

УДК 531.1:528.56

В.Ф. БОЛЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков
А.И. ВИННИЧЕНКО, инженер, ННЦ "Институт метрологии",
Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОЙ КАТАПУЛЬТЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ГРАВИМЕТРА

Представлена математическая модель и характеристики индукционно-динамической катапульти баллистического гравиметра с симметричной схемой. Математическая модель основана на численно-аналитическом подходе при учете взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и механических процессов. Получены электромеханические характеристики катапульти, у которой высота подбрасывания пробного тела регулируется емкостью импульсного источника.

Представлена математична модель і характеристики індукційно-динамічної катапульти балістичного гравіметра з симетричною схемою. Математична модель заснована на чисельно-аналітичному підході при обліку взаємозв'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів. Отримано електромеханічні характеристики катапульти, у якій висота підкидання пробного тіла регулюється ємністю імпульсного джерела.

Введение. При абсолютных измерениях ускорения свободного падения баллистическим гравиметром (БГ) с симметричной схемой с целью улучшения метрологических характеристик важнейшей задачей является снизить влияние на измерительную систему аппаратуры ударов и вибраций, возникающие при работе катапульти, размещенной в вакуумной камере прибора динамического.

Катапульта существующего БГ осуществляет опосредованное преобразование электрической энергии электромагнита в вертикальное подбрасывание пробного тела (ПТ), представляющего собой стеклянный оптический уголковый отражатель в специальном корпусе и является составной частью измерительной оптической системы лазерного интерферометра Майкельсона [1]. На рис. 1 представлена принципиальная схема этой катапульти, выполненная на основе симметричного шестизвенного рычажного механизма (пантографа) с закреплённой центральной осью.

При подаче на обмотку электромагнита токового импульса с задан-

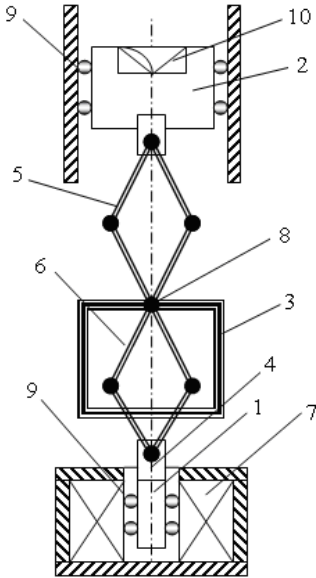


Рис. 1. Схема катапульты существующего БГ:
 1 – якорь; 2 – каретка; 3 – стакан; 4 – вилка; 5 – планка; 6 – пантограф; 7 – электромагнит; 8 – ось; 9 – подшипники; 10 – ПТ.

ными параметрами происходит перемещение вертикально вниз якоря, пантограф за счет уменьшения радиальных и увеличения аксиальных размеров подбрасывает ПТ вертикально вверх с последующим его улавливанием. Таким образом, происходит взаимосвязь следующих процессов: электрическое перемещение якоря вниз, поворот секций пантографа вокруг соответствующих осей и механическое перемещение каретки вверх. Указанное преобразование энергии сопровождается трением и последующим износом контактов подвижных элементов, вибрацией и микроударами в соединительных элементах системы, демпфированием части энергии, изгибно-деформационными процессами и др. В результате такого опосредованного преобразования энергии возникает комплекс различных колебаний и вибрационных помех.

Для БГ особенное значение имеют вибрации, вызванные упругой реакцией катапульты, которые представляют собой нестационарный случайный процесс и вызывают появление детерминированной, но изменяемой основы в погрешности измерений.

Такие составляющие погрешности, носящие систематический характер, не могут быть уменьшены проведением повторных измерений, и дальнейшее повышение динамической точности БГ связано с совершенствованием кинематической схемы катапульты ПТ, например, за счет применения дополнительных устройств [2].

