

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

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИМПУЛЬСНО-ИНДУКЦИОННОГО ОТТАЛКИВАНИЯ И ТОРМОЖЕНИЯ В РАБОЧЕМ ЦИКЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАПРАВЛЕННОЙ СИЛЫ**

Рассмотрена эффективность импульсно-индукционного отталкивания и торможения при вертикальном перемещении электропроводящего якоря с исполнительным элементом при помощи импульсов электродинамической силы без дополнительного заряда емкостного накопителя энергии в рабочем цикле. Показано, что с увеличением начального зазора между якорем и индуктором уменьшается высота подбрасывания, но улучшаются тормозные показатели.

**Ключевые слова:** импульсно-индукционного отталкивание и торможение, электродинамическая сила, емкостной накопитель энергии.

**Введение.** Во многих технических системах реализуется рабочий цикл с линейным перемещением исполнительного элемента (ИЭ) в прямом и обратном направлениях при воздействии однонаправленной силы. В качестве указанной силы может выступать сила тяжести при подбрасывании и последующем улавливании ИЭ, что реализуется в баллистическом лазерном гравиметре, сила возвратной пружины или сжатия упругой среды, что реализуется в линейном электродвигателе ударного действия и др. [1, 2]. Эти силы имеют единое направление в рабочем цикле, создавая противодействие при прямом ходе и обеспечивая усиливающее действие при обратном ходе ИЭ. В качестве привода возвратно поступательного действия эффективен индукционно-динамический двигатель (ИДД), который должен развивать максимальные механические показатели при прямом ходе якоря с ИЭ, а при обратном ходе – наибольшее демпфирование якоря относительно индуктора [3, 4].

**Анализ литературы.** ИДД используются во многих областях науки и техники для механической обработки поверхностей, деформации различных объектов, в качестве высокоскоростных линейных приводов циклического действия различных систем и др. [5-7]. Однако в основном рассматриваются электромеханические процессы при прямом ходе якоря с ИЭ при наличии внешней противодействующей силы, созданной, например, возвратной пружиной. Процессы при обратном ходе якоря протекают намного медленнее и возникают под действием противодействующей силы при отсутствии электромеханических

© В.Ф. Болюх, 2013

усилий. В таком случае вся энергия импульсного источника, например, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), расходуется при прямом ходе рабочего цикла. Однако не исследован вопрос о частичном использовании энергии ЕНЭ, как для прямого, так и обратного перемещения якоря с ИЭ, что позволило бы обеспечить демпфирование якоря относительно индуктора электродинамическими силами.

**Цель исследования.** Рассмотрим влияние начального зазора между якорем и индуктором на эффективность подбрасывания и торможения при вертикальном перемещении электропроводящего якоря с ИЭ при помощи импульсов электродинамической силы без дополнительного заряда ЕНЭ в рабочем цикле.

**Математическая модель импульсно-индукционного воздействия.** Расчетная и электрическая схемы импульсно-индукционного воздействия (ИИВ) между неподвижным индуктором, возбуждаемым от ЕНЭ, и коаксиально установленными электропроводящим якорем с ИЭ, которые вертикально перемещаются в поле силы тяжести, приведена на рис. 1 [8, 9].

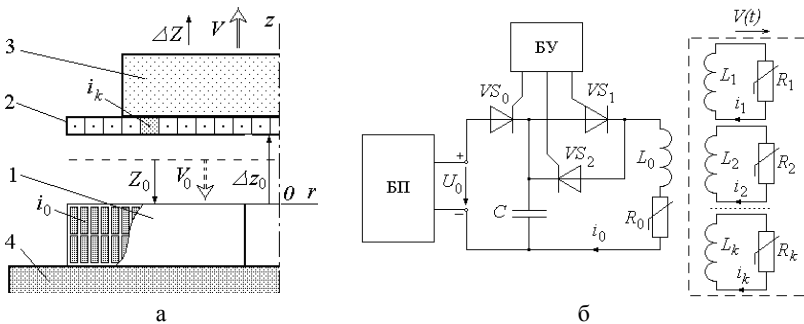


Рис. 1 – Схемы импульсно-индукционного воздействия:  
а – расчетная; б – электрическая.

Установка, реализующая ИИВ, содержит неподвижный многовитковый индуктор 1 и массивный (сплошной) медный якорь 2, который вместе с ИЭ 3 перемещается относительно основания 4 вдоль вертикальной оси  $z$ . В исходном положении якорь располагается относительно индуктора на расстоянии  $\Delta Z_0$ , при котором осуществляется возбуждение индуктора для создания первого электродинамического импульса для подбрасывания якоря с ИЭ вертикально вверх. В процессе торможения якоря, который падает вниз со скоростью  $V_0$  относи-

тельно индуктора, возбуждение последнего осуществляется в момент, когда расстояние между ними равно  $Z_0$  (рис. 2,а).

