

Магнитные поля рассеяния электромеханической катапульты электромагнитного и индукционно-динамического типа баллистического лазерного гравиметра

В.Ф. Болюх¹, П.И. Неежмаков², А.И. Винниченко²

¹Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ул. Кирпичева, 2, 61002, Харьков, Украина
vfbolyukh@gmail.com

²Национальный научный центр "Институт метрологии", ул. Мироносицкая, 42, 61002, Харьков, Украина
vinncsc2@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена исследованию магнитных полей рассеяния, создаваемых электромеханическими катапультами электромагнитного и индукционно-динамического типов. В баллистическом лазерном гравиметре (БЛГ) с катапультой электромагнитного типа происходит опосредованное преобразование электромеханической энергии. В БЛГ с катапультой индукционно-динамического типа происходит прямое преобразование электромеханической энергии, причем она позволяет легко регулировать высоту подбрасывания пробного тела. При возбуждении индуктора от емкостного накопителя энергии на ферромагнитный якорь катапульты электромагнитного типа действуют электромагнитные силы притяжения, а на электропроводящий якорь в катапульте индукционно-динамического типа — электродинамические силы отталкивания. При помощи математической модели установлен характер распределения магнитных полей рассеяния в рассматриваемых катапультах. В катапульте электромагнитного типа наибольшие значения индукции магнитного поля наблюдаются в ферромагнитном якоре, причем значительные магнитные поля рассеивания наблюдаются в верхней части катапульты, где находится рабочая вакуумная камера. Для уменьшения указанных магнитных полей рекомендуется установить массивный ферромагнитный экран над катапультой электромагнитного типа. В катапульте индукционно-динамического типа характер магнитных полей во многом определяется ферромагнитным экраном, охватывающим индуктор. При выполнении указанного экрана с низкой электропроводностью, например из магнитодиэлектрика, магнитное поле рассеяния многократно уменьшается как сверху, так и снизу индуктора, что позволяет расположить катапульту вблизи рабочей камеры БЛГ.

Ключевые слова: гравиметр, катапульта, магнитное поле, ферромагнитный экран.

Получено: 03.09.2018

Отредактировано: 17.09.2018

Одобрено к печати: 24.09.2018

Вступление

Для высокоточных измерений абсолютного значения ускорения свободного падения g применяются баллистические лазерные гравиметры (БЛГ). В них осуществляется измерение интервалов пути и времени, пройденных подвижным пробным телом (ПТ), являющимся составной частью измерительной системы лазерного интерферометра при свободном движении в вакуумной камере гравиметра [1]. При симметричном способе осуществляется измерение g на симметричных относительно вершины восходящей и нисходящей траекториях движения путем подбрасывания ПТ катапультой. Наиболее эффективной является электромеханическая катапульта электромагнитного или индукционно-динамического типа, индуктор которой возбуждается от емкостного нако-

пителя энергии (ЕНЭ). Однако ее работа влияет на процесс измерения g [2]. Одним из факторов, вызывающих систематические погрешности БЛГ, являются магнитные поля рассеяния в рабочей вакуумной камере, создаваемые электромеханической катапультой.

Анализ литературных данных и постановка задачи

Магнитные поля являются одним из факторов, увеличивающих систематические погрешности абсолютных гравиметров [3]. Проблема снижения магнитных полей рассеяния в катапульте электромагнитного типа (КЭМ) и катапульте индукционно-динамического типа (КИД) при помощи различных экранов исследуется в работах [4]. Как показывает анализ, электро-