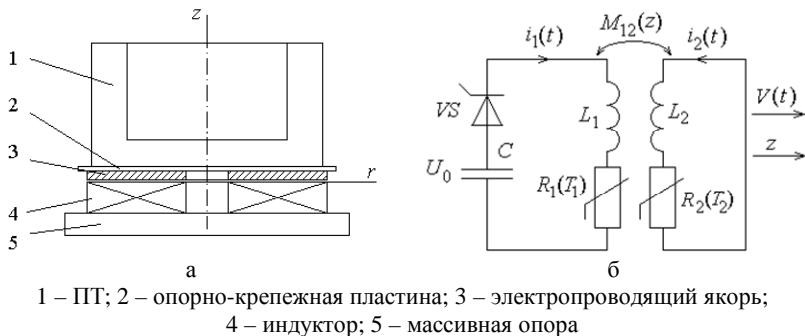
Такие составляющие погрешности, носящие систематический характер, не могут быть уменьшены проведением повторных измерений, и дальнейшее повышение динамической точности БГ связано с совершенствованием кинематической схемы катапульты ПТ, например, за счет применения дополнительных устройств [2].

Применение виброзащитных систем, как показали исследования по защите измерительной системы [2], усложняют конструкцию БГ, так как имеют большие габариты и массу, многократно превосходящие параметры оптико-механического устройства.

Однако наличие внутренней сеймики, т.е. вибрационного воздействия катапульты на оптическую систему – интерферометр в целом и на лазер в частности, обуславливает введение поправки ускорения в показания системы при работе БГ [2, 3]. Поэтому основное требование к техническим характеристикам дополнительной системы

учета виброускорений стостоит в том, что датчик линейных ускорений должен иметь максимальную чувствительность по ускорению при пороге чувствительности несколько десятков микрогал и обладать равномерной амплитудно-частотной характеристикой в широкополосном диапазоне частот вибрационных ускорений 0,1...300 Гц.

1. Концепция катапульты. Решить задачу снижения влияния на измерительную систему аппаратуры ударов и вибраций, устранить контактные и изгибно-деформационные процессы при существенном снижении массо-габаритных параметров можно путем усовершенствования кинематической схемы БГ, используя электронно управляемую катапульту с непосредственным преобразованием электрической энергии импульсного источника в кинетическую энергию вертикального движения посредством магнитного поля [4-7]. В такой индукционно-динамической катапульте (ИДК) при подключении индуктора к емкостному накопителю энергии (ЕНЭ) возбуждается импульсное магнитное поле, наводящее в электропроводящем якоре вихревой ток, который, взаимодействуя с указанным магнитным полем, вызывает электродинамическую силу отталкивания и аксиальное перемещение якоря с ПТ относительно неподвижного индуктора (рис.2,а).



1 – ПТ; 2 – опорно-крепежная пластина; 3 – электропроводящий якорь; 4 – индуктор; 5 – массивная опора

Рис. 2. Конструктивная (а) и электрическая (б) схема ИДК.

2. Математическая модель катапульты. Рассмотрим основные процессы ИДК, осуществляющей подбрасывание ПТ вертикально вверх. Для решения данной задачи используем численно-аналитический подход, основанный на расчете взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и механических процессов и учете нелинейных параметров, для которых характерна высокая степень изменения [8]. Для расчета характеристик катапульты приняты следующие допущения:

- все элементы ИДК, кроме индуктора и якоря, изготовлены из изоляционного или слабопроводящего материала;

- ток распределен по сечению якоря равномерно;
- влиянием подводящих и соединительных проводов пренебрегаем;
- все элементы ИДК выполнены абсолютно жесткими;
- отдача массивного упора при работе не учитывается;
- якорь относительно индуктора установлен и перемещается строго аксиально.

В рассматриваемой ИДК при подключении индуктора с параметрами L_1, R_1 к ЕНЭ протекает ток i_1 , который создает магнитное поле, индуцирующее в подвижном якоре с параметрами L_2, R_2 ток i_2 . За счет электродинамического взаимодействия происходит перемещение якоря вдоль оси z со скоростью V , вызывая изменение взаимной индуктивности M_{12} между якорем и индуктором.

