

УДК 621.313:536.2.24:539.2

*В. Ф. БОЛЮХ*, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харків

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО  
УСТРОЙСТВА В РАБОЧЕМ ЦИКЛЕ "ОТТАЛКИВАНИЕ-  
ТОРМОЖЕНИЕ"**

Pushing away and braking processes in the core of inductive-dynamic device are analyzed at their following during of one running cycle. The core height and speed decrease are determined as functions of capacitor store parameters and distance between core and inductor of the device.

Розглянуті процеси відштовхування та гальмування якоря в індукційно-динамічному пристрої, які протікають послідовно в єдиному робочому циклі. Визначені значення висоти підкидання та зниження швидкості зіткнення якоря з індуктором в залежності від параметрів ємнісного накопичувача енергії та відстані між падаючим якорем та індуктором.

Рассмотрены процессы отталкивания и торможения якоря в индукционно-динамическом устройстве, которые протекают последовательно в едином рабочем цикле. Установлены значения высоты подбрасывания и снижения скорости соударения якоря с индуктором в зависимости от параметров емкостного накопителя энергии и расстояния между падающим якорем и индуктором.

**Введение.** Индукционно-динамические устройства (ИДУ) применяется во многих технических системах для ускорения массивных объектов до высоких скоростей, деформации металлов, обеспечения высокого быстродействия, создания ударных нагрузок и др. [1-5]. В ИДУ неподвижный индуктор, возбуждаемый, как правило, от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), посредством импульсного магнитного поля наводит токи в электропроводящем якоре, который под действием электродинамических сил вместе с исполнительным элементом (ИЭ) отталкивается от индуктора.

**Анализ литературы.** Помимо отталкивания в ряде технических систем существует задача бесконтактного торможения якоря относительно индуктора для уменьшения механических деформаций соударяемых элементов, снижения акустического шума, повышения надежности и рабочего ресурса [6, 7]. Задача отталкивания и последующего торможения якоря возникает, например, в индукционно-динамическом

двигателе циклического действия, у которого якорь, совершает возвратно-поступательное движение вместе с ударным ИЭ [3, 7]. В баллистическом лазерном гравиметре с симметричной схемой измерения ускорения свободного падения осуществляется вертикальное подбрасывание и последующее свободное падение ИЭ, выполненного в виде оптического отражателя, который взаимодействует с лазерным интерферометром [8, 9]. Применение демпфирующих элементов, расположенных между соударяющимися элементами системы, не всегда целесообразно и возможно. Поскольку процессы отталкивания и торможения якоря протекают последовательно с небольшой временной задержкой и с использованием одного и того же неподвижного индуктора, то электронная система возбуждения должна формировать необходимые импульсы тока возбуждения индуктора, не требующие дополнительной зарядки ЕНЭ в течение короткого рабочего цикла. Однако характер протекающих процессов и параметры ИДУ, обеспечивающие наиболее эффективную работу цикла "отталкивание – торможение", не исследованы.

**Цель исследования.** Определение характера протекающих процессов и электромеханических параметров ИДУ, при которых реализуется наиболее эффективный рабочий цикл "отталкивание – торможение" якоря вместе с массивным исполнительным элементом, движущихся вдоль вертикальной оси.

**Схема ИДУ.** Рассмотрим ИДУ, предназначенное для баллистического гравиметра и состоящее из неподвижного индуктора 1, выполненного в виде многовитковой обмотки дисковой формы, и электропроводящего якоря 2, выполненного в виде плоского медного диска, который перемещается вдоль вертикальной оси  $z$  (рис. 1) [10]. Якорь взаимосвязан с ИЭ 3, а индуктор – с неподвижным основанием 4. В начале рабочего цикла при отталкивании якорь устанавливается на индукторе, т.е. расстояние между ними  $Z_0=0$ . При торможении якоря, движущегося вниз со скоростью  $V_0$ , возбуждение индуктора осуществляется в момент, когда  $Z_0>0$ .

Для создания двух последовательных полярных импульсов возбуждения индуктора в едином рабочем

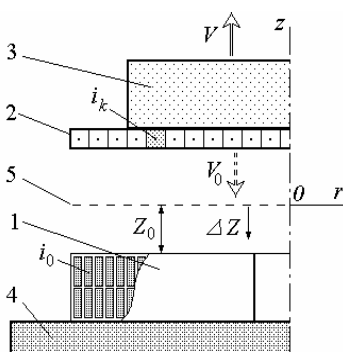


Рис. 1. Схема ИДУ.