Для создания двух последовательных импульсов в едином рабочем цикле используется электронная схема, которая содержит блок питания БП, предназначенный для зарядки ЕНЭ  $C$  до напряжения  $U_0$ , и блок управления БУ. Последний, осуществляя последовательное открытие тиристоров  $VS_0, VS_1, VS_2$ , обеспечивает, соответственно, зарядку ЕНЭ, электродинамические импульсы подбрасывания и торможения якоря (рис. 1, б) [9].

Поскольку в массивном якоре возникает существенная неравномерность распределения индуцированного тока, то в математической модели он представляется совокупностью элементарных коаксиальных короткозамкнутых  $K$  контуров, равномерно распределенных по поверхности диска, а индуктор – первичным контуром возбуждения (рис. 1). Математическая модель учитывает изменяемую магнитную связь между якорем и индуктором, неравномерность распределения индуцированного тока в якоре и комплекс аксиальных сил, действующих на якорь. В таком случае электрические процессы в ИДК можно описать системой дифференциальных уравнений [8]:

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

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

Аксиальное перемещение якоря  $\Delta Z$  с ИЭ возникает под действием электродинамической силы:

$$F_z = \int_0^t f_z(t, z) dt, \quad (2)$$

где  $f_z(t, z) = i_0(t) \sum_{k=1}^K i_k(t) \frac{dM_{0k}}{dz}(z)$  – мгновенное значение силы.

Скорость  $V$  и перемещение  $\Delta Z$  якоря с ИЭ представляются в виде рекуррентного соотношения:

$$\begin{aligned} V(t_{n+1}) &= V(t_n) + \vartheta \cdot \Delta t / (P + m_2); \\ \Delta Z(t_{n+1}) &= \Delta Z(t_n) + V(t_n) \Delta t + \vartheta \cdot \Delta t^2 / (P + m_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\vartheta = i_0(t_n) \sum_n i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z) + (-1)^m g(P + m_2) - 0,125\pi\gamma_a\beta_a D_{ex2}^2 V^2(t_n),$$

$m_2, P$  – масса якоря и ИЭ соответственно;  $m=1$  при восходящей и  $m=2$  при нисходящей траекториях свободного движения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\gamma_a$  – плотность среды перемещения якоря и ИЭ;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Рассмотрим установку для реализации ИИВ, основные параметры которой представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры установки ИИВ.

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора, мм	$D_{ex1}$	80
Внутренний диаметр индуктора, мм	$D_{in1}$	4
Высота индуктора, мм	$H_1$	5
Внешний диаметр якоря, мм	$D_{ex2}$	80
Высота якоря, мм	$H_2$	2
Количество витков индуктора, шт	$N_1$	76
Сечение провода индуктора, мм <sup>2</sup>	$a \cdot b$	0,4×5,0
Масса ИЭ, кг	$P$	0,12
Напряжение ЕНЭ, В	$U_0$	310
Емкость ЕНЭ, мкФ	$C$	500

**Эффективность импульсно-индукционного отталкивания** будем оценивать максимальной высотой подбрасывания якоря с ИЭ  $h_m$ . В зависимости от величины начального зазора между якорем и индуктором  $\Delta z_0$  существенно меняется форма и величина токового импульса

индуктора, представленная на рис. 2,а в виде плотности тока  $j_1$ . Чем меньше величина  $\Delta z_0$ , тем короче токовый импульс, его величина возрастает и возникает раньше. Аналогичные утверждения справедливы и для усредненной по сечению плотности тока в якоре  $j_2$ . Однако импульс тока в якоре через определенное время изменяет полярность, и плавно затухает при отсутствии тока в индукторе. Вследствие этого изменяется и характер импульса электродинамической силы: с уменьшением начального зазора  $\Delta z_0$  величина силы возрастает и время, при котором реализуется максимум силы, уменьшается.

