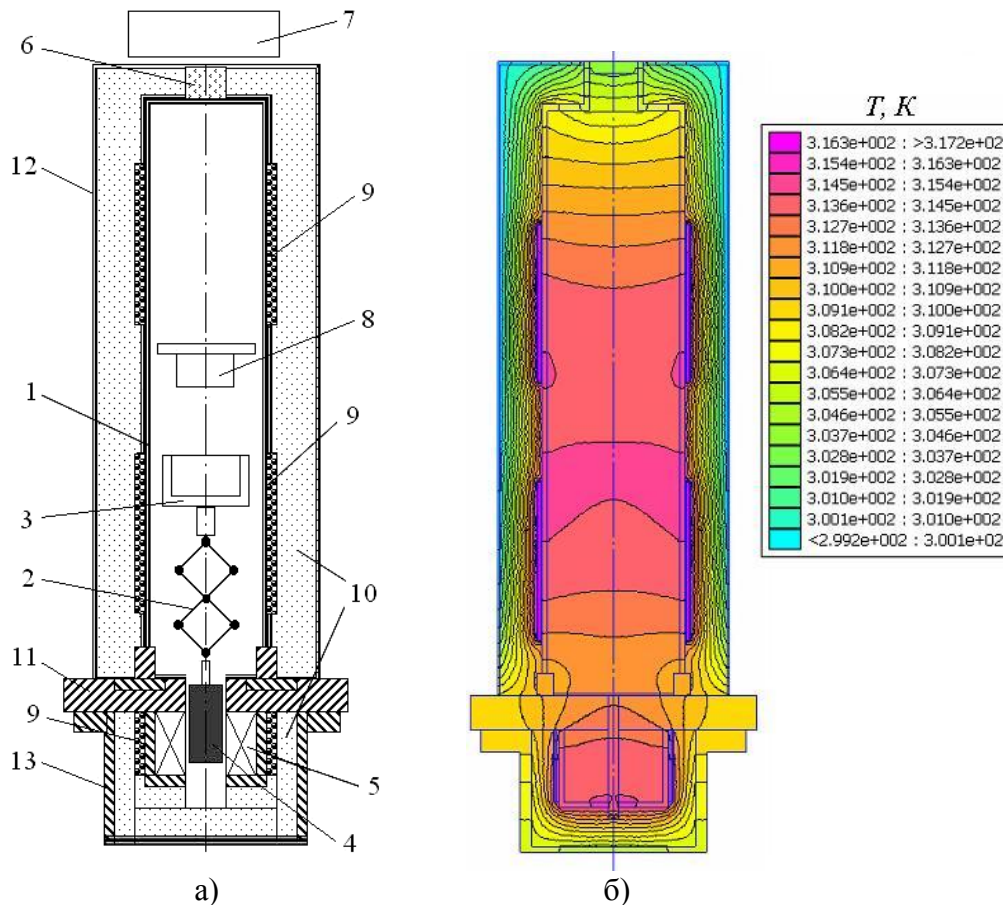


Рисунок 1 – Конструктивная схема (а) и распределение температур (б) БЛГ ДЕГУ 02-02-96

Иным существенным недостатком известного БЛГ является многоступенчатое преобразование электрической энергии в кинетическую для ПТ, поскольку включает перемещение якоря 4 вниз под действием магнитного поля электромагнита 5, осевое разжимание и радиальное сжимание пантографа 2, механическое взаимодействие подшипников каретки и якоря с направляющими элементами (на рис. 1б не показаны). За счет пантографа возрастают габариты нерабочей зоны вакуумной камеры 1. Из-за механического взаимодействия подвижных с неподвижными элементами в вакууме необратимо изменяются контактные поверхности: возникают микроскопические трещины, разрушаются поверхностные, например, окисные пленки, повышается коэффициент трения, а износ элементов может достичь недопустимых величин, исключающих нормальное функционирование гравиметра [8].

