

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

## **СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЕЙ**

Проведено сравнение электромеханических показателей индукционно-динамического двигателя и электромагнитного двигателя, предназначенных для работы в качестве актуатора электрических коммутационных аппаратов. Для сравнения выбраны двигатели с одинаковыми массогабаритными параметрами при использовании емкостного накопителя энергии и электронной системы, формирующей апериодический импульс тока. Показаны преимущества индукционно-динамического двигателя по скоростным показателям по отношению к электромагнитному двигателю.

**Ключевые слова:** индукционно-динамический двигатель, электромагнитный двигатель, актуатор, скоростные показатели.

**Введение.** Индукционно-динамические (ИДД) и электромагнитные двигатели (ЭМД) широко используются в промышленных, и научно-технических системах, где необходимы высокоскоростные линейные перемещения исполнительного элемента на относительно небольшом активном участке [1-3]. Одной из наиболее эффективных областей применения указанных двигателей является привод быстродействующих электрических коммутационных аппаратов (ЭКА) [4, 5]. В настоящее время в качестве исполнительного устройства (актуатора) ЭКА применяются механические накопители энергии (сжатые пружины), гидравлические привода, ротационные электродвигатели с преобразованием вращения в линейное перемещение и др.

Применение ИДД и ЭМД для привода ЭКА наиболее целесообразно из-за небольших массогабаритных параметров и непосредственного преобразования электрической энергии в линейное перемещение контактной системы аппарата. Однако ИДД с электропроводящим якорем, работающим на отталкивание от индуктора, и ЭМД с ферромагнитным якорем, работающим на притяжение к индуктору, имеют различные электромеханические показатели, что обуславливает задачу их сравнительного анализа.

**Анализ литературы.** Во многих устройствах науки и техники применяются ИДД и ЭМД. В строительстве применяются различные электромагнитные молоты и перфораторы для разрушения монолитно-

бетонных оснований, устройства для погружения свай и анкеров [2, 6]. В горнодобывающей промышленности используются бутобои различной мощности, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – сейсмоисточники различной мощности и возмущающей силы; в машиностроении – молоты с большим диапазоном энергии удара и т.п. [7]. Для авиационной, ракетно-космической и оборонной техники разрабатываются пусковые устройства и ускорители массивных объектов [8-10]. Для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты используются научно-технологические пусковые установки [11, 12]. Ударные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и др. [13, 14]. Для прессования порошков, очистки вагонов, трюмов и иных емкостей от остатков продуктов и налипания материалов и др. применяются различные технологические ударные устройства [15, 16]. Однако при этом отсутствует сравнительный анализ скоростных показателей ИДД и ЭМД, работающих от одинакового источника энергии, что не позволяет делать обоснованные выводы о сферах их применения [17-19].

**Целью работы** является сравнение электромеханических показателей ИДД и ЭМД, предназначенных для работы в качестве актуатора ЭКА.

**Математическая модель.** Для расчетов рабочих процессов проведено компьютерное моделирование ИДД и ЭМД в программном пакете COMSOL Multiphysics 4.4, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов.

С использованием условия Дирихле на границах расчетной области в цилиндрической системе координат рассчитывается векторный магнитный потенциал  $A$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

где  $\mu(B)$  – магнитная проницаемость материала ферромагнитного сердечника и якоря ЭМД;  $\gamma$  – электропроводность материала активных элементов электродвигателей.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d(rA)}{dr}; \quad B_r = -\frac{dA}{dz}. \quad (2)$$

Локальная плотность тока на каждом участке электропроводящего якоря ИДД определяется по известному выражению

$$j = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (3)$$

Электродинамическая сила (ЭДУ), действующая на якорь, рассчитывается по формуле:

$$f_z = 0,5 \oint (H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)) dS \quad (4)$$

где  $S$  – поверхность, ограничивающая подвижный якорь в пространстве  $\{r, z\}$ .

Для ферромагнитного материала ферромагнитного сердечника (ФС) и якоря ЭМД используется нелинейная кривая намагничивания  $B = f(H)$

Импульс ЭДУ, действующий на подвижный якорь, определяется выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt \quad (5)$$

При расчете взаимосвязанных переходных электромагнитных, электродинамических, механических и тепловых процессов предполагается отсутствие деформации элементов электродвигателей. При этом учитывается пространственное распределение индуцированного тока по сечению электропроводящего якоря ИДД, магнитного и теплового поля, сопротивление окружающей среды при движении якоря на каждом временном шаге [20].

