

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Болюх В.Ф., Олексенко С.В.

ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДОУСКОРИТЕЛЬ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ТИПА

Линейный электромеханический ускоритель индукционно-динамического типа применяется для высокоскоростного разгона массивных исполнительных элементов (ИЭ) на коротком активном участке во многих областях науки и техники [1]. Для авиационной, ракетно-космической и оборонной техники разрабатываются пусковые устройства и ускорители различных массивных объектов [6,7]. ЛЭУ используются для ударно-конденсаторной сварки, импульсной штамповки, клепально-сборочных работ, для электродинамической сепарации и измельчения порошков, для магнитно-импульсного уплотнения порошков входящих в композитные составы и др. [8–10]. Для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты используются научно-технологические пусковые установки [11–12]. Высокоскоростные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в защитных электрических аппаратах, в топливной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и т.д. [13–15]. Линейный электромеханический ускоритель применяются для очистки вагонов, трюмов, фильтров и иных емкостей от остатков продуктов и налипших материалов, в противообледенительных системах самолетов, ЛЭП и иных ответственных объектов [16,17]. Перспективными сферами использования указанного ускорителя являются устройства дополнительного ускорения подвижных объектов, защита помещений и ответственных объектов от нежелательного в них проникновения, уничтожение информации на цифровых носителях при несанкционированном доступе, баллистическая гравиметрия и др.

Линейный электромеханический ускоритель обеспечивают непосредственное преобразование энергии импульсного источника в кинетическую энергию с линейным перемещением ИЭ. В качестве импульсного источника целесообразно использовать емкостной накопитель энергии (ЕНЭ) с электронной схемой, формирующей апериодический импульс тока в каждом индукторе отдельно (индуктор шунтирован обратным диодом), что позволяет применять электролитические конденсаторы с высокими удельными параметрами.

Во всех указанных выше применениях линейный электромеханический ускоритель обеспечивает разгон ИЭ от нулевой начальной скорости. Перспективным вариантом применения является дополнительное ускорение массивного ИЭ, имеющего начальную скорость. Такой линейный электромеханический доускоритель (ЛЭДУ) может обеспечивать дополнительный разгон ИЭ, который предварительно ускорен иными неэлектрическими способами (механическим, химическим, гидравлическим, пневматическим и др.). Конструкция такого ЛЭДУ должна иметь коаксиальную конфигурацию с возможностью пролета якоря с ИЭ внутри его индуктора.

Целью работы является анализ эффективности ЛЭДУ пролетной конфигурации для дополнительного ускорения якоря и ИЭ, имеющих начальную скорость.

Математическая модель ИДП

Для расчетов рабочих процессов ЛЭДУ проведено компьютерное моделирование в программном пакете *COMSOL Multiphysics 4.4* (рис. 1), основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов. Указанные преобразователи имеют осевую симметрию, что позволяет использовать *2D*-осиметрия математическую модель.

Электромагнитный процесс описан системой дифференциальных уравнений для каждого узла в системе координат (rz) в зависимости от комплексного векторного магнитного потенциала $\bar{A} = (\bar{A}_r, \bar{A}_{phi}, \bar{A}_z)$.

для немагнитных материалов:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot r^{-1} \cdot \bar{B}) - \sigma \cdot \bar{v} \times \bar{B} = \bar{J}_e; \quad (1)$$

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A}; \quad (2)$$

для ферромагнетиков:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \bar{H} - \sigma \cdot \bar{v} \times \bar{B} = \bar{J}_e; \quad (3)$$

$$\bar{H} = f(|\bar{B}|), \quad (4)$$

где σ – электрическая проводимость, адаптивно учитывающая текущую температуру материала; μ_0, μ_r – абсолютная и относительная магнитная проницаемость; \bar{v} – скорость узла; \bar{J}_e – плотность тока в узле.

Ток i в многовитковом индукторе определяется уравнением:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot r^{-1} \cdot \bar{B}) - \sigma \cdot \bar{v} \times \bar{B} = \frac{i \cdot N}{S}, \quad (5)$$

где N – число витков индуктора; S – сечение витка индуктора.

Электродинамические силы, действующие на подвижный электропроводящий якорь, определяется посредством расчета тензора натяжения Максвелла (T):

$$\bar{F} = 2 \cdot \pi \cdot r \int_{\partial\Omega} \bar{n} \cdot T dS; \quad (6)$$

$$\bar{\tau} = 2 \cdot \pi \cdot r \int_{\partial\Omega} (\bar{r} - \bar{r}_0) \times (\bar{n} \cdot T) dS, \quad (7)$$

где $\bar{F}, \bar{\tau}$ – нормальное и радиальное значение электродинамической силы; \bar{n} – вектор внешней нормали к поверхности интегрирования dS .