Взаимодействие ферромагнитного якоря с обмоткой катушки электромагнитного привода не позволяет из-за насыщения ферромагнитного материала регулировать скорость каретки 3 в необходимых пределах с обеспечением заданной величины и точности. Поэтому для изменения высоты подбрасывания ПТ гравиметр поднимают на специальную постамент, что обуславливает дополнительную погрешность в измерения ускорения свободного падения g [5].

Целью статьи является обоснование концепции БЛГ повышенной эффективности с прямым преобразованием электрической в кинетическую энергию при обеспечении минимального температурного градиента вдоль оси вакуумной камеры.

В качестве технических решений, обеспечивающих решение поставленной цели, предлагается использование системы электронагревательных элементов, обеспечивающих минимальный температурный градиент на оси гравиметра, и импульсного индукционно-динамического привода, при котором обеспечиваются уменьшенные габариты нерабочей зоны вакуумной камеры, улучшенные регулировочные характеристики при отсутствии механических контактных взаимодействий.

Выбор параметров системы электронагревательных элементов

Обеспечение минимального градиента вдоль оси при заданном уровне температуры внутри вакуумной камеры БЛГ путем выбора параметров нагревателей осуществим при минимизации показателей:

$$\Theta = |T_a - T|/T_a ; \mathfrak{G} = (T_{\max} - T_{\min})/\delta ; N ; V_a, \quad (1)$$

где T_a, T_{\max}, T_{\min} – заданная, максимальная и минимальная температуры в объеме вакуумной камеры; $\delta = r, z$ – пространственная координата; N, V_a – количество и объем нагревателей.

Для решения задачи выбираются параметрические и функциональные ограничения

$$N \rightarrow \min ; z_1^h \leq z_0^h ; z_k^h > z_k^l ; z_{k+1}^h < z_k^l ; z_N^l \geq z_0^l ; w_k \leq w_{\max} ; k \in [1, N], \quad (2)$$

где z_0^h, z_0^l – соответственно, верхняя и нижняя граничные координаты расположения нагревателей вдоль оси вакуумной камеры; z_k^h, z_k^l – соответственно, верхняя и нижняя координаты расположения k -ого нагревателя вдоль оси вакуумной камеры; w_{\max} – максимальная удельная мощность тепловыделений нагревателя.

Для решения задачи используем иерархический подход, при котором высший приоритет присвоен критерию, характеризующему степень нарушения поискового пространства, т.е. выход за пределы $\{a_i, b_i\}$ разрешенных границ векторов независимых переменных x_i

$$U_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^5 (\max \{0, a_i - x_i\} + \max \{0, x_i - b_i\}). \quad (3)$$

Следующим по важности выступает критерий, характеризующий отклонение температуры от заданной

$$U_2(\mathbf{x}) = \min \{\Theta(\mathbf{x})\}. \quad (4)$$

далее – критерий, характеризующий пространственный градиент температур

$$U_3(\mathbf{x}) = \min \{\mathfrak{G}(\mathbf{x})\}. \quad (5)$$

По степени убывания важности следуют критерии, определяющие количество и размеры нагревателей

$$U_4(x) = \min \{N(x)\}; \tag{6}$$

$$U_5(x) = \min \{V_a(x)\}. \tag{7}$$

Решение $x = x^*$ считается найденным, если выполняются условия:

$$U_1(x^*) = U_2(x^*) = U_3(x^*) = 0; U_4(x^*) = \min f_1; U_5(x^*) = \min f_2. \tag{8}$$

Стратегия нахождения решения m переменных в поисковом пространстве заключается в совместном использовании глобального метода оптимизации, осуществляющего случайный поиск параметров нагревателей в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локального метода, обеспечивающего стягивание области параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров [9].