Работа ИДК определяется электрическими, механическими, тепловыми и магнитными процессами при начальных условиях:

$T_n(0) = T_0$ – температура n -ого активного элемента (1 – индуктор, 2 – якорь);

$i_n(0) = 0$ – ток n -ого элемента;

$\Delta z(0) = \Delta z_0$ – взаимное осевое смещение n -ых элементов;

$u(0) = U_0$ – напряжение ЕНЭ с емкостью C ;

$V(0) = 0$ – скорость якоря с ПТ.

Поскольку взаимосвязанные процессы включают параметры, сильно изменяемые в процессе работы (скорость якоря V , взаимная индуктивность индуктора и якоря M_{12} , сопротивления индуктора R_1 и якоря R_2), то решения удобно представить в виде рекуррентных соотношений для последующего их использования в численном алгоритме.

Электрические процессы в ИДК можно описать системой уравнений

$$R_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_1(t) dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + V(t) i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z) = U_0; \quad (1)$$

$$R_2 i_2(t) + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + i_1(t) V(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z) = 0. \quad (2)$$

Данная система (1) и (2) после ряда преобразований приводится к одному дифференциальному уравнению

$$a_3 \frac{d^3 i_1}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + a_1 \frac{di_1}{dt} + a_0 i_1 = 0, \quad (3)$$

где $a_3 = \nu$; $a_2 = \chi - 2M_{12}V \frac{dM_{12}}{dz}$;

$$a_1 = R_1 R_2 + \frac{L_2}{C} - V^2 \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2; \quad a_0 = \frac{R_2}{C};$$

$$v = L_1 L_2 - M^2; \quad \chi = R_1 L_2 + L_1 R_2.$$

Если дискриминант характеристического уравнения (3) меньше нуля, все корни действительны и решение для токов представляется в следующем рекуррентном виде [4]

$$\begin{aligned} i_n(t_{k+1}) = & \left[1 - \frac{V^2}{R_1 R_2} \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right]^{-1} \left\{ \left[i_n(t_k) - \frac{i_m(t_k) V^2}{R_1 R_2} \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] \times \right. \\ & \times (\alpha_1 x_2 x_3 + \alpha_2 x_1 x_3 + \alpha_3 x_1 x_2) + \left(\Omega_n - \frac{V \Omega_m}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) \times \\ & \times [\alpha_1 (x_2 + x_3) + \alpha_2 (x_1 + x_3) + \alpha_3 (x_1 + x_2)] + \\ & \left. + \left(\Lambda_n - \frac{V \Lambda_m}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \right\} \delta^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

где $n=1, 2$ при $m=2, 1$;

$$\begin{aligned} \delta &= x_1 x_2 (x_2 - x_1) + x_1 x_3 (x_1 - x_3) + x_2 x_3 (x_3 - x_2); \\ \alpha_1 &= (x_3 - x_2) \exp(x_1 \Delta t); \quad \alpha_2 = (x_1 - x_3) \exp(x_2 \Delta t); \\ \alpha_3 &= (x_2 - x_1) \exp(x_3 \Delta t); \quad \Omega_n = B_n + \frac{B_m V}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz}; \end{aligned}$$

$$\Lambda_n = E_n + \frac{E_m V}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz}; \quad \gamma_1 = L_2; \quad \gamma_2 = -M_{12};$$