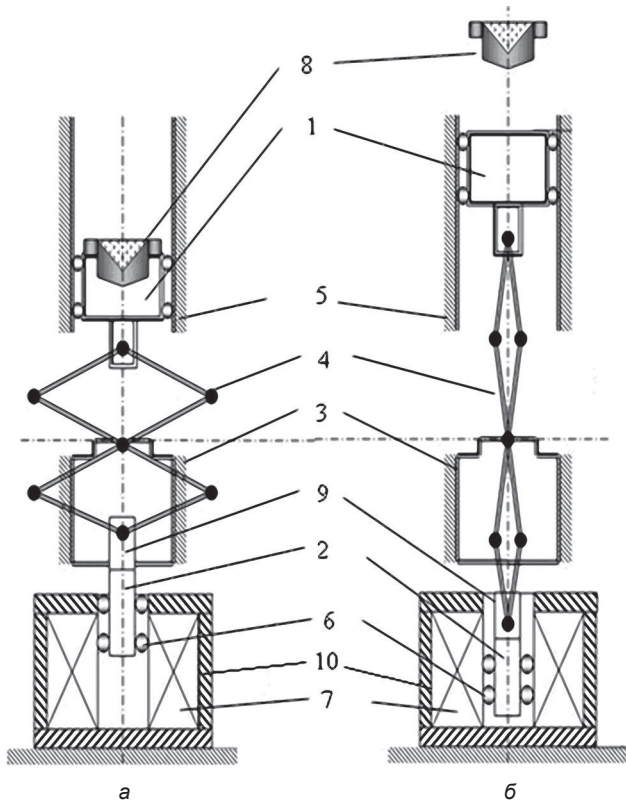


Рис. 1. Схема БЛГ с КЭМ в исходном (а) и в рабочем (б) положении: 1 — подвижная каретка; 2 — ферромагнитный якорь; 3 — стакан; 4 — пантограф; 5 — направляющее устройство; 6 — подшипник; 7 — обмотка возбуждения; 8 — ПТ; 9 — соединительная вилка; 10 — ферромагнитный сердечник

магнитные экраны, выполненные из электропроводящего материала, уменьшают магнитные поля в активной зоне катапульты, снижая ее эффективность [5]. Ферромагнитные экраны (ФЭ), выполненные из сплошного материала, также малоэффективны за счет скин-эффекта. Наиболее эффективными являются ФЭ, обладающие минимальной электропроводностью, которые усиливают магнитное поле в пространстве между индуктором и якорем. Такие экраны выполняются или шихтованными, или из магнитодиэлектрического материала [6]. Однако эффективность применения ФЭ в КЭМ и КИД не исследовалась.

Цель и задачи исследования

Целью статьи является исследование магнитных полей рассеяния в катапультах электромагнитного и индукционно-динамического типов, содержащих ферромагнитные сердечники или экраны.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- при помощи математической модели рассчитать магнитные поля рассеяния, созданные в нижней зоне рабочей вакуумной камеры;
- установить характер распределения магнитных полей в КЭМ и КИД;

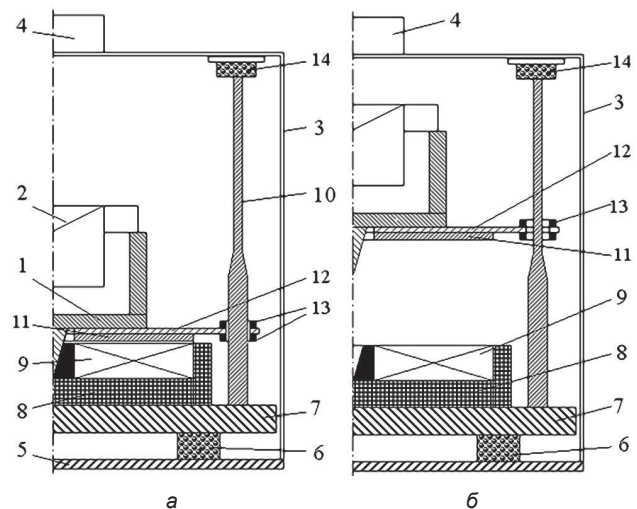


Рис. 2. Схема БЛГ с КИД в исходном (а) и в рабочем (б) положении: 1 — ПТ; 2 — уголкового отражатель; 3 — вакуумная камера; 4 — излучатель; 5 — днище камеры; 6 — демпфер; 7 — силовая плита; 8 — ферромагнитный сердечник; 9 — обмотка возбуждения; 10 — направляющие стойки; 11 — электропроводящий якорь; 12 — подшипник; 13 — упругий демпфер

- провести сравнительный анализ уровня магнитных полей рассеяния, созданных КЭМ и КИД при наличии ФЭ.