Для глобальной оптимизации используем генетические алгоритмы, основанные на механизмах популяционной генетики. Работа генетических алгоритмов представляет итерационный процесс, который продолжается до выполнения условия (8) с заданной точностью. В качестве метода локальной оптимизации для поиска минимума критерия оптимальности $\Phi(X)$ в n -мерном евклидовом пространстве R^n

используется метод Нелдера-Мида, осуществляющий изменение текущего симплекса.

$$\min \Phi(X) = \Phi(X^*) = \Phi^*, X \in R^n \tag{9}$$

используется метод Нелдера-Мида, осуществляющий изменение текущего симплекса.

На основании соотношений (6)–(21) разработана компьютерная программа, блок-схема которой представлена на рис. 2, обеспечивающая выбор параметров и аксиальное расположение электрических нагревателей, при которых

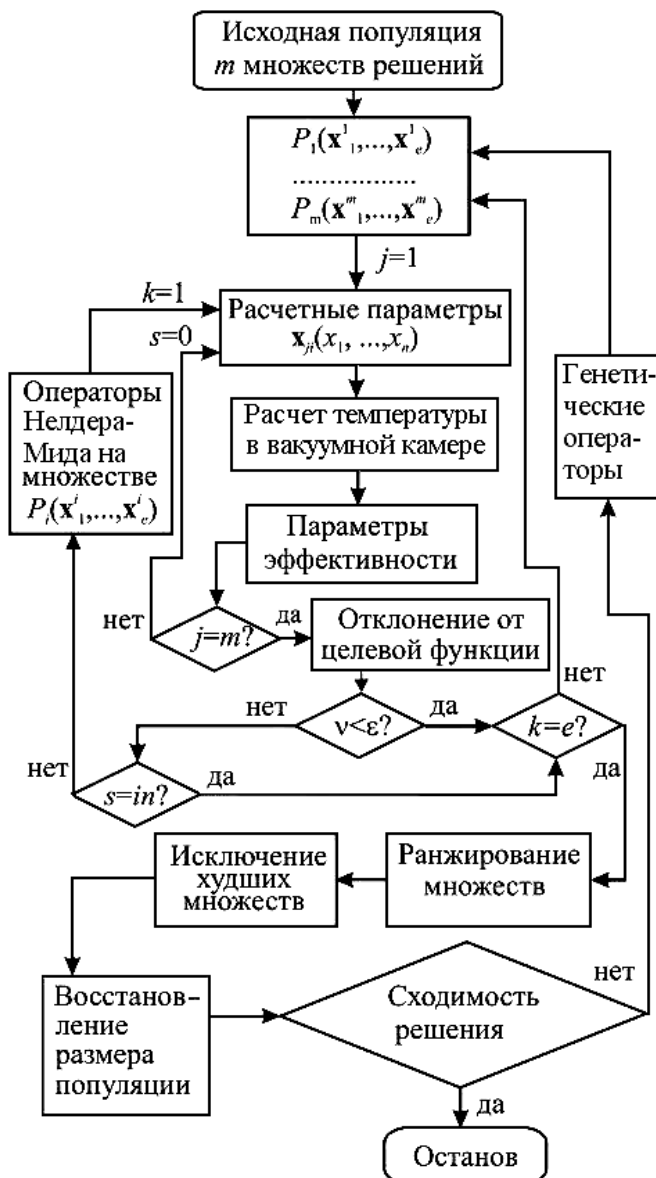


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма выбора электрических нагревателей

формируется требуемое распределение температур внутри вакуумной камеры БГ.

На рис. 3 показана конструктивная схема и температурное поле усовершенствованного БЛГ, у которого аналогичные элементы обозначены так же, как и у известного (рис. 1а). В предлагаемом гравиметре изменены параметры нагревателей и применен импульсный индукционно-динамический привод, состоящий из выполненных в форме дисков неподвижного индуктора 14, электропроводящего якоря 15 и силового диска 16, взаимодействующего с кареткой 3 (рис. 3а).

Минимальный градиент при заданном уровне температуры $T_{cp} = 313$ К обеспечивают нагреватели ЭН₁–ЭН₄, охватывающие вакуумную камеру. Все нагреватели имеют различные тепловые (мощность P) и геометрические (аксиальная высота h) параметры, которые представлены в табл. 1 (номера нагревателей отсчитываются сверху вниз).