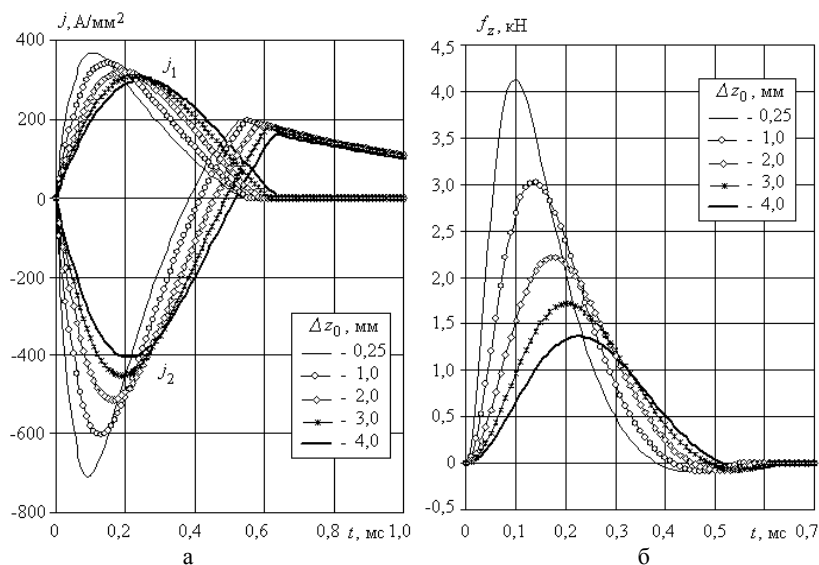


Рис. 2 – Электромеханические характеристики ИИВ:  
а – электрические; б – электродинамические силы.

После импульса отталкивания из-за изменения полярности тока якоря импульс электродинамической силы приобретает характер торможения, причем с уменьшением начального зазора  $\Delta z_0$  величина и продолжительность действия тормозной силы увеличиваются (рис. 2,б).

На рис. 3 показано начальное (рис. 3,а) и последующее (рис. 3,б) перемещение якоря с ИЭ  $\Delta Z$  относительно неподвижного индуктора. Из-за наличия силы тяжести после подбрасывания происходит падения якоря с ИЭ на индуктор. Чем меньше начальный зазор  $\Delta z_0$ , тем выше

высота подбрасывания якоря с ИЭ  $h_m$ . В табл. 2 представлены электромеханические параметры ИИВ на этапе отталкивания якоря. Таким образом, с уменьшением начального зазора  $\Delta z_0$  увеличивается высота подбрасывания якоря  $h_m$ , однако ухудшаются показатели, необходимые для этапа торможения: скорость падения  $V_0$  в момент соприкосновения с индуктором возрастает, а остаточное напряжение ЕНЭ  $U_{c1}$  уменьшается.

Таблица 2 – Электромеханические параметры ИИВ на этапе отталкивания.

$\Delta z_0$ , мм	$j_{1m}$ , А/мм <sup>2</sup>	$j_{2m}$ , А/мм <sup>2</sup>	$f_{zm}$ , кН	$F_z$ , Н·с	$U_{c1}$ , В	$h_m$ , м	$V_0$ , м/с
0,25	368,6	707,0	4,131	0,688	100,9	0,512	3,14
1,0	341,7	602,0	3,024	0,599	117,2	0,385	2,67
2,0	321,5	513,6	2,210	0,504	135,9	0,269	2,23
3,0	308,5	452,2	1,712	0,428	151,1	0,192	1,90
4,0	299,5	405,3	1,369	0,366	163,5	0,138	1,60

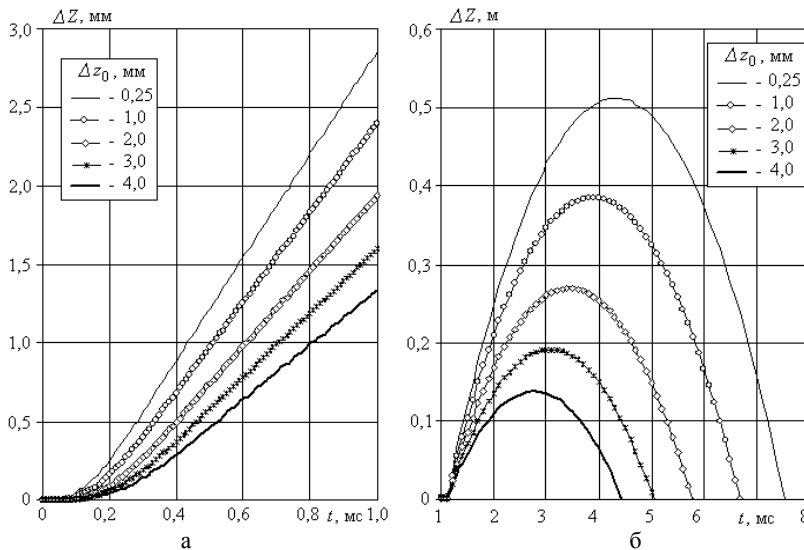


Рис. 3 – Перемещение якоря с ИЭ: а – начальное; б – последующее.