Концепции БЛГ с катапультами электромагнитного и индукционно-динамического типов

В БЛГ с КЭМ осуществляется опосредованное преобразование электрической энергии ЕНЭ в вертикальное подбрасывание ПТ [7]. Подбрасывающее устройство БЛГ выполнено на основе симметричного шестизвенного рычажного механизма (пантографа) с центральной осью, закрепленной в вакуумной камере баллистического блока (рис. 1). Центральная ось соединена с ферромагнитным якорем КЭМ. При возбуждении обмотки электромагнита от ЕНЭ возникающий токовый импульс за счет магнитного поля осуществляет втягивание массивного ферромагнитного якоря во внутреннюю полость. Перемещаясь вертикально вниз, ферромагнитный якорь тянет пантограф, который за счет уменьшения радиальных и увеличения аксиальных размеров подбрасывает каретку с ПТ вертикально вверх с последующим улавливанием.

Указанное многоступенчатое преобразование электрической энергии ЕНЭ в механическую энергию вертикального движения ПТ сопровождается трением и последующим износом контактов подвижных элементов, вибрацией и ударами в соединительных элементах, демпфированием части энергии, изгибно-деформационными процессами и др.

Для устранения систематических погрешностей предложено использовать БЛГ с КИД, обеспечивающей непосредственное электромехани-

ческое преобразование энергии и позволяющей легко регулировать высоту подбрасывания ПТ [8] (рис. 2). В КИД при возбуждении обмотки электромагнита от ЕНЭ за счет магнитного поля происходит индуцирование вихревых токов в электропроводящем якоре. Возникающая при этом электродинамическая сила отталкивает якорь от неподвижной обмотки электромагнита.

Основное отличие катапульт электромагнитного и индукционно-динамического типов состоит в конструкции ускоряемого якоря, что обуславливает различный характер действующих на них сил. В КЭМ содержится ферромагнитный якорь, а в КИД — электропроводящий немагнитный якорь. И в КЭМ и в КИД подвижные якоря взаимодействуют с индуктором посредством магнитного поля. Со стороны индуктора в КЭМ на ферромагнитный якорь действуют электромагнитные силы притяжения, а в КИД на электропроводящий якорь действуют электродинамические силы отталкивания. Ферромагнитный якорь перемещается относительно индуктора вертикально вниз, а электропроводящий якорь — вертикально вверх, т. е. в направлении подбрасывания ПТ.

Математическая модель катапульты БЛГ

В катапультах БЛГ при возбуждении индуктора от ЕНЭ возникают быстротекающие и взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы. Реализация математической модели электромеханических процессов катапульты основана на методе конечных элементов.

Поскольку рассматриваемые катапульты имеют осевую симметрию, то целесообразно использовать двумерную математическую модель с пространственно-распределенными параметрами [4]. Для определения электромагнитных параметров катапульты в цилиндрической системе координат $\{r, z\}$ рассчитывается векторный магнитный потенциал A из уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu_0} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = j_m, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; σ — электропроводность якоря и индуктора; j_m — плотность тока в активном элементе; $m=1$ — индекс индуктора; $m=2$ — индекс электропроводящего якоря.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}; \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}. \quad (2)$$

Граничными условиями системы выступает уравнение $n \cdot A = 0$, где n — единичный вектор внешней нормали к поверхности. Ток в индукторе i_1 описывается уравнением:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt - \frac{N_1}{s} \int_V \frac{dA_l}{dt} dv = 0; \quad (3)$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0,$$

где R_e — активное сопротивление внешней цепи; R_1 — активное сопротивление индуктора; L_e — индуктивность внешней цепи; U_0 — напряжение заряда ЕНЭ; C — емкость ЕНЭ; N_1 — число витков индуктора; s — площадь поперечного сечения индуктора, пронизываемая магнитным потоком; A_l — проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V — объем индуктора.