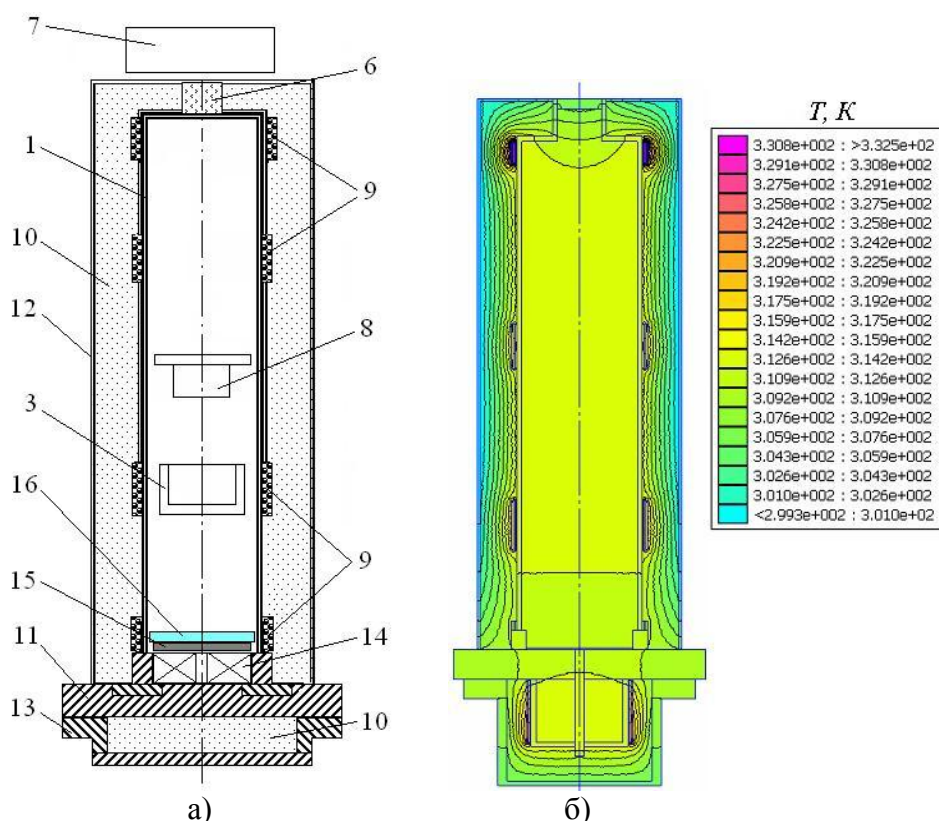


Рисунок 3 – Конструктивная схема (а) и распределение температур (б) модернизированного БЛГ повышенной эффективности

Таблица 1 – Параметры нагревателей модернизированного БЛГ

Нагреватели	T_{cp} , К	h , мм	P , Вт	F_r , Вт/м ²	F_z , Вт/м ²
ЭН ₁	332,42	20	7,63	-234,3	23,5
ЭН ₂	315,65	47	2,39	-10,4	-0,5
ЭН ₃	317,89	51	4,41	-45,5	-27,6
ЭН ₄	312,16	10	6,53	-13,4	-3692,7

Наименьшая средняя температура наблюдается в несущем фланце $T_{cp} = 310,2$ К, тепловые потоки которого в радиальном и аксиальном направлениях, соответственно,

составляют $F_r = 1452,2 \text{ Вт/м}^2$ и $F_z = 177,3 \text{ Вт/м}^2$. В результате полученного теплового поля внутри вакуумной камеры возникают температурные градиенты в радиальном $G_r = -2,77 \text{ К/м}$ и аксиальном $G_z = 0,081 \text{ К/м}$ направлениях. При этом общий объем нагревателей V_a модернизированного БЛГ уменьшился на 44 % по сравнению с ДЕТУ 02-02-96.