**Эффективность импульсно-индукционного торможения** будем оценивать величиной коэффициент торможения

$$K_T = W_{kin0} / W_{kin1} ,$$

где  $W_{kin0}$ ,  $W_{kin1}$  – соответственно кинетическая энергия падающих масс при отсутствии и наличии тормозного импульса в момент соприкосновения с индуктором.

Торможение падающего якоря с ИЭ осуществляется путем подачи сигнала с БУ на тиристор  $VS_2$  в момент нахождения якоря относительно индуктора на расстоянии  $Z_0$  (рис. 1,а). Эффективность импульсно-индукционного торможения зависит от расстояния  $Z_0$  между падающим якорем и индуктором, при котором начинается его повторное возбуждение (рис. 4). Чем меньше величина  $Z_0$  (минимальная 0,5 мм), тем сильнее уменьшается кинетическая энергия падающего якоря с ИЭ. Однако указанный эффект проявляется в большей степени, если величина начального зазора  $\Delta z_0$  при подбрасывании якоря с ИЭ была меньшей. Чем меньше начальный зазор  $\Delta z_0$  на этапе подбрасывания, тем сильнее падает величина коэффициента торможения в зависимости от расстояния  $Z_0$ .

На рис. 5 представлены зависимости аксиальной силы  $f_z$ , скорости  $V$  и перемещения  $\Delta Z$  падающего якоря с ИЭ, возникающие после подачи на индуктор повторного импульса в момент нахождения якоря относительно индуктора на расстоянии  $Z_0=0,5$  мм. Отметим, что указанные процессы имеют разную продолжительность до соприкосновения якоря с индуктором  $\Delta Z=0$  в зависимости от начального зазора  $\Delta z_0$  на этапе отталкивания. В табл. 3 представлены электромеханические параметры ИИВ на этапе торможения.

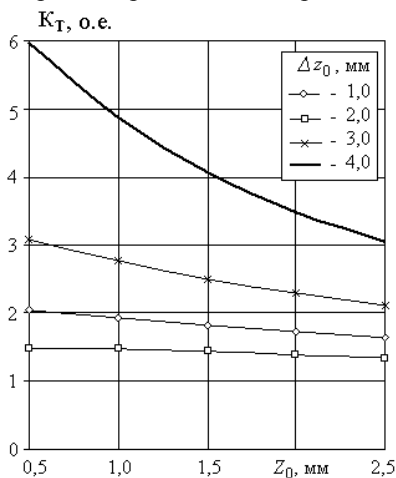


Рис. 4. Коэффициент торможения ИИВ.

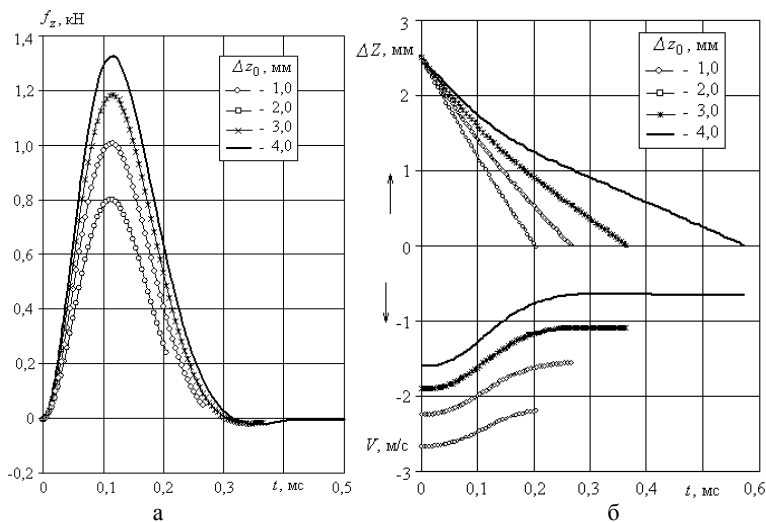


Рис. 5. Электромеханические характеристики ИИВ при торможении:  
а – аксиальная сила; б – скорость и перемещение.

Таблица 3 – Электромеханические параметры ИИВ на этапе торможения.