Система уравнений (1–7) включает начальные

$$\bar{A}_{t=0}(\bar{A}_r, \bar{A}_{phi}, \bar{A}_z) = \bar{A}(0, 0, 0) \quad (8)$$

и граничные условия:

$$\bar{n} \times \bar{A} = 0. \quad (9)$$

Сопротивление среды в математической модели описывается уравнением Навье-Стокса для движущегося поля $\bar{u} = (u, v)$ и давления p для деформируемой подвижной системы координат:

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} - \nabla \cdot \left[-p\bar{I} + \eta(\nabla\bar{u} + (\nabla\bar{u})^T) \right] + \rho((\bar{u} - \bar{u}_m) \cdot \nabla)\bar{u} = \bar{F}; \quad (10)$$

$$-\nabla \cdot \bar{u} = 0, \quad (11)$$

где \bar{I} – единичная диагональная матрица; \bar{F} – объёмная сила, действующая на среду; \bar{u}_m – координатная скорость системы; ρ – плотность.

Структурные изменения твёрдого тела описываются при помощи эластичной и нелинейной деформации согласно:

$$\bar{F}_T = -\bar{n} \cdot (-p\bar{I} + \eta(\nabla\bar{u} + (\nabla\bar{u})^T)), \quad (12)$$

где \bar{n} – вектор внешней нормали.

Система уравнений (10–12) содержит начальные:

$$\bar{u} = 0, \frac{d\bar{u}}{dt} = 0, p = 0 \quad (13)$$

и граничные условия (для недеформируемой области)

$$\bar{u} = 0. \quad (14)$$

Тепловые процессы в ЛЭДУ описываются уравнением:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q, \quad (15)$$

где C_p – теплоемкость; T – температура; Q – энергия; k – теплопроводность.

Уравнение (15) включает начальное условие: $T = 273$ К, и граничные условия:

$$-\bar{n} \cdot (-k\nabla T) = 0. \quad (16)$$

Решения системы уравнений (1-17) произведено методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени и использованием решателя PARDISO.

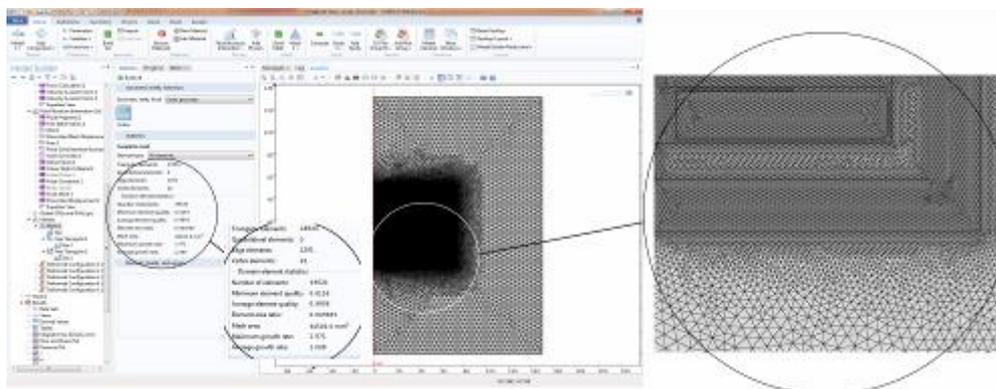


Рисунок 1 – Компьютерная геометрическая модель ЛЭДУ

Геометрические параметры ЛЭДУ

Учитывая многовариантность комбинаций входных параметров, массы медного якоря с ИЭ и их начальной скорости, рассмотрим два варианта ЛЭДУ:

№1 – малая масса якоря и ИЭ ($m_{я}$) с высокими начальными скоростями (V_{z0});

№2 – большая масса якоря и ИЭ с относительно невысокими начальными скоростями.