Как показывают расчеты, температура на оси практически совпадает с температурой стенки, но лишь в средней части вакуумной камеры. В верхней части камеры температура на оси становится заметно ниже, а в нижней части – несколько выше, чем на стенках. При этом в БЛГ ДЕТУ 02-02-96 в средней части вакуумной камеры наблюдается область повышенной температуры, а снизу и особенно сверху – область пониженной температуры, что и обуславливает значительный аксиальный градиент температуры. В модернизированном БЛГ указанный эффект снижен, что способствует повышению точности измерения ускорения свободного падения.

Импульсный индукционно-динамический привод

Для осуществления непосредственного преобразования электрической энергии источника в кинетическую применен импульсный индукционно-динамический привод [10]. При возбуждении неподвижного индуктора 14 от емкостного накопителя однополупериодным импульсом в якоре 15 индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем индуктора приводит к возникновению электродинамической силы, отталкивающей якорь от индуктора. Для расчета распределенного тока массивный медный якорь представляется совокупностью N короткозамкнутых контуров, равномерно распределенных по его объему, что позволяет описать электрические процессы в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 &R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \times \\
 &\quad \times \frac{di_k}{dt} + V(t) \left(i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0 \quad (10) \\
 &R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times \\
 &\quad \times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left(i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,
 \end{aligned}$$

где i_0, L_0, R_0 – ток, индуктивность и сопротивление индуктора соответственно; $i_{1..k}, L_{1..k}, R_{1..k}$ – соответственно ток, индуктивность и сопротивление короткозамкнутого 1... k -го контура якоря, перемещающегося со скоростью $V(t)$ вдоль оси z ; M_{kp} – взаимная индуктивность между соответственными токовыми элементами ($k \neq p$); $T_0 \dots T_k$ – температура 0... k -го активного элемента; C, U_0 – емкость и зарядное напряжение емкостного накопителя.

Вертикальное перемещение якоря ΔZ возникает под действием электродинамической силы

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z). \quad (11)$$

Скорость якоря представляется в виде рекуррентного соотношения:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - g(m_1 + m_2), \quad (12)$$

где m_1, m_2 – масса якоря с силовым диском и ПТ соответственно.

Регулирования высоты и времени свободного полета ПТ в вакуумной камере предлагаемого БЛГ осуществляется изменением параметров емкостного накопителя.

На рис. 4 представлены электродинамические и механические характеристики импульсного индукционно-динамического привода, полученные путем изменения емкости C и напряжения U_0 емкостного накопителя. Для возбуждения индуктора используется схема с однополупериодным импульсом, что позволяет сохранить часть энергии емкостного накопителя для повторного импульса возбуждения индуктора, необходимого для электродинамического торможения падающего якоря при приближении к индуктору.

При увеличении емкости C накопителя импульс электродинамической силы $f_z(t)$ возрастает как по величине, так и по длительности, что обуславливает практически линейное возрастание высоты подбрасывания и времени свободного движения ПТ (рис. 5а). При увеличении напряжения U_0 емкостного накопителя величина импульса электродинамической силы $f_z(t)$ изменяется практически в квадратичной зависимости при сохранении его длительности (рис. 5б). При этом высота подбрасывания и время свободного движения ПТ увеличиваются еще в большей пропорции.

Таким образом, предлагаемый БЛГ обладает повышенной эффективностью за счет непосредственного преобразования электрической энергии в кинетическую для ПТ. При этом практически отсутствует нерабочая зона в вакуумной камере из-за отсутствия вспомогательных элементов преобразователя. Из-за отсутствия механического взаимодействия между подвижными и неподвижными элементами в вакууме не ухудшается состояние контактных поверхностей, что повышает надежность и увеличивает срок эксплуатации гравиметра.

Высоту подбрасывания и время свободного полета ПТ можно легко регулировать при помощи изменения параметров емкостного накопителя энергии, возбуждающего неподвижный индуктор импульсного индукционно-динамического привода без изменения положения гравиметра относительно исследуемой поверхности, что способствует уменьшению систематической погрешности БЛГ.