$$\begin{aligned} B_n = & v^{-1} \left[i_n(t_k) \left(M_{12} V \frac{dM_{12}}{dz} - R_n L_m \right) + i_m(t_k) \times \right. \\ & \left. \times \left(R_m M_{12} - K_m V \frac{dM_{12}}{dz} \right) - \gamma_k u_c(t_k) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_1 = & v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[R_1 \left(R_2 M_{12}^2 + R_1 L_2^2 - \frac{L_2 v}{C} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - M_{12} V \frac{dM_{12}}{dz} (\chi + 2R_1 L_2) + V^2 (L_1 L_2 + M_{12}^2) \right] \times \right. \\ & \left. \times \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right\} + i_2(t_k) \left[V \frac{dM_{12}}{dz} (L_2 \chi + 2R_2 M_{12}^2) - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -M_{12}R_2\chi - V^2M_{12}L_2\left(\frac{dM_{12}}{dz}\right)^2 + u_c(t_k) \times \\
& \times \left(R_2M_{12}^2 + L_2^2R_1 - 2L_2VM_{12}\frac{dM_{12}}{dz} \right) \Bigg\}; \\
E_2 = v^{-2} & \left\{ i_1(t_k) \left[M_{12} \left(\frac{v}{C} - R_1\chi \right) + V \frac{dM_{12}}{dz} \times \right. \right. \\
& \times \left. \left. \left(2R_1M_{12}^2 + L_1\chi \right) - 2L_1M_{12}V^2 \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \times \right. \\
& \times \left. \left[R_2 \left(R_1M_{12}^2 + R_2L_1^2 \right) - M_{12}V \left(2L_1R_2 + \chi \right) \frac{dM_{12}}{dz} + \right. \right. \\
& + V^2 \left. \left. \left(L_1L_2 + M_{12}^2 \right) \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \left[V^2 \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \left(L_1L_2 + \right. \right. \right. \\
& + M_{12}^2 \left. \left. \left. + R_2 \left(R_1M_{12}^2 + R_2L_1^2 \right) - M_{12}V \frac{dM_{12}}{dz} \left(2L_1R_2 + \chi \right) \right] + \right. \\
& \left. \left. + u_c(t_k) \left[V \left(L_1L_2 + M_{12}^2 \right) \frac{dM_{12}}{dz} - M_{12}\chi \right] \right\}.
\end{aligned}$$

Если дискриминант характеристического уравнения (3) больше нуля, то один из его корней действителен $x_1 = d$, а два других – комплексно сопряженные $x_{2,3} = f \pm jr$, и решение для токов приобретает вид

$$i_n(t_{k+1}) = \left(\xi_n - \frac{\xi_m V}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) / \left[1 - \frac{V^2}{R_1 R_2} \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned}
\xi_n = r^{-1} & \left[r^2 + (f-d)^2 \right]^{-1} \langle r \cdot \exp(d\Delta t) \rangle \left[(r^2 + f^2) \Theta_n - \right. \\
& - 2\Omega_n f + \Lambda_n \left. \right] + \exp(f\Delta t) \left\{ \sin(r\Delta t) \left[d(f^2 - r^2 - df) \Theta_n + \right. \right. \\
& + \left. \left. \left(r^2 + d^2 - f^2 \right) \Omega_n + (f-d)\Lambda_n \right] + r \cos(r\Delta t) \left[d\Theta_n \times \right. \right. \\
& \left. \left. \times (d-2f) + 2\Omega_n f - \Lambda_n \right] \right\}; \\
\Theta_n = i_n(t_k) & + \frac{V \cdot i_m(t_k)}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz}.
\end{aligned}$$

Величину перемещения якоря можно представить в виде рекуррентного соотношения [8]:

$$\Delta Z(t_{k+1}) = \Delta Z(t_k) + V(t_k)\Delta t + \vartheta \cdot \Delta t^2 / (m_1 + m_2), \quad (6)$$

где $V(t_{k+1}) = V(t_k) + \vartheta \cdot \Delta t / (m_1 + m_2)$ – скорость якоря;

$\vartheta = i_1(t_k)i_2(t_k) \frac{dM_{12}}{dz}(z) - g(m_1 + m_2)$; m_1, m_2 – масса якоря и ПТ, соответственно;

$\Delta Z(t)$ – величина перемещения; g – ускорение свободного падения.