$\Delta z_0$ , мм	1,0			2,0			3,0			4,0		
$U_{c1}$ , В	117,2			135,9			151,1			163,5		
$V_0$ , м/с	-2,67			-2,23			-1,90			-1,60		
$Z_0$ , мм	0,5	1,5	2,5	0,5	1,5	2,5	0,5	1,5	2,5	0,5	1,5	2,5
$j_{1m}$ , А/мм <sup>2</sup>	161,1	142,5	131,7	181,5	161,7	150,2	197,7	176,9	164,9	210,1	188,8	176,5
$j_{2m}$ , А/мм <sup>2</sup>	311,4	251,1	213,7	348,9	282,6	241,3	378,2	307,4	263,1	400,1	326,1	279,7
$f_{zm}$ , кН	0,799	0,525	0,397	1,006	0,666	0,485	1,183	789,3	0,577	1,326	0,889	0,653
$F_z$ , Н·с	0,10	0,094	0,08	0,141	0,123	0,105	0,172	0,149	0,127	0,199	0,171	0,146
$V_1$ , м/с	-2,2	-2,23	-2,3	-1,56	-1,65	-1,74	-1,08	-1,2	-1,3	0,66	-0,79	-0,91
$K_T$ , о.е.	0,676	0,697	0,74	2,04	1,82	1,645	3,077	2,504	2,123	5,956	4,062	3,045

**Выводы.** Таким образом, с увеличением начального зазора  $\Delta Z_0$  между якорем и индуктором уменьшается высота подбрасывания  $h_m$ , но улучшаются тормозные показатели импульсно-индукционного воздействия. При этом расстояние  $Z_0$  между падающим якорем и индуктором, при котором начинается его возбуждение, должно быть около 0,5 мм.



**Список литературы:** 1. *Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L. et al.* Improved performance of linear induction launchers // *IEEE Trans. Magnetics.* – 2005. – Vol. – 41, № 1. – P. 171-175. 2. *Бунин И.А., Калиш Е.Н., Носов Д.А., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф.* Полевой абсолютный лазерный баллистический гравиметр // *Автоматрия.* – 2010. – Т. 46, № 5. – С. 94-102. 3. *Болух В.Ф., Щукин И.С.* Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа // *Электротехника і електромеханіка.* – 2010. – № 5. – С. 5-11. 4. Пат. України № 50561. Спосіб роботи електромеханічного ударного пристрою індукційного типу / *Болух В.Ф., Рассоха М.О.* – Заявлено 11.01.2010. – Надрук. 10.06.2010. Бюл. № 11. 5. *McNab I.R.* Launch to space with an electromagnetic railgun // *IEEE Trans. Magnetics.* – 2003. – Vol. 39, № 1. – P. 295-304. 6. *Карпухин В.Ф.* Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // *Труды междунар. науч.техн. конф. Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития.* – Самара: Изд. учеб. лит. – 2007. – С. 99-103. 7. *Чемерис В.Т., Болух В.Ф., Маисталир В.В.* О возможности применения в минометах калибра 82 мм индукционного способа метания мин // *Артиллерийское и стрелковое вооружение.* – 2010. – № 2. – С. 50-58. 8. *Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С.* Высокоэффективный электромеханический преобразователь ударного действия // *Электротехника.* – 2011. – № 2. – С. 46-53. 9. Пат. України № 96904. МПК G01V7/14. Балістичний гравіметр з індукційно-динамічним приводом для симетричного способу вимірювань прискорення вільного падіння / *Болух В.Ф., Вінніченко О.І.* – Заявка № 201103304. – Заявл. 21.03.2011. – Надрук. 12.12.2011. Бюл. № 20.

*Поступила в редколлегию 6.06.2013*



**Болух 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 імпульсної дії, кріогенних і надпровідникових електромеханічних пристроїв.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

**Эффективность импульсно-индукционного отталкивания и торможения в рабочем цикле при воздействии направленной силы / Болух В.Ф.** // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 35 (1008). – С. 83-92. *Бібліогр.: 9 назв.*

Розглянута ефективність імпульсно-індукційного відштовхування та гальмування при вертикальному переміщенні електропровідного якоря з виконавчим елементом за допомогою імпульсів електродинамічної сили без додаткового заряду ємнісного накопичувача у робочому циклі. Показано, що зі збільшенням початкового зазору між якорем та індуктором зменшується висота підкидання, але поліпшуються гальмівні показники.

**Ключові слова:** імпульсно-індукційного відштовхування і гальмування, електродинамічна сила, ємнісний накопичувач енергії.

Efficiency of impulse-induction repulsion and braking at vertical movement of conductive armature with actuating element by using pulses of electrodynamic force without additional charge of a capacitor energy storage in an operating cycle is considered. It is shown that at the increase of the initial gap between armature and inductor, the height of tossing up decreases but braking characteristics are improved.

**Keywords:** pulse induction and inhibition of repulsion, electrodynamic force, capacitive energy storage.