В предлагаемом гравиметре уменьшена систематическая погрешность за счет устранения колебаний постаменты, на который поднимают гравиметр для увеличения высоты полета ПТ, более точного измерения времени и пути свободного полета, уменьшения градиента температур внутри вакуумной камеры и уменьшения отклонения от вертикали траектории полета ПТ.

Заключение

Показано, что основные погрешности БЛГ ДЕГУ 02-02-96, являющегося государственным первичным эталоном ускорения свободного падения, вызваны электромеханической катапульты, использующей электромагнитный привод с пантографом, и неравномерностью распределения температуры внутри вакуумной камеры, формируемой электрическими нагревателями.

В БЛГ повышенной эффективности предлагается использование модернизированной системы электронагревательных элементов, обеспечивающих минимальный

температурний градієнт на осі гравиметра, і імпульсного індукційно-динамічного привода, при якому забезпечується пряме преобразование електричної енергії в кінетическу енергію вертикального переміщення, зменшені габарити неробочої зони вакуумної камери, удешевлені регулювальні характеристики при відсутності механічних контактних взаємодій.

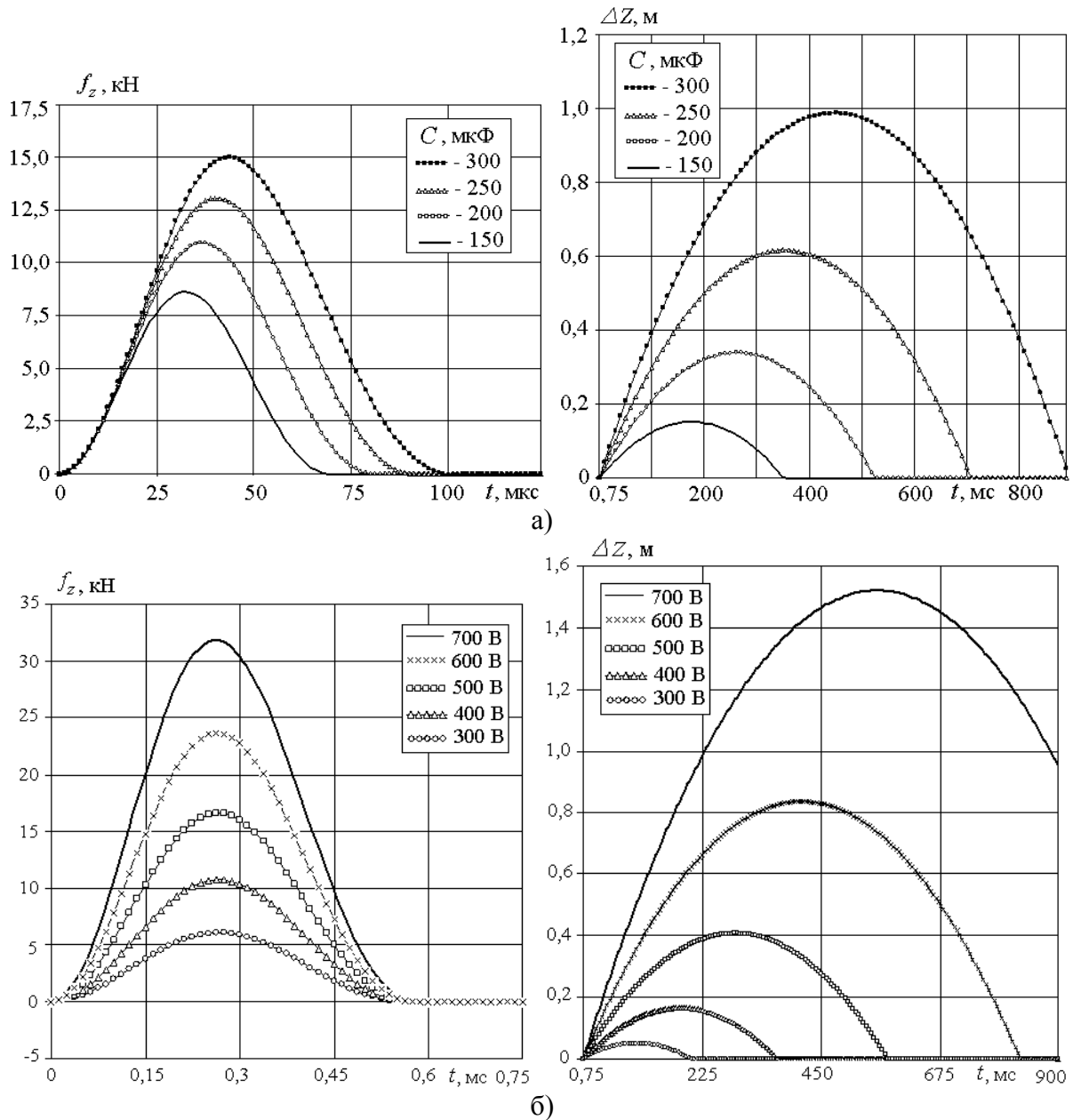


Рисунок 4 – Електродинамічні $f_z(t)$ і механічні $\Delta Z(t)$ характеристики імпульсного індукційно-динамічного привода

Література

1. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. – М.: Наука, 1983. – 356 с.
2. Определение силы тяжести на море / Под ред. Н.П. Грушинского – М.: Недра, 1970. – 248 с.

3. Измерение силы тяжести / Под ред. Ю.Д. Буланже.– М.: Наука, 1981. – 96 с.
4. Коронкевич, В.П., Арнаутов, Г.П., Стусь, Ю.Ф. Абсолютный лазерный баллистический гравиметр // Препринт ИАиЭ СО АН СССР.– Новосибирск.– 1982. – № 196.– 37 с.
5. ДСТУ 3382-96. Державна повірочна схема для засобів вимірювань прискорення сили ваги.