цикле используется электронная схема, содержащая ЕНЭ  $C$ , блок питания БП, предназначенный для зарядки ЕНЭ до необходимого напряжения  $U_0$ , и блок управления БУ, обеспечивающий последовательное открывание тиристоров  $VS_0$ ,  $VS_1$ ,  $VS_2$  короткими импульсами (рис. 2). Основные параметры ИДУ представлены в таблице.

Таблица – Параметры ИДУ

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора, мм	$D_{ex1}$	100
Внутренний диаметр индуктора, мм	$D_{in1}$	10
Высота индуктора, мм	$H_1$	10
Внешний диаметр якоря, мм	$D_{ex2}$	100
Внутренний диаметр якоря, мм	$D_{in2}$	1
Высота якоря, мм	$H_2$	2
Количество витков индуктора, шт	$N_1$	42
Сечение провода индуктора, мм <sup>2</sup>	$a \cdot b$	1,8·4,8
Масса ИЭ, кг	$P$	0,12
Энергия ЕНЭ, Дж	$W_0$	120

**Математическая модель ИДУ.** При работе ИДУ, в диске электропроводящего якоря возникает существенная неравномерность распределения индуцированного тока. Для учета этого в математической модели якорь представляется совокупностью элементарных короткозамкнутых  $k$  контуров, равномерно распределенных по поверхности диска, а многовитковый индуктор – первичным контуром, подсоединенным к ЕНЭ (рис. 2). В таком случае электрические процессы ИДУ можно описать системой дифференциальных уравнений [7]:

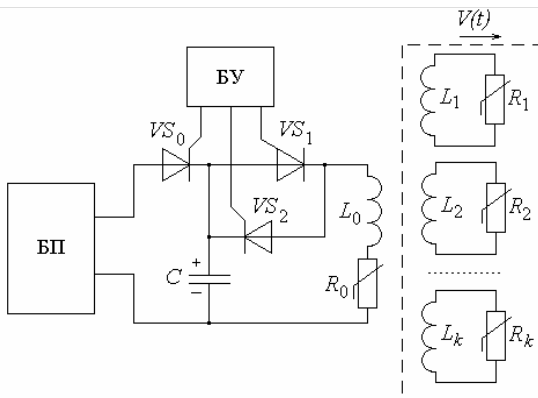


Рис. 2. Схема замещения ИДУ.

темой дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{aligned}
& R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots \\
& \dots + M_{0k}(z) \frac{di_k}{dt} + V(t) \left( i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0; \\
& R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \times \\
& \times \frac{di_k}{dt} + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0; \quad (1) \\
& R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times \\
& \times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,
\end{aligned}$$

где  $i_0, L_0, R_0$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление индуктора;  $i_k, L_k, R_k$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого  $k$ -го контура якоря, перемещающегося со скоростью  $V(t)$  вдоль оси  $z$  относительно индуктора;  $M_{kp}$  – взаимоиндуктивность между соответствующими токовыми контурами ( $k \neq p$ );  $T_k$  – температура  $k$ -го токового контура;  $T_0$  – температура индуктора;  $C, U_0$  – соответственно емкость и напряжение заряда ЕНЭ.

На якорь в  $n$ -ый момент времени действует аксиальная электродинамическая сила

$$f_z(z, t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z). \quad (2)$$

При учете силы тяжести и аэродинамического сопротивления воздуха скорость и перемещение якоря с ИЭ можно представить в виде рекуррентных соотношений:

$$\begin{aligned}
V(t_{n+1}) = & V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{P + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - \\
& - g(P + m_2) - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t_n); \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta Z(t_{n+1}) = & \Delta Z(t_n) + V(t_n) \Delta t + \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} \times \\
& \times \left( \frac{t_{n+1} - t_n}{P + m_2} \right)^2 i_0(t_n) - g(P + m_2) - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t_n), \quad (4)
\end{aligned}$$

где  $m_2, P$  – массы якоря и ИЭ соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\gamma_a$  – плотность воздуха;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления.