Электродинамические усилия, действующие на якорь, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$f_z = 0,5 \oint_S [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (4)$$

где s — площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря; n — единичный вектор нормали к поверхности якоря.

Уравнения (1) — (4) описывают электромеханические процессы в катапульте при начальных условиях: $u_c(0)=U_0$; $i_1(0)=0$, где u_c — напряжение ЕНЭ. При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора, деформации элементов и строго аксиальное расположение якоря относительно индуктора.

Решение системы уравнений (1) — (4) получаем с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира — при интегрировании по времени. Для решения поставленной задачи разработана компьютерная модель катапульты БЛГ в программном пакете *Comsol Multiphysics*. Расчетный шаг по времени автоматически варьировался в зависимости от условий сходимости и показателей погрешности полученных решений. Решение системы уравнений осуществлялось методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO.

Результаты расчета магнитных полей в катапультах

В КЭМ магнитное поле распределено неравномерно (рис. 3). Наибольшее значение ин-

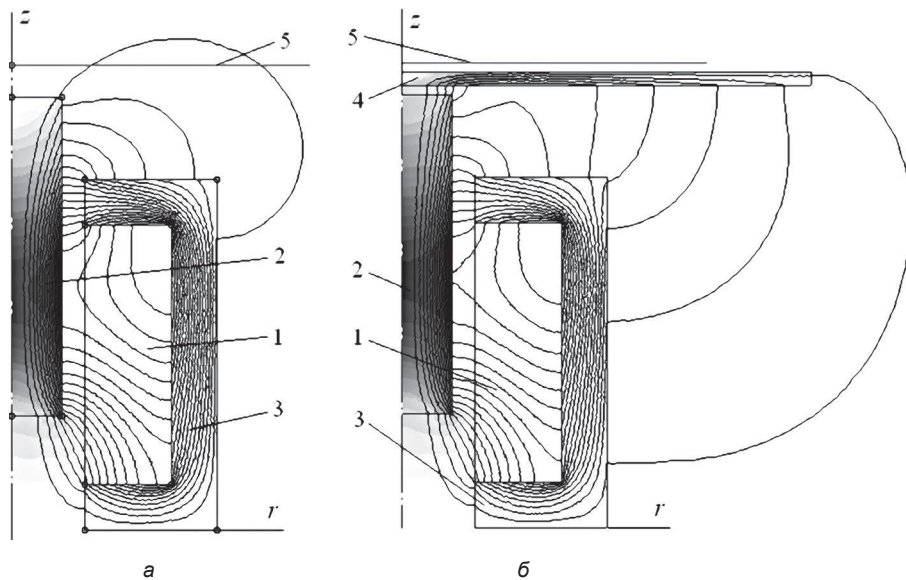


Рис. 3. Распределение магнитного поля в КЭМ без ферромагнитной плиты (а) и с ферромагнитной плитой (б) в момент максимума тока в обмотке электромагнита: 1 — обмотка электромагнита; 2 — ферромагнитный ярлык; 3 — ферромагнитный экран; 4 — ферромагнитный экран; 5 — нижняя граница рабочей камеры

дукции магнитного поля наблюдается в ферромагнитном ярлыке. При этом ферромагнитный экран практически полностью экранирует магнитные поля рассеяния в нижней и средней части. Однако значительная величина магнитного поля рассеивается в верхней части катапульты, где и расположена рабочая вакуумная камера. На рис. 3 нижняя граница рабочей вакуумной камеры обозначена горизонтальной линией. Как показывают расчеты, на данной границе усредненная величина модуля индукции магнитного поля существенна и составляет $|B_{cp}| = 8,09$ мТл.

Для уменьшения этого поля целесообразно сверху над КЭМ установить плоский ферромагнитный экран (рис. 3б). Это позволяет уменьшить величину $|B_{cp}|$ на нижней расчетной границе рабочей камеры практически на порядок.

В КИД характер распределения магнитного поля отличается от КЭМ и существенно зависит от ФЭ. При отсутствии экрана магнитное поле проникает в пространство, расположенное снизу и сбоку от индуктора (рис. 4а). Если ФЭ выполнен в виде массивного стального сердечни-

ка, то за счет скин-эффекта это поле проникает только в его области, обращенные к индуктору (рис. 4б).