**Геометрические параметры ИДД и ЭМД.** Основные параметры ЭМД и ИДД с дисковым якорем и ФС, охватывающим индуктор с нижней и наружной поверхности, представлены в табл. 1. На рис. 1 и рис. 2 показаны, соответственно, общий вид и сечение ЭМД и ИДД с распределением поля в момент максимума ЭДУ. На этих рисунках обозначены: 1 – неподвижный индуктор, 2а – электропроводящий якорь ИДД, выполненный из технической меди; 2б – ферромагнитный якорь ЭМД, выполненный из стали марки Ст.10 (AISI 1010, UNS G10100).

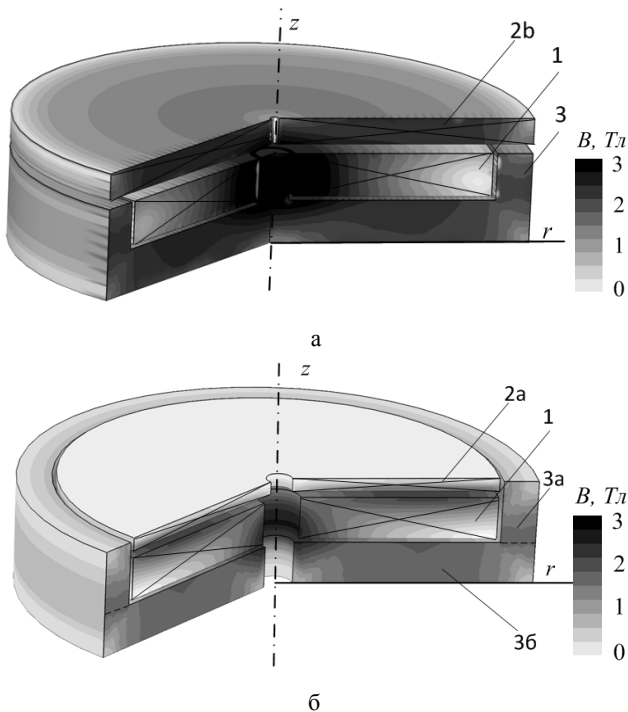


Рис. 1 – Общий вид ЭМД и ИДД с указанием распределения магнитных полей: а – ЭМД; б – ИДД.

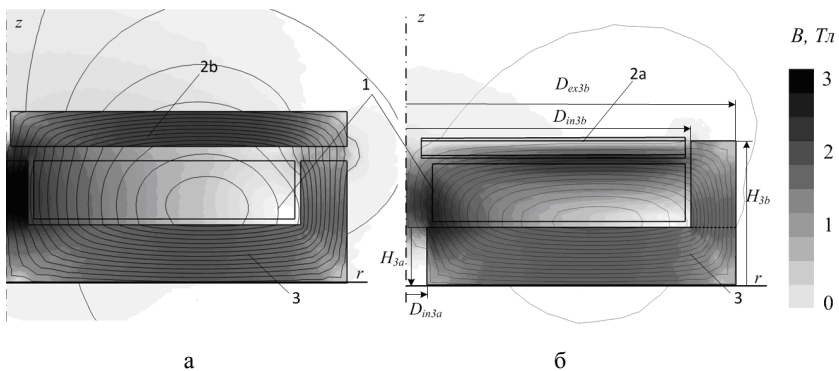


Рис. 2 – Сечение ЭМД и ИДД с указанием распределения магнитных полей: а – ЭМД; б – ИДД.

В исследуемых двигателях применен коаксиальный ФС 3, который можно представить состоящим из дискового основания 3б, охватывающего индуктор 1 снизу, и наружной обечайки 3а, охватывающей индуктор с наружной боковой поверхности. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС заполнено изоляцией толщиной  $\delta = 1$  мм. Ферромагнитный якорь ЭМД и ФС выполнены шихтованными из стали Ст.10.

Таблица 1 – Основные параметры исследуемого ИДД и ЭМД

Показатель	Обозначение	ИДД и ЭМД	
		Значение	
Внешний диаметр индуктора	$D_{ex1}$ , мм	100,0	
Внутренний диаметр индуктора	$D_{in1}$ , мм	10,0	
Высота индуктора	$H_1$ , мм	10,0	
Внешний диаметр якоря	$D_{ex2}$ , мм	100,0	118,0
Внутренний диаметр якоря	$D_{in2}$ , мм	10,0	
Высота якоря	$H_2$ , мм	3,0	
Начальное расстояние между индуктором и якорем	$\delta$ , мм	1,0	2,0; 2,5; 3,0
Количество витков индуктора	$N_1$ , шт.	46	
Сечение шины индуктора	$a \times b$ , мм <sup>2</sup>	8,64	
Масса якоря + масса исполнительного элемента	$m$ , кг	0,205+0,5	0,53+0,5
Высота дисковой части ФС	$H_{3a}$ , мм	10,0	
Высота цилиндрической части ФС	$H_{3b}$ , мм	24,0	21,0
Внешний диаметр ФС	$D_{ex3b}$ , мм	118,0	
Внутренний диаметр ФС	$D_{in3b}$ , мм	102,0	
Емкость ЕНЭ	$C$ , мкФ	2850	
Зарядное напряжение ЕНЭ	$U_0$ , В	400	