При близком взаимном расположении якоря и индуктора токи и действующие на них электродинамические силы в значительной степени определяются точностью расчета величин само- и взаимной индукции. Исходя из этого, в математической модели все токовые элементы разбиваются на ряд элементарных катушек с малыми размерами поперечного сечения относительно диаметра. Тогда индуктивность  $p$ -го и его взаимная индуктивность с  $q$ -м элементом представляются в виде

$$L_p = \sum_{n=1}^N L_n + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N M_{nm}, \quad m \neq n; \quad M_{pq} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=N+1}^{N+P} M_{nm}, \quad (4)$$

где  $N, P$  – число элементарных катушек прямоугольного сечения, на которые разбиваются  $p$ -й и  $q$ -й элементы;  $L_n$  – собственная индуктивность  $n$ -ой элементарной катушки;  $M_{nm}$  – взаимная индуктивность  $n$ -ой и  $m$ -ой элементарных катушек.

Для определения температуры активного элемента (индуктора или якоря), изменяемой в течение рабочего процесса и распределенной по сечению, используется нелинейное уравнение теплопроводности

$$c^*(T) \cdot \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_w(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + j^2(t) \cdot k_z \cdot \rho(T), \quad (5)$$

где  $c^*(T)$  – усредненная удельная теплоемкость активного элемента;  $\gamma$  – усредненная плотность активного элемента;  $j(t)$  – плотность тока;  $\lambda_w(T)$  – коэффициент теплопроводности активного элемента;  $k_z$  – коэффициент заполнения индуктора;  $\rho(T)$  – удельное сопротивление активного элемента.

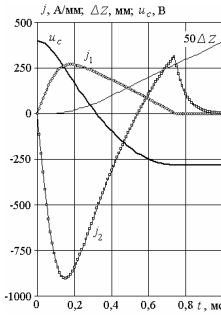
Система уравнений (1)-(5), описывающая нелинейные электромеханические и тепловые процессы с изменяемыми параметрами, рассчитывается в пакете *Matlab*.

Эффективность ИДУ в рабочем цикле "отталкивание – торможение" при вертикальном перемещении якоря можно оценить:

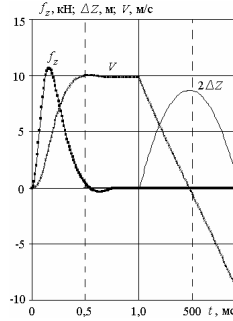
– максимальной высотой  $h$  подбрасывания якоря на этапе отталкивания;

– минимальной скоростью  $V_1$  якоря относительно индуктора на этапе торможения.

**Этап отталкивания ИДУ.** Рассмотрим электромеханические процессы ИДУ при использовании ЕНЭ с емкостью  $C=1500$  мкФ и напряжением  $U_0=400$  В (рис. 3). Отталкивание якоря относительно индуктора осуществляется путем подачи сигнала с БУ на тиристор  $VS_1$  (рис. 2). На этапе подбрасывания якоря вертикально вверх из-за изменяемой магнитной связи плотность тока индуктора  $j_1$  и усредненная плотность тока якоря  $j_2$  меняются не гармонически.



а



б

Рис. 3. Характеристики ИДУ: а – для индуктора; б – для якоря.

Максимальная плотность тока в индукторе  $j_{1m}=271,6 \text{ A/mm}^2$  достигается при 0,18 мс, а длительность импульса составляет 0,75 мс. Максимум плотности тока в якоре существенно выше и составляет  $j_{2m}=905 \text{ A/mm}^2$ , причем длительность первого полупериода короче и равна 0,54 мс. После этого изменяется полярность индуцированного тока, а при прекращении импульса тока в индукторе – происходит быстрое затухание тока якоря. При этом напряжение ЕНЭ  $u_c$  меняет полярность с  $U_0=-400 \text{ В}$  до  $U_1=-280,3 \text{ В}$ . Во время прохождения токовых импульсов на якорь действует электродинамическая сила, максимальная величина которой в момент 0,16 мс составляет  $f_{zm}=10,6 \text{ кН}$ . Под действием импульса силы

$$F_z = \int_0^t f_z(z, t) dt, \quad (6)$$

равного  $F_z = 2,57 \text{ Нс}$  якорь приобретает максимальную скорость 10,7 м/с, поднимаясь на высоту  $h=4,34 \text{ м}$ .

Высота подбрасывания  $h$  якоря зависит от параметров ЕНЭ. При неизменной энергии и увеличении емкости  $C$  в интервале 0,5-2,5 мФ наблюдается плавное уменьшение как зарядного напряжения ЕНЭ  $U_0$ , так и напряжения перезарядки  $U_1$ , возникающее после первого токового импульса (рис. 4). При величине емкости  $C=1,75 \text{ мФ}$  наблюдается максимальная высота подбрасывания якоря  $h=4,34$  и скорости падения якоря  $V_1=-9,69 \text{ м/с}$  на индуктор. Полученные значения скорости  $V_1$  и напряжения  $U_1$  являются исходными для расчета момента тормозного импульса в зависимости от положения якоря относительно индуктора  $\Delta Z_0$ .