Основные показатели рассматриваемых вариантов ЛЭДУ представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные параметры ЛЭДУ

Параметр	Обозначение	Величина	
		ЛЭДУ №1	ЛЭДУ №2
Внешний диаметр индуктора	D_{ex1} , мм	24	162
Внутренний диаметр индуктора	D_{in1} , мм	14	122
Высота индуктора	H_1 , мм	30	240
Внешний диаметр якоря	D_{ex2} , мм	13	120
Внутренний диаметр якоря	D_{in2} , мм	11	108
Высота якоря	H_2 , мм	30	240
Радиальное расстояние между индуктором и якорем	δ , мм	0,5	1,0
Количество витков индуктора	N_1 , шт	15	60
Сечение шины индуктора	$a \times b$, мм ²	10	80
Масса якоря и ИЭ	$m_{я}$, кг	0,0045	13,2
Емкость ЕНЭ	C , мкФ	100	80
Напряжение ЕНЭ	U_0 , кВ	10	50

В табл. 2 представлены результаты моделирования для рассматриваемых вариантов ЛЭДУ, где V_{z0} – начальная скорость ИЭ; V_{z-end} – конечная скорость ИЭ; E_0 –

начальная энергия ИЭ; E_{end} – конечная энергия ИЭ; ΔE – относительный прирост энергии ИЭ; η – эффективность ЛЭДУ; V_1 – объем ЕНЭ; m_1 – масса ЕНЭ.

На рис. 2 представлены электромеханические и энергетические характеристики этих ЛЭДУ, где Q_2 – мгновенное значение тепловой мощности, выделяемой в якоре ИЭ; ΔV – изменение скорости якоря и ИЭ; j_1 – усредненное значение плотности тока по сечению индуктора; j_2 – усредненное значение плотности тока по сечению якоря; f_z – мгновенное значение электродинамических усилий, действующих на якорь; z – перемещение якоря и ИЭ в аксиальном направлении.

Таблица 2 – Показатели ЛЭДУ

ЛЭДУ	D_{ex2} , мм	V_{z0} , м/с	V_{z-end} , м/с	E_0 , кДж	$E_{(ЕНЭ)}$, кДж	E_{end} , кДж	ΔE , %	η , %	V_1 , м ³	m_1 , кг
№1	13	855	887	15	5	17.7	18.01	54.0	0.0023	3.34
№2	120	310	602	528	100	575	8.93	47.5	0.046	67

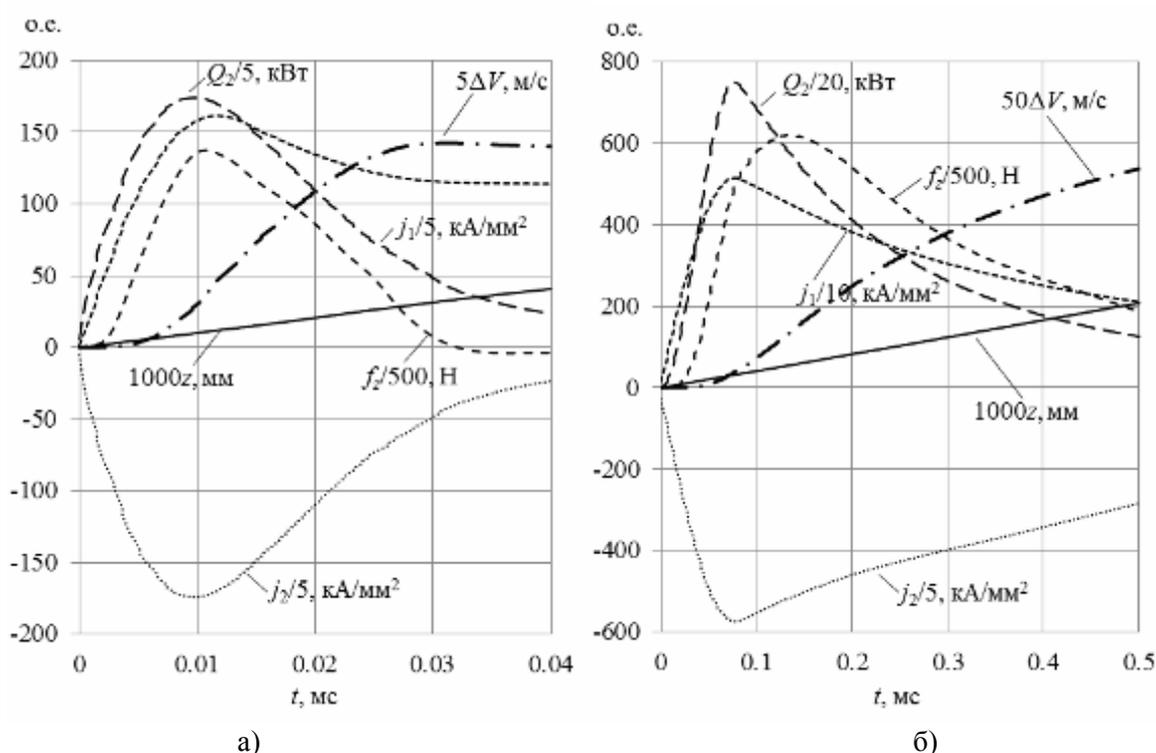


Рисунок 2 – Электромеханические и энергетические характеристики ЛЭДУ №1 (а) и ЛЭДУ №2 (б)

Как видно в ЛЭДУ №1 электромеханические процессы протекают на порядок быстрее, чем в ЛЭДУ №2 и носят ярко выраженный импульсный характер. При этом в ЛЭДУ №1 скорость ИЭ V выходит на насыщение с последующим снижением из-за электродинамических и аэродинамических сил, а в ЛЭДУ №2 скорость постоянно возрастает на рассматриваемом интервале времени.

На рис. 3 показаны геометрические параметры ЛЭДУ и распределение магнитного поля в течение рабочего процесса ЛЭДУ №1. Как видно, наибольшее значение индукции магнитного поля возникает в определенный момент времени (12 мкс), когда якорь и ИЭ наполовину охвачены индуктором. В целом необходимо

отметить довольно значительный уровень импульсных магнитных полей, что необходимо учитывать при разработке указанных доускорителей.

В табл. 3 представлены результаты расчета эффективности ЛЭДУ №1. При отношении энергий $E_0/E_{ЕНЭ} < 0,35$ эффективность ЛЭДУ η находится на уровне 52–54 %. Увеличение указанного отношения энергий $E_0/E_{ЕНЭ}$ приводит к снижению эффективности η , однако дает возможность на 20–30 % повысить энергию якоря и ИЭ.

Для ЛЭДУ №2 с большей массой ИЭ достижение значительного прироста энергии ограничено тепловыми режимами (в рассматриваемом варианте поверхностные слои якоря ИЭ, обращенные к индуктору нагревается до температур 800–1000 °С) и уровнями создаваемых магнитных полей. Кроме того, отношение энергий $E_0/E_{ЕНЭ}$, при котором эффективность ЛЭДУ становится менее 50 %, ниже, чем у ЛЭДУ №1.

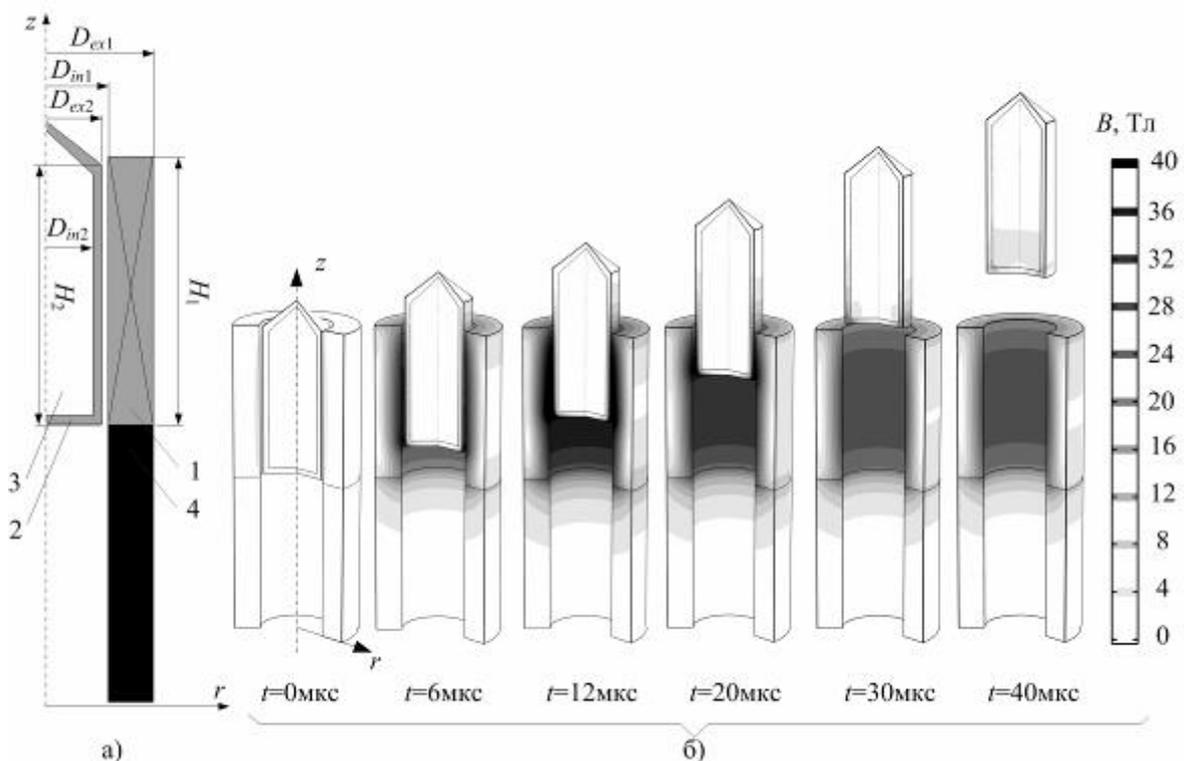


Рисунок 3 – Геометрические параметры ЛЭДУ (а) и распределение магнитного поля в течение рабочего процесса ЛЭДУ №1: (б) 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ИЭ; канал начального ускорения

Таблица 3 – Показатели ЛЭДУ №1 при различной энергии ЕНЭ ($V_{z0}=855$ м/с)

$E_{ЕНЭ}$, кДж	V_{z-end} , м/с	E_{end} , кДж	ΔE , %	η , %
5	886.9	17.7	18.0	54.0
10	914.1	18.8	25.3	38.0
15	933.3	19.6	30.6	30.6
30	1000.0	22.5	50.0	25.0

Выводы

Предложена концепция и разработана математическая модель линейного электромеханического доускорителя индукционно-динамического типа, описывающая взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и механические процессы.

Указанный ускоритель обеспечивает эффективность на уровне 52–54 % при повышении кинетической энергии ИЭ на 20–30 %.

Литература

1. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи.– Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing– 2014.– 496 с. (<https://www.lap-publishing.com>).
2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Известия вузов. Электромеханика.– 2002.– № 2.– С. 37–43.
3. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах // Электротехника.– 2003.– № 2.– С. 30–36.
4. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотраков Д.В. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубке-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка.– 2001.– № 2.– С. 28–32.
5. Гурин А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Технічна електродинаміка.– 2001.– № 2.– С. 3–6.
6. Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era // IEEE Trans. Magnetics.– 2005.– № 1, Vol. 41.– P. 158–164.
7. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range // IEEE Trans. Magnetics.– 2003.– № 1, Vol. 39.– P. 310–313.
8. Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Меркулов Р.В. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом // Сварочное производство.– 2009.– № 2.– С. 33–35.
9. 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.
10. Туманов И.Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы многофракционных жидких продуктов // Электротехника.– 2013.– № 8.– С. 48–52.
11. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator // IEEE Trans. Magnetics.– 1991.– № 1, Vol. 27.– P. 607–610.
12. Косцов Э.Г. Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов // Автометрия.– 2012.– Т. 48, № 4.– С. 93–103.
13. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic cooling system “Krioblast” increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices // Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.– Volume 8 B, 2013.– November 15–21, 2013.– San Diego, CA, USA.– Code 105847.– 10 pgs.

14. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G.. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Trans. Magnetics.– 2012.– Vol. 48, №11.– P. 3315–3318.
15. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение.– 2005.– № 12.– С. 52–57.
16. Тютюкин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника.– 2002.– № 11.– С. 24–28.
17. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ ударных электромеханических преобразователей индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типа // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії.– 2014.– № 38.– Харків: НТУ «ХПІ».– С. 30–44.
18. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter // Refrigeration Science and Technology.– 13th International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics. – Prague, Czech Republic.– April 7–11, 2014.– Code 106226.– 2014.– P. 268–275.

Bibliography (transliterated)

1. Bolyukh V.F., Schukin I.S. Lineynyye induktsionno-dinamicheskie preob-razovateli.– Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing– 2014. – 496 p. (<https://www.lap-publishing.com>).
2. Ugarov G.G., Neyman V.Yu. Tendentsii razvitiya i primeneniya ruchnykh udarnykh mashin s elektromekhanicheskim preobrazovaniem energii. Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. – 2002.– # 2. – P. 37–43.
3. Neyman V.Yu. Analiz protsessov energopreobrazovaniya lineynykh elektromagnitnykh mashin s predvaritelnyim akumulirovaniem magnitnoy energii v dinamicheskikh rezhimakh. Elektrotehnika.– 2003.– # 2. – P. 30–36.
4. Zdor G.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S., Smotrakov D.V. Razrabotka effektivnykh tehnologicheskikh ustroystv dlya magnitno-elastoimpulsnoy vyirubki-probivki tonkolistovykh materialov. Metalloobrabotka.– 2001.– # 2.– P. 28–32.
5. Gurin A.G., Naboka B.G., Gladchenko V.Ya. Volnovyye yavleniya v elektrodinamicheskikh izluchatelyakh i formirovaniye slozhnykh gidroakusticheskikh signalov. Tehnichna elektrodinamika.– 2001.– # 2.– P. 3–6.
6. Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era. IEEE Trans. Magnetics.– 2005.– # 1, Vol. 41. – P. 158–164.
7. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. IEEE Trans. Magnetics.– 2003.– # 1, Vol. 39.– P. 310–313.
8. Strizhakov E.L., Neskromnyy S.V., Merkulov R.V. Udarnaya kondensatornaya svarka s magnitno-impulsnyim privodom. Svarochnoe proizvodstvo.– 2009.– # 2.– P. 33–35.
9. 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.
10. Tumanov I.E. Parametricheskyy elektromagnitnyy vzbuditel nizkochastotnykh mekhanicheskikh kolebaniy dlya sistem kontrolya, izmereniya i dozirovaniya massyi mnogo-fraktsionnykh zhidkikh produktov. Elektrotehnika.– 2013.– # 8.– P. 48–52.

11. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator. IEEE Trans. Magnetics.– 1991.– # 1, Vol. 27.– P. 607–610.
12. Kostsov E.G. Mikroelektromehanicheskiy uskoritel tverdotelnyih ob'ektov. Avtometriya.– 2012.– T. 48, # 4.– P. 93–103.
13. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic cooling system “Krioblast” increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices. Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.– Volume 8 B, 2013.– November 15–21, 2013.– San Diego, CA, USA.– Code 105847.– 10 pgs.
14. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept. IEEE Trans. Magnetics.– 2012.– Vol. 48, #11.– P. 3315–3318.
15. Tatmyishevskiy K.V., Kozlov S.A. Magnitno-impulsnyie ustanovki dlya ispytaniy izdeliy aviakosmicheskoy tehniky na udarnyie vozdeystviya. Aviakosmicheskoe priborostroenie.– 2005.– # 12. – P. 52–57.
16. Tyutkin V.A. Magnitno-impulsnyiy sposob razrusheniya svodov i ochistki tehnologicheskogo oborudovaniya ot nalipshih materialov. Elektrotehnika.– 2002.– # 11.– P. 24–28.
17. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Sravnitelnyiy analiz udarnyih elektromehanicheskih preobrazovateley indukcionno-dinamicheskogo, elektrodinamicheskogo i elektromagnitnogo tipa. Visnik NTU «HPI». Ser.: Elektrichni mashini ta elektromehanične peretvorennya energii.– 2014.– # 38.– Harkiv: NTU «HPI».– P. 30–44.
18. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter. Refrigeration Science and Technology.– 13th International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics. – Prague, Czech Republic.– April 7–11, 2014.– Code 106226.– 2014.– P. 268–275.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Болюх В.Ф., Олексенко С.В.

ЛІНІЙНИЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ ІНДУКТИВНО-ДИНАМІЧНОГО ТИПУ

Запропоновано математичну модель лінійного електромеханічного додаткового прискорювача, що враховує взаємозалежні електричні, магнітні, механічні та теплові процеси, що протікають при збудженні індуктора від ємнісного накопичувача. Встановлена можливість ефективного використання лінійного електромеханічного додаткового прискорювача для збільшення динамічних показників якоря, що мав початкову швидкість. Показано ефективність використання лінійного електромеханічного прискорювача для різних варіантів якоря (з малою та великою масою). Досліджено відносний вплив використаної енергії ємнісного накопичувача енергії до початкової енергії якоря на ефективність роботи лінійного електромеханічного прискорювача.

Bolyukh V.F., Oleksenko S.V.

**LINEAR ACCELERATOR ELECTROMECHANICAL
INDUCTION-DYNAMIC TYPE**

The mathematical model of electromechanical linear additional accelerator that allows interdependent electrical, magnetic, mechanical and thermal processes that occur at excitation coil of capacitive drive. The possibility of efficient use of electromechanical linear accelerator for increasing dynamic performance anchors that had initial velocity. The efficiency of the electromechanical linear accelerator for different variants anchor (low and high mass). Investigated the relative impact of energy used capacitive energy storage to the original energy anchor the efficiency of the electromechanical linear accelerator.