### Сравнение электромеханических показателей ИДД и ЭМД.

ЭКА требует быстрой коммутации электрической цепи, что обуславливает высокую скорость перемещения якоря относительно индуктора в актуаторе.

Рассмотрим электромеханические процессы в ИДД и в ЭМД с одинаковыми параметрами источника энергии, противодействующих усилий и массогабаритных показателей.

Исследованы электромеханические характеристики для четырех вариантов: 1 – ЭМД с рабочим зазором 2 мм, 2 – ЭМД с рабочим зазором 2,5 мм, 3 – ЭМД с рабочим зазором 3 мм, 4 – ИДД. Рабочий зазор ЭМД ограничивает величину рабочего хода ферромагнитного якоря, в

то время, как величина рабочего хода электропроводящего якоря в ИДД практически не ограничена.

Возникающий в ИДД токовый импульс по амплитуде практически аналогичен амплитуде импульса для ЭМД. На рис. 3 показана плотность тока в индукторе рассматриваемых двигателей. Величина рабочего зазора в ЭМД мало влияет на ток в индукторе. Ток в индукторе ИДД имеет более короткую длительность, чем в ЭМД: максимальное значение тока в индукторе ЭМД возникает в момент времени, который более чем в два раза превышает аналогичное время ИДД.

При протекании импульса тока в индукторе ИДД возникает аксиальная сила отталкивания, действующая на электропроводящий якорь, в то время как в ЭМД на ферромагнитный якорь действует аксиальная сила притяжения (рис. 3, б). В ИДД возникает относительно кратковременное силовое воздействие на электропроводящий якорь, превышающее по амплитуде на 65 % аналогичную величину силового импульса в ЭМД. В ИДД длительность силового воздействия существенно меньше, чем в ЭМД.

В ИДД форма силового импульса гладкая и имеет выраженную составляющую отталкивания, которая через определенное время после начала возбуждения (через 1,25 мс) принимает характер притяжения, но с многократно меньшей величиной.

Сила притяжения в ЭМД изменяется нелинейно и увеличивается с уменьшением рабочего зазора между ферромагнитным якорем и ФС. При достижении нулевого значения зазора движение прекращается, создавая только удерживающее усилие ( $t > 1,6$  мс). При этом характер силы притяжения резко меняется от начального возрастания до последующего плавного затухания после соударения с ФС (в расчетах считаем отсутствие механических колебаний якоря при соударении). Чем меньше рабочий зазор между индуктором и ферромагнитным якорем ЭМД, тем быстрее и большего значения достигает максимальная сила притяжения  $f_z$ . Однако это изменение незначительно (не превышает 3...6 %).

На рис. 4 показано изменение импульса силы  $F_z$  для рассматриваемых электродвигателей. В ИДД импульс силы отталкивания через определенное время (около 1,0 мс) выходит практически на насыщение. В ЭМД импульс силы притяжения в интервале до 5 мс растет и примерно через 2,0 мс превышает импульс силы отталкивания в ИДД.

На рис. 5 показано изменение скорости якоря рассматриваемых электродвигателей. Отметим, что скорость ферромагнитного якоря ЭМД возрастает только до момента соприкосновения с ФС. Если ра-

бочий зазор наименьший (2 мм), то начальная скорость ферромагнитного якоря нарастает более быстро. Но наибольшая скорость развивается в момент соударения этого якоря с ФС при наибольшем рабочем зазоре (3 мм).