И только при выполнении ФЭ с малой электропроводностью, например, из магнитодиэлектрика или шихтованным, это поле равномерно распределяется по всему объему ФЭ (рис. 4в). В этом варианте магнитные поля рассеяния практически отсутствуют. Это связано с тем, что индуцированные вихревые токи в электропроводящем ярлыке экранируют магнитное поле, созданное обмоткой электромагнита. Таким образом, магнитное поле снизу и сбоку КИД мало за счет концентрации его в ФЭ, а сверху КИД — за счет экранирования вихревыми токами электропроводящего экрана. Усредненная величина модуля индукции магнитного поля незначительна и составляет $|B_{cp}| = 0,09$ мТл, что на порядок лучше, чем в КЭМ.

Учитывая низкий уровень магнитных полей рассеяния, КИД можно располагать непосредственно либо вблизи, либо даже внутри рабочей вакуумной камеры БЛГ. Это делает конструкцию БЛГ с КИД легкой и компактной.

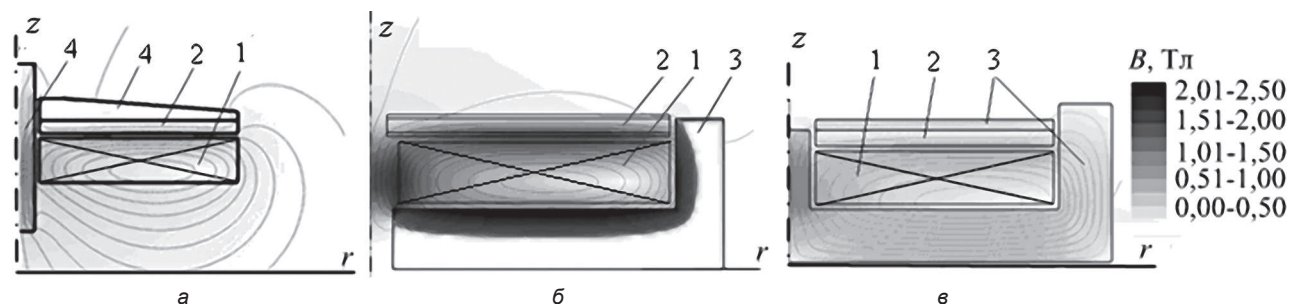


Рис. 4. Распределение магнитного поля в КИД в момент максимума тока в индукторе при условии, что ФЭ: отсутствует (а), выполнен массивным стальным (б), выполнен из магнитодиэлектрика (в): 1 — обмотка электромагнита; 2 — электропроводящий ярлык; 3 — ферромагнитный экран

Выводы

С использованием математической модели, реализованной в программном пакете *Comsol Multiphysics*, установлен характер распределения магнитных полей в электромагнитной и индукционно-динамической катапультах БЛГ. В катапульте электромагнитного типа наибольшее значение индукции магнитного поля наблюдается в ферромагнитном якоре. При этом значительная величина магнитного поля рассеивается в верхней части катапульты, где и расположена рабочая вакуумная камера. Для уменьшения этого поля целесообразно сверху над КЭМ установить массивный ферромагнитный экран, что позво-

ляет уменьшить усредненную величину индукции магнитного поля на нижней границе рабочей камеры практически на порядок.

В катапульте индукционно-динамического типа магнитное поле практически отсутствует снизу и сбоку за счет протекания в ферромагнитном экране, а сверху КИД — за счет экранирования вихревыми токами в электропроводящем экране. Поскольку величина модуля индукции магнитного поля незначительна, то КИД может располагаться либо вблизи, либо внутри рабочей вакуумной камеры, что делает конструкцию БЛГ легкой и компактной.

Магнітні поля розсіювання електромеханічної катапульты електромагнітного та індукційно-динамічного типу балістичного лазерного гравіметра

В.Ф. Болюх¹, П.І. Неєжмаков², О.І. Вінніченко²

¹Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна
vfbolyukh@gmail.com

²Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна
vinnsc2@gmail.com

Анотація

Статтю присвячено дослідженню магнітних полів розсіювання, створюваних електромеханічними катапультами електромагнітного та індукційно-динамічного типів. Показано недоліки балістичного лазерного гравіметра (БЛГ) з катапультю електромагнітного типу, що забезпечує опосередковане перетворення електромеханічної енергії. БЛГ з катапультю індукційно-динамічного типу забезпечує пряме перетворення електромеханічної енергії і дозволяє легко регулювати висоту підкидання пробного тіла. При збудженні індуктора від ємнісного накопичувача енергії на феромагнітний якір катапульты електромагнітного типу діють електромагнітні сили тяжіння, а на електропровідний якір катапульты індукційно-динамічного типу — електродинамічні сили відштовхування. За допомогою математичної моделі встановлено характер розподілу магнітних полів розсіювання в розглянутих катапультах. У катапульты електромагнітного типу найбільші значення індукції магнітного поля спостерігаються в феромагнітному якорі, причому значні магнітні поля розсіювання спостерігаються у верхній частині катапульты, де міститься робоча вакуумна камера. Для зменшення зазначених магнітних полів рекомендується встановити масивну феромагнітну плиту над катапультю електромагнітного типу. У катапульты індукційно-динамічного типу характер магнітних полів багато в чому визначається феромагнітним екраном, що охоплює індуктор. При виконанні зазначеного екрана з низькою електропровідністю магнітне поле розсіювання багаторазово зменшується як зверху, так і знизу індуктора, що дозволяє розташувати катапультю поблизу робочої камери БЛГ. Це робить конструкцію легкою і компактною.

Ключові слова: гравіметр, катапультя, магнітне поле, феромагнітний екран.

Stray magnetic fields of an electromechanical catapult of an electromagnetic and induction-dynamic type of a ballistic laser gravimeter

V.F. Bolyukh¹, P.I. Neezhmakov², A.I. Vinnichenko²

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova Str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine
vfbolyukh@gmail.com

²National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
vinnsc2@gmail.com

Abstract

The article is devoted to the study of stray magnetic fields created by the electromechanical catapults of electromagnetic and induction-dynamic types. In a ballistic laser gravimeter (BLG) with a catapult of electromagnetic type, electromechanical energy is converted indirectly. The BLG with an induction-dynamic type provides a direct conversion of electromechanical energy and makes it easy to adjust the height of throwing up the test body. When an inductor is driven by a capacitive energy storage device, electromagnetic attractive forces act on ferromagnetic armature of catapult of an electromagnetic type, and electrodynamic repulsive forces act on a conductive armature of catapult of an induction-dynamic type. With the help of a mathematical model, the character of the distribution of stray magnetic fields in the catapults under consideration is established. In the electromagnetic catapult, the greatest magnetic field induction values are observed in a ferromagnetic anchor, with significant stray magnetic fields observed in the upper part of the catapult, where the radiation vacuum chamber is located. To reduce the specified magnetic fields, it is recommended to install a massive ferromagnetic shield over the electromagnetic catapult. In the catapult of an induction-dynamic type, the character of the magnetic fields is largely determined by a ferromagnetic shield covering the inductor. When producing this shield with low electrical conductivity, for example from a magnetic dielectric, the stray magnetic field decreases many times from above and from below of the inductor, which allows the catapult to be positioned near the working chamber of the BLG.

Keywords: gravimeter, catapult, magnetic field, ferromagnetic shield.