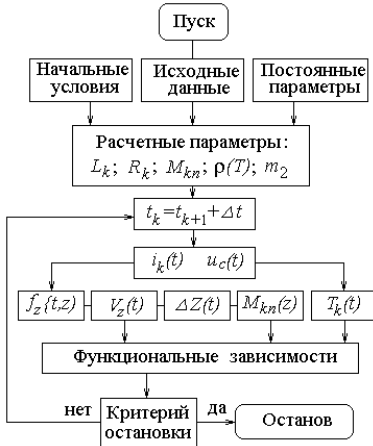


Рис. 3. Расчетный алгоритм ИДК.

Значения индуктивности n -го активного элемента L_n определяется через векторный потенциал магнитного поля [9], а значение взаимоиндуктивности между активными элементами определяется по методу разложения в ряд Тейлора [10] на каждом временном шаге. На рис.3 представлен расчетный алгоритм параметров и характеристик ИДК, на основании которого разработана компьютерная программа, моделирующая электромеханические процессы катапульты с параметрами, представленными в табл.1.

Таблица 1 – Основные параметры ИДК

Параметр	Величина
Внешний диаметр индуктора и якоря, мм	55
Внутренний диаметр индуктора, мм	5
Высота индуктора, мм	5
Внутренний диаметр якоря, мм	1
Высота якоря (базового), мм	2,0
Число витков индуктора, шт	24
Сечение витка индуктора, мм ²	1,8×2,4
Масса пробного тела, кг	0,12
Напряжение ЕНЭ, В	600

Для возбуждения индуктора использована электронная схема (рис. 2, б), обеспечивающая начальный однополупериодный импульс отталкивания якоря и повторный однополупериодный импульс элек-

тродинамического торможения падающего якоря путем подачи управляющего импульса на тиристор VS. В качестве управляющего воздействия для ИДК, обеспечивающего различную высоту подбрасывания якоря с ПТ, используем дискретное изменение емкости ЕНЭ.

3. Результаты математического моделирования. На рис. 4 представлены электромеханические характеристики ИДК, полученные при различных емкостях ЕНЭ, при перемещении якоря с ПТ в вакуумной камере при отсутствии трения. Для рассматриваемой катапульты фазовый сдвиг между разрядным в индукторе и индуцированным в якоря токами практически отсутствует, что задается частотой колебательного контура возбуждения. С ростом емкости ЕНЭ возрастает величина и длительность токовых импульсов (рис.4,а), что обуславливает увеличение импульса силы, действующего от индуктора на ускоряемый якорь

$$F_{12} = \int f_z(t, z) dt . \quad (7)$$

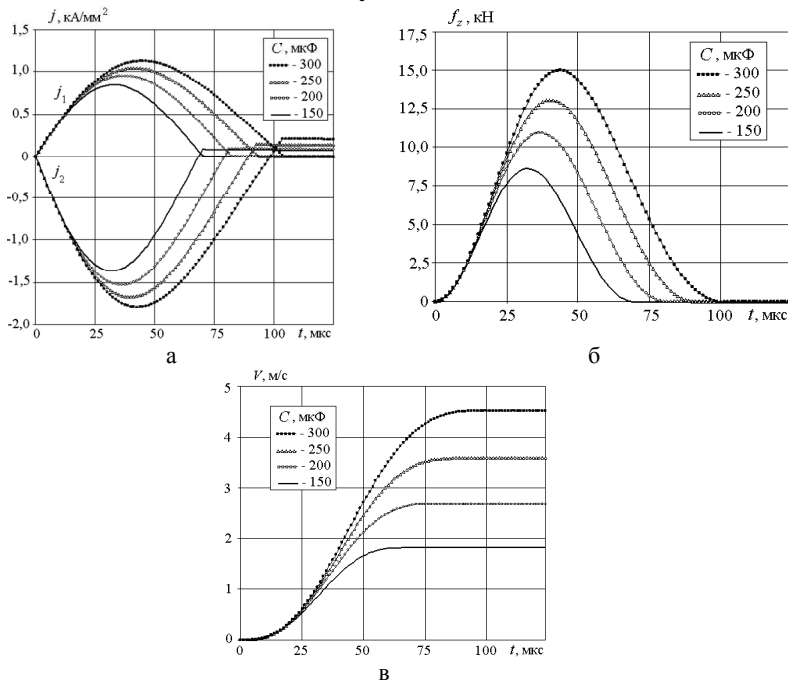


Рис. 4. Плотности тока индуктора j_1 и якоря j_2 (а), аксиальные силы f_z (б) и скорости якоря V (в) ИДК, при возбуждении индуктора от ЕНЭ различной емкости.

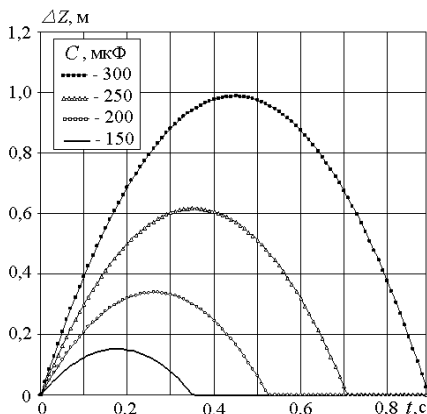


Рис. 5. Вертикальное перемещение якоря при возбуждении индуктора от ЕНЭ различной емкости.

Вследствие указанного изменения аксиальной силы происходит рост скорости якоря (рис. 4,в). При двукратном (с 150 до 300 мкФ) увеличении емкости ЕНЭ, а значит и его энергии $W = 0,5 \cdot CU_0^2$ происходит более существенный рост скорости (в 2,5 раз). Высота подбрасывания якоря с ПТ вследствие такого изменения скорости и аксиальной силы меняется в 6,5 раз с 151,8 до 987,4 мм (рис. 5). При этом в 2,5 раза возрастает и время движения якоря, что важно для электронной регистрирующей аппаратуры баллистического гравиметра.

Повысить эффективность ИДК можно путем уменьшения массы дискового якоря за счет его высоты (толщины) h_2 . При уменьшении высоты якоря с 2,0 до 1,2 мм ток в индукторе практически не меняется, в то время как в якоря плотность тока в импульсе существенно возрастает (рис. 6,а). Одним из факторов, обуславливающих это, является увеличение исходного коэффициента магнитной связи между индуктором и якорем $k_{12}(0) = M_{12}(0)L_1^{-0,5}L_2^{-0,5}$. В результате возрастает амплитуда и уменьшается длительность силового импульса (рис. 6,б). Но такой силовой импульс и уменьшенная масса якоря приводят к возрастанию высоты подбрасывания с 339 мм до 408 мм (рис. 6,в).

Таким образом, происходит повышение эффективности ИДК и снижение его материалоемкости.

Выводы. Предложено новая концепция катапульты баллистического гравиметра, основанной на индукционно-динамическом отталивании якоря от неподвижного индуктора за счет магнитного поля.

Разработана математическая модель индукционно-динамической катапульты, основанная на численно-аналитическом подходе при учете взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и механических процессов и соответствующих нелинейных параметров.