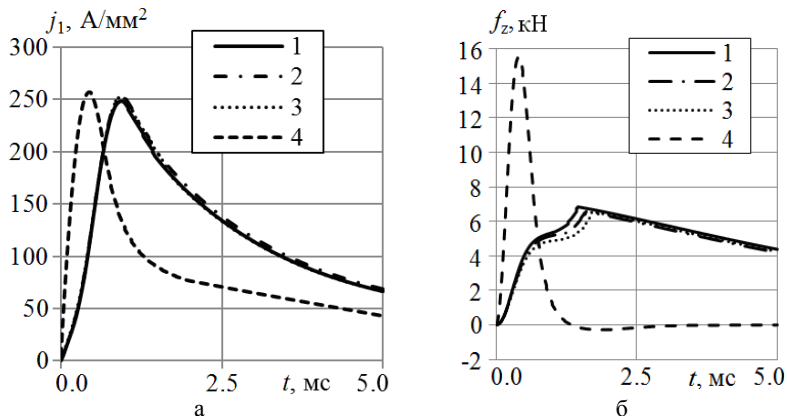


Рис. 3 – Изменение плотности тока в индукторе  $j_1$  и аксиальной силы, действующей на якорь  $f_z$  в ИДД и ЭМД в течении рабочего цикла:  
а – плотности тока в индукторе; б – аксиальная сила.

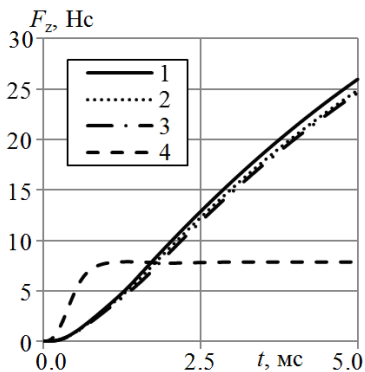


Рис. 4 – Изменение импульса силы  $F_z$  ИДД и ЭМД в течении рабочего цикла

В ИДД скорость нарастает существенно быстрее, чем в ЭМД, достигая более высоких значений (более чем в 2 раза). Однако эта скорость через определенное время (около 1 мс) практически не изменяется.

Таким образом, можно отметить, что при использовании одинакового источника энергии в ИДД обеспечиваются повышенные скоро-

стные показатели по сравнению с ЭМД. При этом величина рабочего хода электропроводящего якоря существенно больше, чем в ЭМД, в котором к тому же имеет место соударение ферромагнитного якоря с неподвижным ФС.

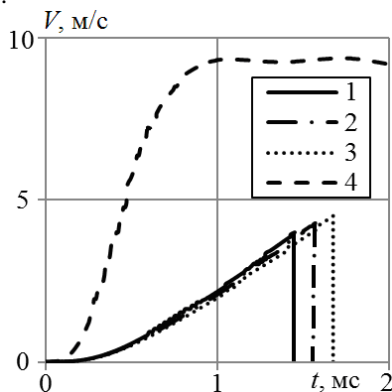


Рис. 5 – Изменение скорости якоря ИДД и ЭМД в течении рабочего цикла.

**Выводы.** Возникающий в ИДД токовый импульс по величине практически аналогичен амплитуде импульса для ЭМД. Ток в индукторе ИДД быстрее имеет более короткую длительность, чем аналогичный ток в ЭМД.

В ИДД возникает кратковременное силовое воздействие на электропроводящий якорь, превышающее по амплитуде на 65% аналогичную величину силового импульса в ЭМД. Однако в ИДД длительность силового воздействия существенно меньше, чем в ЭМД.

В ИДД скорость нарастает существенно быстрее, чем в ЭМД, достигая более высоких значений, но она через определенное время практически не изменяется.

**Список литературы:** 1. *Афонин А.А., Гребеников В.В.* Электродинамические системы повышенного быстродействия // *Техническая электродинамика*. – 1994. – № 5. – С. 23-29. 2. *Угаров Г.Г., Нейман В.Ю.* Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2002. – № 2. – С. 37-43. 3. *Балковой А.П., Костин А.В., Мягких А.С. и др.* Особенности проектирования гаммы прямых линейных электроприводов для машиностроения // *Электротехника*. – 2013. – № 7. – С.13-20. 4. *Cho D.J., Woo D.K., Ro J.S. et al.* Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter-locking mechanism for a magnetic switch // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2013. – Vol. 49, №5 – P. 2229-2232. 5. *Bissal A., Magnusson J., Engdahl G.* Comparison of two ultra-fast actuator concept // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48, №11. – P. 3315-3318. 6. *Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. и др.* Индукционно-динамическая система очистки сушильного