**Этап торможения ИДУ.** Торможение падающего вертикально вниз якоря с ИЭ осуществляется путем подачи сигнала с БУ на тиристор

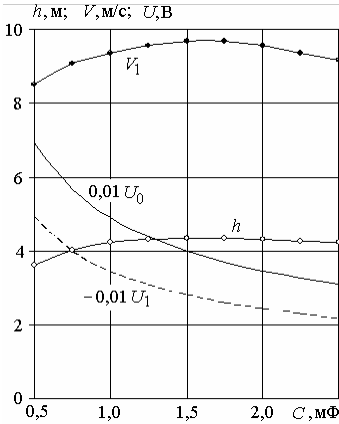
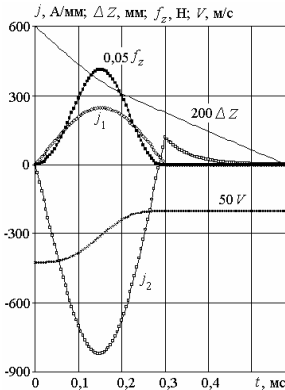


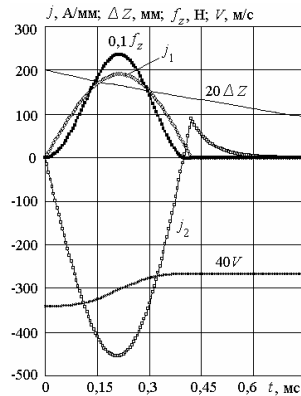
Рис. 4. Зависимости параметров ЕНЭ от емкости  $C$ .

$VS_2$  в момент нахождения якоря относительно индуктора на расстоянии  $\Delta Z_0$ . В зависимости от величины емкости  $C$  ЕНЭ существенно меняются электромагнитные и зависящие от них механические показатели. На рис. 5 представлены электромеханические характеристики ИДУ, у которого ЕНЭ имеет  $C=500$  мкФ. При  $\Delta Z_0=3$  мм длительность импульса тока индуктора составляет 0,3 мс, достигая плотности тока  $j_{1m}=246,8$  А/мм<sup>2</sup> (рис. 5, а). Усредненная плотность тока в якоре достигает  $j_{2m}=821,7$  А/мм<sup>2</sup>, а электродинамическая сила торможения  $f_{zm}=8,235$  кН. Через 0,58 мс соударяется с индуктором, снижая скорость с 8,52 м/с до 4,04 м/с. При этом импульс тормозной силы составляет  $F_z=1,165$  Нс, что почти в 2 раза меньше аналогичного толкающего импульса.

При  $\Delta Z_0=10$  мм из-за более слабой магнитной связи длительность импульса тока в индукторе возрастает до 0,425 мс, а максимальная плотность тока снижается до  $j_{1m}=191,3$  А/мм<sup>2</sup> (рис. 5, б).



а



б

Рис. 5. Характеристики ИДУ при  $C=500$  мкФ.

Усредненная плотность тока в якоре уменьшается до  $j_{2m}=455,6$  А/мм<sup>2</sup>, а электродинамическая сила торможения до  $f_{zm}=2,355$  кН. Через 0,75 мс якорь приближается на расстояние 4,67 мм к индуктору, снижая скорость до 6,69 м/с. При этом импульс тормозной силы составляет  $F_z=0,478$  Нс, что почти в 5 раз меньше аналогичного толкающего импульса.

На рис. 6 представлены электромеханические характеристики ИДУ, у которого ЕНЭ имеет  $C=1500$  мкФ. При  $\Delta Z_0=3$  мм по сравнению с рассмотренным выше вариантом длительность импульса тока индуктора возрастает до 0,46 мс, а максимальная плотность тока снижается до  $j_{1m}=240,0$  А/мм<sup>2</sup> (рис. 6, а). Усредненная плотность тока в якоре также снижается  $j_{2m}=807,3$  А/мм<sup>2</sup>, но электродинамическая сила торможения несколько увеличивается, достигая  $f_{zm}=8,297$  кН. Через 0,48 мс якорь соударяется с индуктором, снижая скорость с 9,68 м/с до 3,25 м/с. При этом импульс силы возрастает до  $F_z=1,671$  Нс.