6. Арнаутов Г.П. Оптические схемы абсолютных лазерных баллистических гравиметров // Автометрия.– 1998.– № 6 – С. 53–64.
7. Леонтьев В.И. Лабораторные исследования термостата гравиметра ГАГ-3 // Сб. науч. тр. Повторные гравиметрические наблюдения. – М.: изд. МГК, 1988.– С. 60–74.
8. Крагельский И.В. и др. Трение и износ в вакууме. – М.: Машиностроение, 1973.– 216 с.
9. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters // Russian Electrical Engineering.– 2004.– Vol. 75.– № 12. – P. 1–11.
10. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Харків: НТУ «ХПІ».– 2006.– 260 с.

УДК 621.3.014.33:389

Болюх В.Ф., Вінніченко О.І.

КОНЦЕПЦІЯ БАЛІСТИЧНОГО ЛАЗЕРНОГО ГРАВИМЕТРА ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Запропонована концепція балістичного лазерного гравіметра підвищеної ефективності з модернізованою системою електронагрівальних елементів, які забезпечують мінімальний температурний градієнт на осі гравіметра, та з імпульсним індукційно-динамічним приводом, який забезпечує пряме перетворення електричної енергії в кінетичну енергію вертикального переміщення пробного тіла з оптичним відбивачем, зменшені габарити неробочої зони вакуумної камери, поліпшені регульовальні характеристики при відсутності механічних контактних взаємодій.

Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I.

CONCEPTION OF BALLISTIC LASER OF GRAVIMETERS PROMOTED EFFICIENCY

Conception of ballistic laser to the gravimeters promoted efficiency with the modernized system of electro heater system elements, providing a minimum temperature gradient on the axis of gravimeters, is offered, and with an impulsive induction-dynamic drive providing direct transformation of electric energy to kinetic energy of the vertical moving of trial body with an optical reflector, diminished sizes of non-working area of vacuuming chamber, improved regulation descriptions, in default of mechanical contact cooperations.