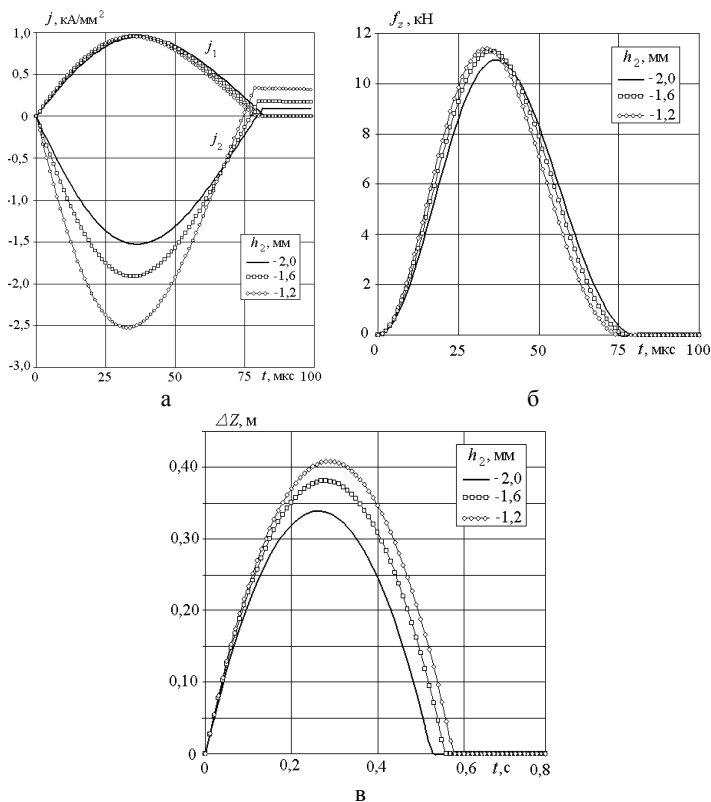


Рис. 6. Плотности ток индуктора j_1 и якоря j_2 (а), аксиальные силы f_z (б) и скорости якоря V (в) ИДУ при различной высоте якоря.

Получены электромеханические характеристики ИДК, высота подбрасывания пробного тела, у которого регулируется емкостью импульсного источника. Показано, что путем уменьшения высоты электропроводящего якоря можно повысить эффективность катапульты.

Список литературы: 1. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. – М.: Наука, 1983. – 356 с. 2. Грабовская Л.А., Занимонский Е.М., Костин А.Ф. и др. Оценка случайных погрешностей баллистического гравиметра // Работы по исследованию баллистических гравиметров: Сб. научн. тр. – Л.: НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева". – 1988. – С. 27-34. 3. Коронкевич В.П., Арнаутов Г.П., Стусь Ю.Ф. Абсолютный лазерный баллистический гравиметр // Препринт ИАиЭ СО АН СССР. – Новосибирск. – 1982. – № 196. – 37 с. 4. Болюх В.Ф., Данько В.Г.

Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. — Харків: НТУ "ХПІ". — 2006. — 260 с. **5.** *Татмишевский К.В., Козлов С.А.* Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // *Авиакосмическое приборостроение.* — 2005. — № 12. — С. 52-57. **6.** *Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А.* Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // *Авиационно – космическая техника и технология.* — 2007. — № 11 (47). — С. 109-117. **7.** *Тюткин В.А.* Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // *Электротехника.* — 2002. — № 11. — С. 24-28. **8.** *Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С.* Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя // *Техн. электродинамика.* Тем. выпуск: Проблемы сучасної електротехніки. — 2006. — Ч. 2. — С. 65-70. **9.** Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ / *М.Г. Александрова, А.Н. Белянин, В. Брюкнер* и др. / Под ред. Л.В. Данилова, Е.С. Филиппова. — М.: Радио и связь, 1983. — 344 с. **10.** *Алиевский Б.Л., Октябрьский А.М., Орлов В.Л.* Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек. — М.: Изд-во МАИ, 1999. — 320 с.



Болюх Володимир Федорович, професор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера за фахом "Кріогенна техніка" в 1979 р., дисертації кандидата і доктора технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1987 і 2003 рр. Професор кафедри "Загальна електротехніка" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2004 р. Наукові інтереси пов'язані з проблемами лінійних електромеханічних перетворювачів, кріогенних і надпровідникових електромеханічних пристроїв.

Тел: (0572) 63-76-19, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua



Вінніченко Олександр Іванович, захистив диплом інженера в 1981 р. в Харківському політехнічному інституті за фахом фізика металів. Провідний інженер ННЦ "Інститут метрології" м. Харків. Наукові інтереси пов'язані балістичними гравіметрами та еталонами прискорення вільного падіння.

Тел.: (057) 704-97-48, e-mail: vinn96@yandex.ua

*Поступила в редколлегию 26.01.2011
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*