При  $\Delta Z_0=10$  мм длительность импульса тока индуктора возрастает до 0,675 мс, а максимальная плотность тока снижается до  $j_{1m}=186,7$  А/мм<sup>2</sup> (рис. 6, б). Усредненная плотность тока в якоре достигает  $j_{2m}=452,9$  А/мм<sup>2</sup>, а электродинамическая сила торможения  $f_{zm}=2,492$  кН. Через 1,0 мс якорь приближается к индуктору на расстояние  $\Delta Z=2,3$  мм, снижая скорость до 6,67 м/с. При этом импульс тормозной силы составляет  $F_z=0,784$  Нс, что выше, чем в варианте с  $C=500$  мкФ.

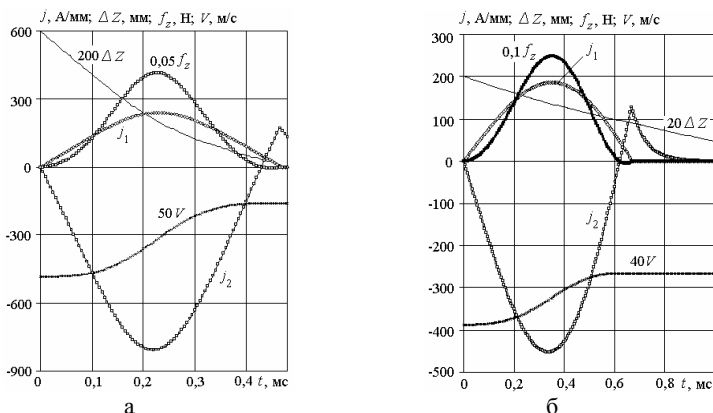


Рис. 6. Характеристики ИДУ при  $C=1500$  мкФ.

На рис. 7 представлены электромеханические характеристики ИДУ, у которого емкость ЕНЭ повышена до  $C=2500$  мкФ. При  $\Delta Z_0=3$



мм по сравнению с рассмотренным выше вариантом длительность импульса тока индуктора возрастает а максимальная плотность тока снижается до  $j_{1m}=227,1 \text{ А/мм}^2$  (рис. 7, а). При этом снижаются как усредненная плотность тока в якоре  $j_{2m}=758,4 \text{ А/мм}^2$ , так и электродинамическая сила торможения  $f_{zm}=7,482 \text{ кН}$ . Однако импульс тормозной силы за счет увеличения длительности протекания возрастает до  $F_z=1,778 \text{ Нс}$ . Через 0,46 мс якорь соударяется с индуктором, снижая скорость с 9,37 м/с до 2,54 м/с.

При  $\Delta Z_0=10 \text{ мм}$  длительность импульса тока индуктора возрастает до 0,84 мс, а максимальная плотность тока снижается до  $j_{1m}=181,2 \text{ А/мм}^2$  (рис. 7, б).

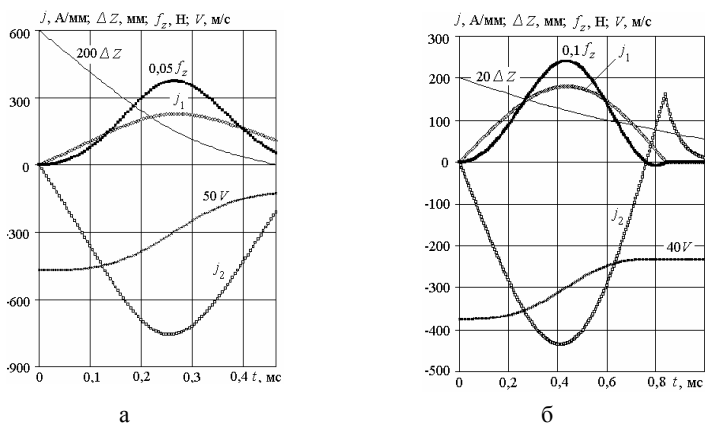


Рис. 7. Характеристики ИДУ при  $C=2500 \text{ мкФ}$ .

Усредненная плотность тока в якоре достигает лишь  $j_{2m}=435,3 \text{ А/мм}^2$ , а электродинамическая сила торможения  $f_{zm}=2,406 \text{ кН}$ . Через 1,0 мс якорь приближается к индуктору на расстояние  $\Delta Z=2,7 \text{ мм}$ , снижая скорость до 5,84 м/с. При этом импульс тормозной силы составляет  $F_z=0,92 \text{ Нс}$ , что выше, чем в варианте с  $C=1500 \text{ мкФ}$ .

Таким образом, эффективность электродинамического торможения существенно зависит как от параметров ЕНЭ, так и от расстояния  $\Delta Z_0$ , при котором возбуждается повторный тормозной импульс тока индуктора. На рис. 8 показаны относительные значения скорости якоря в зависимости от расстояния  $\Delta Z_0$  ( $V_1$  – скорость соударения якоря с индуктором при наличии тормозного импульса;  $V_0$  – скорость соударения с индуктором при отсутствии тормозного импульса). Как следует из представленных результатов, только при определенных значениях расстояния  $\Delta Z_0=2 \dots 3 \text{ мм}$ , про-

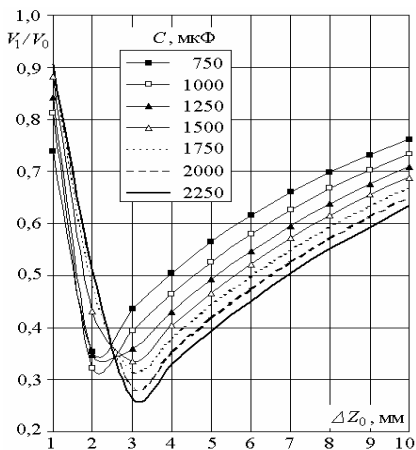


Рис. 8. Зависимость скорости якоря от расстояния при наличии тормозного импульса.

однако для этого надо выбирать  $\Delta Z_0=3,0-3,3$  мм. Если используется ЕНЭ с малыми емкостями, то надо выбирать  $\Delta Z_0=2,0-2,2$  мм.

**Выводы.** Рассмотрены процессы отталкивания и торможения якоря в ИДУ, которые протекают последовательно с небольшой временной задержкой в едином рабочем цикле. Указанный цикл реализуется с использованием электронной системы возбуждения, формирующей два полярных импульса тока индуктора, не требуя дополнительной зарядки ЕНЭ в течение короткого рабочего цикла. Определены параметры, обеспечивающие наиболее эффективную работу ИДУ, как на этапе отталкивания, так и на этапе торможения. Установлены основные зависимости высоты подбрасывания и снижения скорости соударения якоря с индуктором в зависимости от параметров ЕНЭ и расстояния между падающим якорем и индуктором.

**Список литературы:** 1. Тамышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 12. – С. 52-57. 2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – № 3. – С. 44-52. 3. Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 24-28. 4. Карпухин В.Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития. – Самара: Изд.

исходит наиболее эффективное торможение якоря.

Если расстояние меньше указанного, то соударение происходит из-за превалирования механических над электродинамическими процессами. Если расстояние больше указанного, то

электродинамические процессы неэффективны из-за слабой магнитной связи между якорем и индуктором. При больших значениях емкостей ЕНЭ из рассматриваемого диапазона уменьшение скорости якоря происходит в большей степени,

учеб. лит. – 2007. – С. 99-103. **5.** *Наумов И.В., Болюх В.Ф., Бреславский Д.В.* Деформирование и разрушение пластин при нагружении цилиндрическим ударником // *Механика та машинобудування.* – 2010. – № 1. – С. 207-216. **6.** *Кильчевский Н.А.* Теория соударения твердых тел. – К.: Наукова думка. – 1989. – 247 с. **7.** *Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S.* High-efficiency impact electromechanical converter // *Russian electrical engineering.* – 2011. – Vol. 82, № 2. – P. 104-110. **8.** *Грушинский Н.П.* Основы гравиметрии. – М.: Наука, 1983. – 356 с. **9.** Патент України № 96904. МПК G01V7/14. Балістичний гравіметр з індукційно-динамічним приводом для симетричного способу вимірювань прискорення вільного падіння / Болюх В.Ф., Вінніченко О.І. – Заявка № 201103304. Заявл. 21.03.2011. – Надрук. 12.12.2011. Бюл. № 20. **10.** *Болюх В.Ф., Вінніченко О.І.* Удосконалення кінематичної схеми балістичного гравіметра за рахунок лінійного електромеханічного перетворювача // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2011. – № 2/7 (50). – С. 9-15.



**Болюх Владимир Федорович**, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте за специальностью электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 г. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с линейными электромеханическими преобразователями.

*Поступила в редколлегию 21.02.2012  
Рецензент д.т.н., проф. Лушков В.С.*