Список литературы

1. Витушкин Л.Ф., Орлов О.А., Джермак А., Д'агостино Д. Лазерные интерферометры перемещений с субнанометровым разрешением в абсолютных баллистических гравиметрах. *Измерительная техника*. 2012. № 3. С. 3–8.
2. Омельченко А., Болюх В., Винниченко О. Автосейсмична складова похибки симетричного балістичного гравіметра, зумовлена коливаннями фундаменту. *Метрологія та прилади*. 2014. № 3. С. 51–56.
3. Niebauer T.M., Sasagawa G.S., Faller J.E. et al. A new generation of absolute gravimeters. *Metrologia*, 1995, no. 32, pp. 159–180.
4. Болюх В.Ф., Данько В.Г., Олексенко С.В. Влияние наружного экрана на эффективность линейного импульсного электромеханического преобразователя индукционного типа. *Электротехника*. 2018. № 4. С. 63–69.
5. Болюх В.Ф., Кочерга А.И., Шукин И.С. Многокритериальный выбор параметров наружного экрана линейного импульсного электромеханического преобразователя. *Електро-технічні та комп'ютерні системи*. 2017. № 25 (101). С. 106–116.
6. Болюх В.Ф., Олексенко С.В. Влияние параметров ферромагнитного экрана на эффектив-

ность линейного индукционно-динамического преобразователя. *Электротехника*. 2015. № 7. С. 66–72.

7. Болюх В.Ф., Винниченко О.И. Удосконалення кінематичної схеми балістичного гравіметра за рахунок лінійного електромеханічного перетворювача. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 2/7 (50). С. 9–15.
8. Bolyukh V.F., Omel'chenko A.V., Vinnichenko A.I. Effect of self-seismic oscillations of the foundation on the readout of a ballistic gravimeter with an induction-dynamic catapult. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 137–142.

References

1. Vitushkin L.F., Orlov O.A., Jermak A., D'agostino D. Lazernye interferometry peremeshchenij s subnanometrovym razresheniem v absolutnykh ballisticheskikh gravimetrah [Laser displacement interferometers with subnanometer resolution in absolute ballistic gravimeters]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2012, no. 3, pp. 3–8 (in Russian).
2. Omelchenko A., Bolyukh V., Vinnichenko O. Avtosejsmichna skladova pohybky symetrychnogo balistychnogo gravimetra, zumovlena kolyvanny-

- amy fundamentu [The autoseismic warehouse of the symmetrical ballistic engraver, is magnified by the baseboard]. *Metrolohiia ta prylady*, 2014, no. 3, pp. 51–56 (in Ukrainian).
3. Niebauer T.M., Sasagawa G.S., Faller J.E. et al. A new generation of absolute gravimeters. *Metrologia*, 1995, no. 32, pp. 159–180.
 4. Bolyukh V.F., Danko V.G., Oleksenko S.V. Vliyanie naruzhnogo ehkrana na ehffektivnost' linejnogo impul'snogo ehlektromekhanicheskogo preobrazovatela indukcionnogo tipa [Influence of the external screen on the efficiency of a linear pulsed electromechanical transducer of induction type]. *Elektrotehnika*, 2018, no. 4, pp. 63–69 (in Russian).
 5. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Shchukin I.S. Mnogokriterial'nyj vybor parametrov naruzhnogo ehkrana linejnogo impul'snogo ehlektromekhanicheskogo preobrazovatela [Multi-criteria selection of parameters for the outer screen of a linear pulsed electromechanical converter]. *Elektrotekhnichni ta komp'uterni systemy*, 2017, no. 25 (101), pp. 106–116 (in Russian).
 6. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. Vliyanie parametrov ferromagnitnogo ehkrana na ehffektivnost' linejnogo indukcionno-dinamicheskogo preobrazovatela [Influence of parameters of a ferromagnetic screen on the efficiency of a linear induction-dynamic converter]. *Elektrotehnika*, 2015, no. 7, pp. 66–72 (in Russian).
 7. Bolyukh V.F., Vinnichenko O.I. Udoskonalennia kinematychnoi skhemy balistychnoho hravimetra za rakhunok liniinoho elektromekhanichnogo peretvoriuvacha [Improvement of the kinematic scheme of a ballistic gravimeter at the expense of a linear electromechanical transducer]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, no. 2/7 (50), pp. 9–15 (in Ukrainian).
 8. Bolyukh V.F., Omel'chenko A.V., Vinnichenko A.I. Effect of self-seismic oscillations of the foundation on the readout of a ballistic gravimeter with an induction-dynamic catapult. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 137–142.