оборудования // Молочная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 25-26. **7.** Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотраков Д.В. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубki-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка. – 2001. – № 2. – С. 28-32. **8.** 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. **9.** 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. **10.** Liao M., Zabar Z., Czarkowski D. et al. On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher // IEEE Trans. Magnetics. – 1999. – № 1, Vol. 35. – P. 148-153. **11.** Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2010. – № 1. – С. 22-28. **12.** Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator // IEEE Trans. Magnetics. – 1991. – № 1, Vol. 27. – P. 607-610. **13.** Таммишевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 12. – С. 52-57. **14.** Пелленко Б.И. Оптимизация линейных электроприводов стендов для динамических испытаний автомобилей // Электрическое и электронное оборудование автомобилей, тракторов и их роботизированных производств. – М.: МАМИ, 1992. – С. 60-68. **15.** Тютькин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 24-28. **16.** Таммишевский 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. **17.** 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. **18.** Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Меркулов Р.В. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом // Сварочное производство. – 2009. – № 2. – С. 33-35. **19.** Мазуренко М.И., Петухов В.А., Поведайло В.А. и др. Электродинамический импульсный клапан для получения молекулярных пучков // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 2. – С. 152-155. **20.** Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №6. – С.20-27.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Afonin A.A., Grebenikov V.V. "Electrodynamic systems improved performance". *Technical electrodynamics*. No. 5. 1994. 23-29. Print **2.** Ugarov G.G., Neumann V.Y. "Trends in the development and application of hand shock machines with electromechanical energy conversion". *Proceedings of Higher Education. Electromechanics*. No. 2. 2002. 37-43. Print **3.** Balkovoj A.P., Kostin A.V., Mjagkih A.S. etc. "Design features range direct linear actuators for engineering". *Electrical Engineering*. No. 7. 2013. 13-20. Print **4.** Cho D.J., Woo D.K., Ro J.S. et al. "Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter-locking mechanism for a magnetic switch". *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 49. No. 5. 2013. 2229-2232. Print **5.** Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. "Comparison of two ultra-fast actuator concept" *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 48, No. 11. 2012. 3315-3318. Print **6.** Kuznetsov P.V., Tolmachev N.S., Kharitonov V.D. etc. "Induction-dynamic cleaning drying equipment". *Dairy industry*. No. 1. 1989. 25-26. Print **7.** Zdor G.N., Mamut A.V., Mamut V.S., Smotrakov D.V. "Development of effective technological devices for magnetic elastoimpulsnoy cutting-punching sheet materials". *Metal processing*. No. 2. 2001. 28-32. Print **8.** Fair H.D. "Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 41. No. 1. 2005. 158-164. Print **9.** Reck

B. "First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 39. No. 1. 2003. 310-313. Print. **10**. Liao M., Zabar Z., Czarkowski D. et al. "On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 35. No 1. 1999. 148-153. Print. **11**. Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. "The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring". *Modern information technologies in the field of security and defense*. No. 1. 2010. 22-28. Print. **12**. Upshaw J.L., Kajs J.P. "Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator". *IEEE Trans. Magnetics*. No. 1, Vol. 27. 1991. 607-610. Print. **13**. Tatmyshevsky K.V., Kozlov S.A. "Magnetic pulse position for testing products for aerospace shock effects". *Aerospace Instrument*. No. 12. 2005. 52-57. Print. **14**. Petlenko B.I. "Optimization of linear electric stands for dynamic testing of vehicles". *Electrical and electronic equipment in automobiles, tractors and robotic industries*. Moscow: MAMI, 1992. 60-68. Print. **15**. Tyutkin V.A. "Magnetic pulse method for breaking arches and cleaning of process equipment from adhering materials". *Electrical Engineering*. No. 11. 2002. 24-28. Print. **16**. Tatmyshevsky K.V., Marychev S.N., Kozlov S.A. "Magnetic pulse propelling means defeat for active protection systems objects of particular importance". *Modern security technology*. No. 4. 2005. 8-11. Print. **17**. Gurin A.G., Naboka B.G., Gladchenko V.Y. "Wave phenomena in electro-dynamic emitters and the formation of complex sonar signals". *Tekhnichna elektrodinamika*. No. 2. 2001. 3-6. Print. **18**. Strizhakov E.L., Neskoromnyi S.V., Merkulov R.V. "Shock capacitor welding with pulsed magnetic drive". *Welding Engineering*. No. 2. 2009. 33-35. Print. **19**. Mazurenko M.I., Petukhov V.A., Povedailo V.A. etc. "The electrodynamic pulse valve for molecular beam". *Instruments and Experimental Techniques*. No. 2. 2002. 152-155. Print. **20**. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. "Influence of parameters of the ferromagnetic core on the efficiency of induction-dynamic engine". *Elektrotehnika & Elektromehnika*. No. 6. 2012. 20-27. Print.

*Поступила (received) 29.04.2014*



**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 по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.



**Олексенко Сергей Владимирович**. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2011 г. Аспирант кафедры общей электротехники НТУ "ХПИ". Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия.