

В.Ф. Болух, К.В. Корытченко, А.Г. Кочерга

## ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОЕ УСКОРЕНИЕ МАССИВНЫХ ОБЪЕКТОВ, ОБЛАДАЮЩИХ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ

*Запропонована концепція додаткового прискорення масивних об'єктів в процесі їх руху за допомогою безконтактно-го індукційно-динамічного прискорювача. В масивний об'єкт, що розганяється, введено мідне кільце, яке встановлено на його зовнішній поверхні. Розроблена математична модель та розрахунковий алгоритм, які враховують швидкоплинні електричні, магнітні, механічні та теплові процеси. Визначено вплив параметрів ємнісного накопичувача, початкової швидкості та зміщення якоря відносно індуктора на ефективність електромеханічного перетворення енергії в індукційно-динамічному прискорювачі.*

*Предложена концепция дополнительного ускорения массивных объектов в процессе их движения при помощи бесконтактного индукционно-динамического ускорителя. В разгоняемый массивный объект введено медное кольцо, установленное на его внешней поверхности. Разработана математическая модель и расчетный алгоритм, учитывающие быстротекающие электрические, магнитные, механические и тепловые процессы. Установлено влияние параметров емкостного накопителя, начальной скорости и смещения якоря относительно индуктора на эффективность электромеханического преобразования энергии в индукционно-динамическом ускорителе.*

### ВВЕДЕНИЕ

Индукционно-динамический ускоритель (ИДУ), как правило, используется для разгона массивных объектов из неподвижного состояния до высокой скорости [1-3]. Устройства, использующие индукционно-динамический способ ускорения довольно хорошо исследованы и применяются во многих областях науки, техники, безопасности и обороны [4-7]. ИДУ позволяет бесконтактно за малое время разогнать до высокой скорости объект с установленным на нем электропроводящим якорем при помощи импульсного магнитного поля, создаваемого неподвижным индуктором. Для возбуждения индуктора используется импульсный источник, как правило, емкостной накопитель энергии.

Для ряда технических объектов, обеспечивающих разгон массивных объектов до высокой скорости при помощи, например взрывчатых веществ, энергии сжатия газа или пружины и прочее, существует необходимость дополнительного повышения кинетической энергии [2, 4]. Такая задача стоит перед различными пусковыми установками, катапультами, ударными и испытательными системами, что позволит модернизировать существующие и создать новые высоко кинетические конструкции [8, 9]. При этом мало исследован вопрос о возможностях ИДУ обеспечивать дополнительное повышение кинетической энергии для предварительно ускоренного массивного объекта, который уже имеет высокую скорость.

Целью статьи является исследование индукционно-динамического ускорителя проходного типа, обеспечивающего повышение скорости предварительно ускоренного массивного объекта с электропроводящим якорем.

### КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА

Конструктивная схема комбинированного ускорителя массивных объектов представлена на рис. 1. Индуктор 1, расположенный в корпусе 2, закреплен на конце направляющей трубы 3, второй конец которой присоединен к неподвижному основанию 4. На внешней поверхности массивного объекта 5 закреплен

электропроводящий якорь 6, представляющий собой медное кольцо.

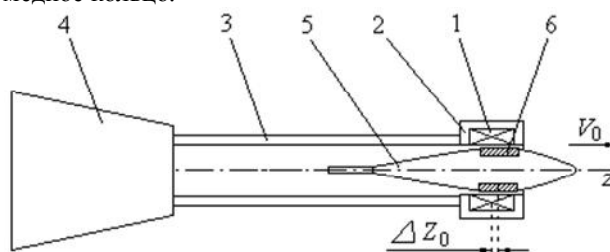


Рис. 1

Объект 5 предварительно ускоряется до скорости  $V_0$  иным способом, например при помощи энергии взрыва, механической энергии упругого сжатия и др. В момент, когда центральная плоскость индуктора смещена относительно центральной плоскости якоря на расстояние  $\Delta Z_0$ , происходит возбуждение индуктора при помощи емкостного накопителя энергии. Возникающий при этом ток в индукторе возбуждает импульсное магнитное поле, которое наводит в якорю вихревые токи, вследствие чего возникает электродинамическая сила, толкающая якорь с массивным объектом в сторону его движения. При этом возникает вопрос о выборе параметров емкостного накопителя, начального смещения  $\Delta Z_0$ , и предварительной скорости  $V_0$  массивного объекта с якорем. Для исследования выберем параметры индукционно-динамического ускорителя, используемые для миномета калибра 82 мм (табл. 1) [10].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При работе ИДУ в цилиндрическом якорю возникает существенная неравномерность распределения индуцированного тока как по длине, так и по глубине. Для учета этого явления в математической модели якорь представляется совокупностью элементарных короткозамкнутых контуров, равномерно распределенных по его объему, а многовитковый индуктор – первичным контуром, подсоединенным к емкостному накопителю энергии.

Таблица 1

Параметр	Значение
Внешний диаметр индуктора $D_{ex1}$ , мм	104
Внутренний диаметр индуктора $D_{in1}$ , мм	84
Аксиальная высота индуктора $H_1$ , мм	100
Внешний диаметр якоря $D_{ex2}$ , мм	82
Внутренний диаметр якоря $D_{in2}$ , мм	70
Аксиальная высота якоря $H_2$ , мм	70
Количество витков индуктора $N$ , шт	100
Сечение витка индуктора $a \times b$ , мм <sup>2</sup>	1,8×4,8
Масса якоря и массивного элемента, кг	4,5

В таком случае электрические процессы в ИДУ можно описать системой дифференциальных уравнений [11]:

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

где  $i_0$ ,  $L_0$ ,  $R_0$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление неподвижного 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;  $C$ ,  $U_0$  – соответственно емкость и напряжение емкостного накопителя энергии.

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

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

Скорость якоря с массивным объектом можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - \\ - K_T \cdot V(t_n) - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n),$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – масса якоря и массивного объекта, соответственно;  $K_T$  – коэффициент динамического сопротивления;  $\gamma_a$  – плотность воздуха;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{2m}$  – наружный диаметр массивного элемента.

Работу ИДУ оценим при помощи критерия эффективности  $\eta$ :

$$\eta(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot (V^2(t) - V_0^2)}{C \cdot U_0^2} \cdot 100\%.$$

На основании полученных соотношений был разработан расчетный алгоритм, учитывающий взаимную связь между электрическими ( $i_k$ ,  $i_0$ ,  $u_C$ ), электродинамическими ( $f_z$ ), скоростными ( $V$ ) параметрами, перемещениями ( $\Delta Z$ ), магнитными ( $M_{kp}$ ), тепловыми ( $T_k$ ) и функциональными параметрами, изменяемыми во времени на каждом временном интервале (рис. 2).



Рис. 2

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При выборе параметров ИДУ важно согласовать скорость протекания электромагнитных и механических процессов. Так, если скорость протекания электромагнитных процессов в индукторе, определяемая его индуктивностью и емкостью  $C$  импульсного источника энергии, превышает скорость протекания механических процессов, то возникает отрицательная (тормозная) электродинамическая сила и эффективность электрохимического преобразования энергии невысока. На рис. 3 представлены плотности тока в индукторе  $j_1$ , усредненная по сечению плотность тока в якоря  $j_2$  и электродинамическая сила  $f_z$  при параметрах емкостного накопителя  $U_0 = 8$  кВ,  $C = 6000$  мкФ, начальной скорости  $V_0 = 50$  м/с и смещении  $\Delta Z_0$ .

Из-за индукционного воздействия импульса якорного тока на кривой тока индуктора на начальном участке возникает характерный всплеск. Поскольку электрические процессы в якоря протекают значительно быстрее, чем в индукторе, то в нем происходит изменение полярности при неизменной полярности тока индуктора, что и обуславливает возникновение тормозной электродинамической силы.

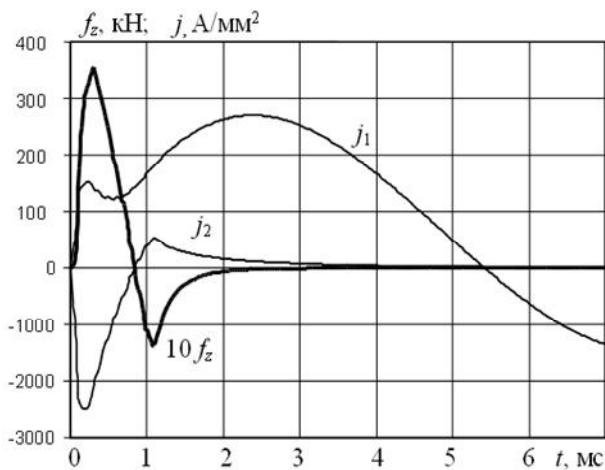


Рис. 3

Для согласования скорости электромеханических процессов ИДУ в качестве базовых выбраны следующие параметры емкостного накопителя  $U_0 = 20 \text{ кВ}$ ,  $C = 100 \text{ мкФ}$ , при которых реализуется практически одинаковая энергия с рассмотренным выше вариантом. На рис. 4 представлены плотности тока в индукторе  $j_1$ , усредненная по сечению плотность тока в якоре  $j_2$ , электродинамическая сила  $f_z$ , перемещение  $\Delta Z$  и кинетическая энергия  $W_{kin}$  якоря с массивным элементом.

Как видно, в согласованном режиме токи в индукторе и якоре изменяются в противофазе (рис. 4,а), что обуславливает практически полное уничтожение тормозной электродинамической силы (рис. 4,б). При этом необходимо отметить наличие первого короткого (0,35 мс) силового импульса значительной величины (300 кН) и наличие второго протяженного (1,0 мс) импульса уменьшенной величины (150 кН).

Возникающее при работе ИДУ перемещение якоря  $\Delta Z$  имеет ускоренный характер. За это время кинетическая энергия массивного объекта и якоря повышается почти в 3 раза (рис. 4,в). При этом как первый, так и второй силовые импульсы обеспечивают возрастание механической энергии.

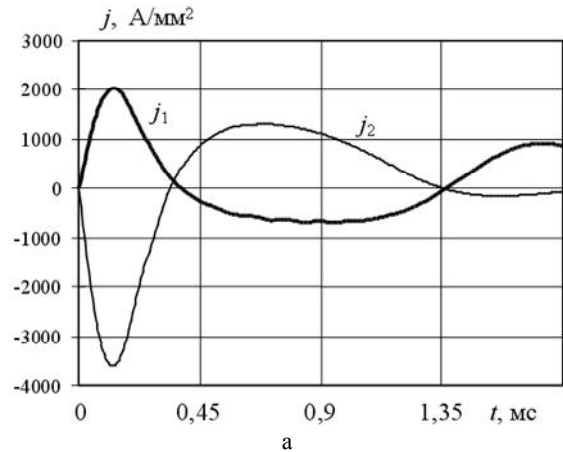
При неизменной емкости  $C = 100 \text{ мкФ}$  импульсного источника повышение зарядного напряжения  $U_0$  оказывает положительное влияние как на кинетическую энергию  $W_{kin}$ , так и на эффективность работы ИДУ  $\eta$  (рис. 5). С увеличением зарядного напряжения в 1,5 раза эффективность электромеханического преобразования возрастает в 1,6 раз, а кинетическая энергия – в 2,3 раза. Однако при этом увеличиваются и потери энергии в индукторе (индекс 1) и якоре (индекс 2)

$$W_n(t) = \int i_n^2(t) R_n(T_n) dt, \quad n = 1, 2. .$$

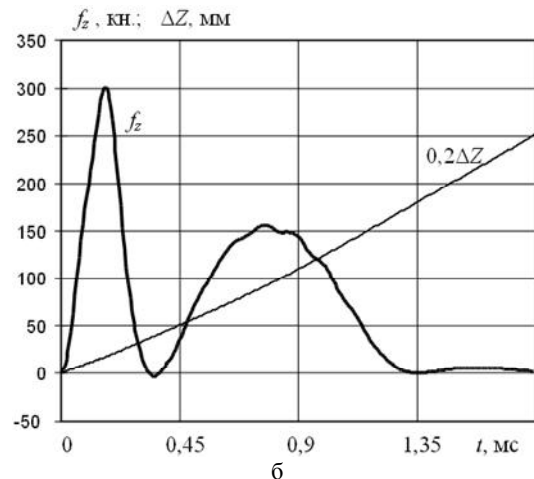
В результате чего превышение температуры индуктора возрастает с 5,5 до 12,4 °С, а якоря – с 14,9 до 31,4 °С. Указанные превышения температур не являются критическими при работе ИДУ с большой скважностью следования импульсов.

Если напряжение импульсного источника неизменно  $U_0 = 20 \text{ кВ}$ , а его емкость  $C$  изменяется в пределах 50...200 мкФ, то энергетические процессы но-

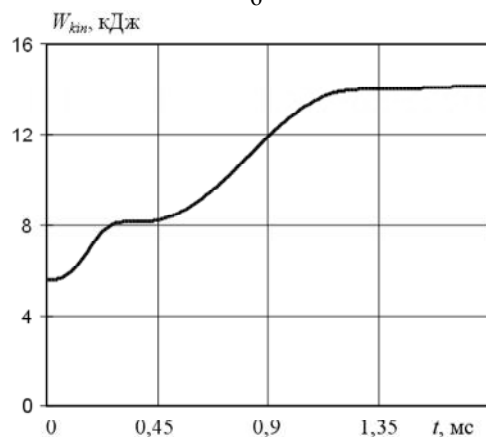
сят более сложный характер (рис. 6). Кинетическая энергия возрастает  $W_{kin}$  лишь до определенной величины емкости, в дальнейшем практически оставаясь неизменной. При этом потери энергии в индукторе  $W_1$  и якоре  $W_2$  резко возрастают с увеличением емкости  $C$ . В результате этого наибольшая эффективность электромеханического преобразования реализуется при определенном значении емкости импульсного источника  $C=125 \text{ мкФ}$ .



а



б



в

Рис. 4

Однако и при увеличении одного из параметров импульсного источника и неизменном втором происходит увеличение его энергии, что не всегда целесообразно. Интерес представляет варьирование этих параметров при сохранении неизменной энергии емкостного накопителя

$W_C = 0,5CU_0^2 = 20$  кДж (рис. 7). При таком изменении параметров емкостного накопителя выделяемая энергия в индукторе  $W_1$  и якоре  $W_2$  практически не меняется, лишь незначительно перераспределяясь между собой. Однако при определенном значении зарядного напряжения  $U_0 \approx 19$  кВ наблюдается максимум кинетической энергии  $W_{kin}$  и эффективности  $\eta$  электрохимического процесса. Это объясняется тем, что именно при таких параметрах импульсного источника скорость протекания электромагнитных и механических процессов совпадает.

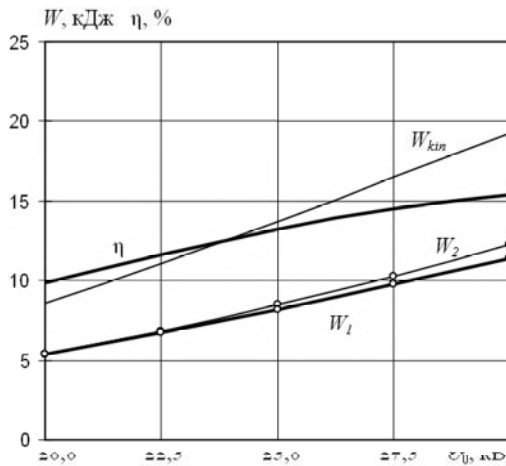


Рис. 5

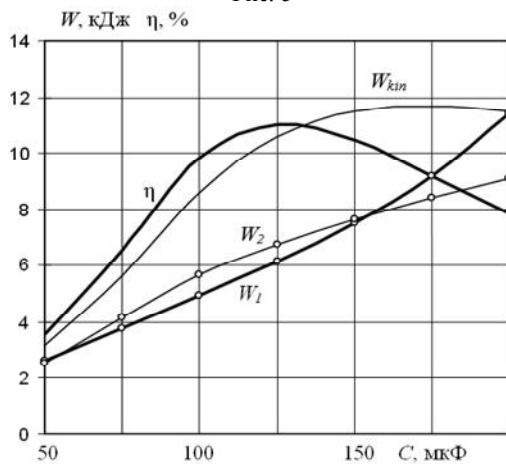


Рис. 6

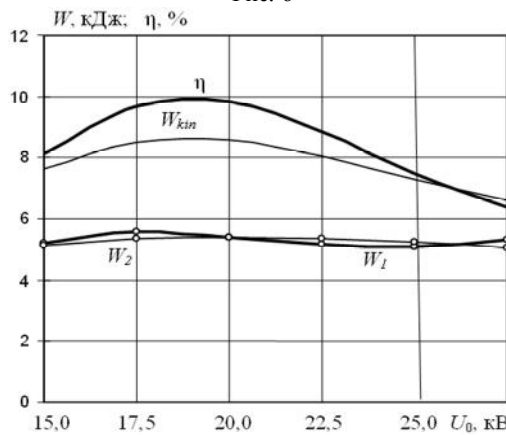


Рис. 7

Одним из факторов, влияющим на работу ИДУ является момент включения индуктора в зависимости от смещения центральных плоскостей цилиндрическо-

го якоря относительно индуктора  $\Delta Z_0$ . Дело в том, что на величины индуцированных токов в якоре наиболее сильно влияет взаимоиנדуктивность его с индуктором  $M_{0k}(z)$ , а на величину тока – градиент взаимной индукции  $dM_{0k}/dz(z)$ .

На рис. 8 построены указанные зависимости, откуда видно, что максимум взаимоиנדуктивности  $M_{0k}(z)$  возникает при отсутствии смещения между якром и индуктором  $\Delta Z_0 = 0$ , а максимум градиента взаимной индукции  $dM_{0k}/dz(z)$  – при  $\Delta Z_0 = 50$  мм. Очевидно, что именно в диапазоне  $\Delta Z_0 \in 0 \dots 50$  мм будет наибольшая эффективность работы ИДУ.

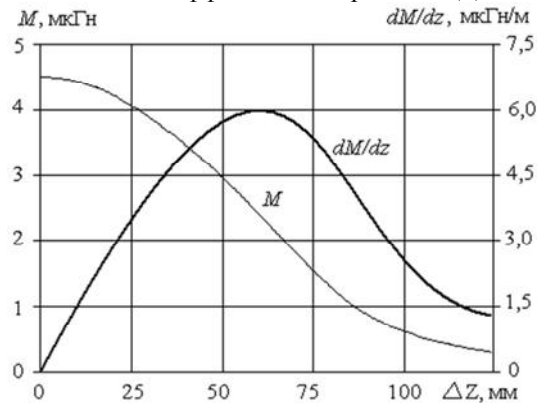


Рис. 8

На рис. 9 представлены основные показатели ИДУ, откуда следует, для начальной скорости  $V_0 = 50$  м/с наиболее эффективно начальное смещение  $\Delta Z_0 = 6 \dots 8$  мм. Заметим, что с увеличением  $\Delta Z_0$  энергия потерь в якоре  $W_2$  уменьшается, что объясняется уменьшением величины индуцированных токов.

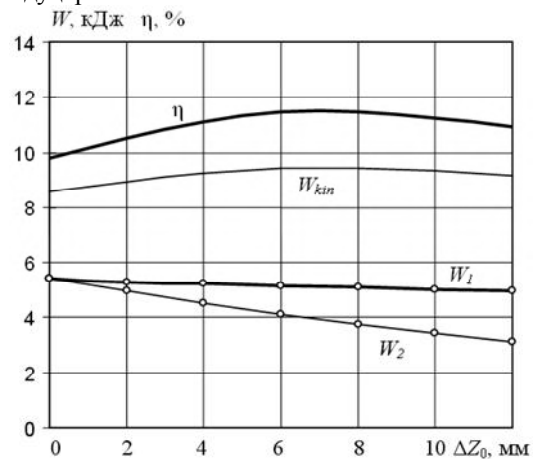


Рис. 9

Но указанная область эффективности начального смещения  $\Delta Z_0$  существенно зависит от начальной скорости якоря и массивного объекта  $V_0$  (рис. 10). Так при  $\Delta Z_0 = 0$  наибольшая эффективность электрохимического процесса возникает при  $V_0 \approx 42$  м/с. При меньших скоростях значительная часть энергии тратится на нагрев индуктора и якоря, а при больших скоростях – рост кинетической энергии практически прекращается, поскольку механические процессы развиваются быстрее, чем электрические.

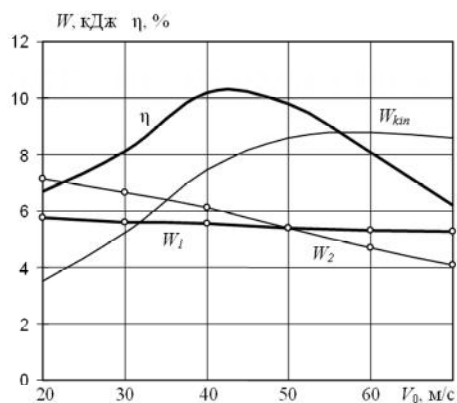


Рис. 10

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что задача индукционно-динамического ускорения массивных объектов, обладающих начальной скоростью, характеризуется многопараметричностью. В дальнейшем для нахождения наиболее эффективного решения необходимо использовать оптимизационные алгоритмы, оперирующие совокупностью многих параметров [11].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена концепция дополнительного ускорения массивных объектов в процессе их движения при помощи бесконтактного индукционно-динамического ускорителя. Для этого в разгоняемый массивный объект предлагается включить медное кольцо, установленное на его внешней поверхности.

Разработана математическая модель и расчетный алгоритм, учитывающие быстропротекающие и зависящие друг от друга электрические, магнитные, механические и тепловые процессы с учетом изменяемых функциональных параметров.

Установлено влияние параметров емкостного накопителя, начальной скорости и смещения якоря относительно индуктора на эффективность электромеханического преобразования энергии в индукционно-динамическом ускорителе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Balicki, Z. Zabar, L. Birenbaum et al. Improved performance of linear induction launchers // IEEE Trans. Magnetics. – vol. 41. – № 1. – 2005. – pp. 171-175.
2. McNab I.R. Launch to space with an electromagnetic railgun // IEEE Trans. Magnetics. – vol. 39. – 2003. – № 1. – pp. 295-304.
3. Карпунин В.Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // Труды междунауч. науч. техн. конф. "Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития". – Самара: Изд. учеб. лит. – 2007. – С. 99-103.
4. Lipinski R.S., Beard S., Bover J. Space application for contactless coilguns // IEEE Trans. Magnetics. – vol. 29. – 1993. – № 1. – pp. 691-695.
5. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – № 3. – С. 44-52.
6. Татмышевский К.В., Семенович М.Л., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные установки для проведения ударных испытаний взрывательных устройств бое-

припасов и средств бронезащиты // Известия РАН. – 2005. – №4. – С. 22-31.

7. Татмышевский К.В., Марычев С.Н., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности // Современные технологии безопасности. – 2005. – № 4. – С. 8-11.

8. Чемерис В.Т., Машталир В.В., Гусак Ю.А. Простой алгоритм для расчета индукционного ускорения электропроводящих тел в метательном устройстве // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – № 4. – С. 40-49.

9. Коритченко К.В., Кочерга А.Г., Болух В.Ф. Система электродинамического прискорення бронебійних снарядів до танкової гармати // Збірка тез доповідей 3 Всеукраїнської наук.-техн. конф. "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ". – Львів, 13-14 квітня 2010. – Київ: Академія сухопутних військ. – С. 86.

10. Чемерис В.Т., Болух В.Ф., Машталир В.В. О возможности применения в минометах калибра 82 мм индукционного способа метания мин // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2010. – № 2. – С. 50-58.

11. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукин И.С. Синтез параметров высокоэффективного электромеханического преобразователя ударного действия // Технічна електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 2. – С. 63-68.

Поступила 25.09.2010

*Болух Владимир Федорович, д.т.н., проф.*

професор кафедри загальної електротехніки НТУ "ХП"

*Коритченко Костянтин Володимирович, к.т.н., с.н.с.*

начальник науково-дослідної лабораторії Гвардійського ордену Червоної зірки факультету військової підготовки НТУ "ХП", підполковник

*Кочерга Анатолій Григорович*

заступник начальника Гвардійського ордену Червоної зірки факультету військової підготовки НТУ "ХП", начальник штабу, полковник

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел. (057) 7076427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

*Bolyukh V.F., Korytchenko K.V., Kocherga A.G.*

### Induction-dynamic acceleration of massive objects with initial velocity.

A concept of further acceleration of massive objects during their movement by means of a contactless induction-dynamic accelerator has been proposed. A copper ring is incorporated into a massive object being accelerated and installed on its outer surface. A mathematical model and a calculation algorithm which take into account fast electrical, magnetic, mechanical and thermal processes are developed. Influence of capacitive storage parameters, initial velocity and displacement of the armature about the inductor on efficiency of electromechanical conversion of energy in the induction-dynamic accelerator has been revealed.

**Key words – contactless induction-dynamic accelerator, acceleration of massive objects, mathematical model, calculation algorithm, electrical, magnetic, mechanical and thermal processes.**