

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ИНДУКЦИОННОГО ТИПОВ

**В.Ф.Болух**, докт.техн.наук, **С.В.Олексенко**, **И.С.Щукин\***, канд.техн.наук  
**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»**,  
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина. e-mail: [vfboilyukh@gmail.com](mailto:vfboilyukh@gmail.com)

*Проведен сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей (ЛИЭП) электромагнитного и индукционного типов с ферромагнитным экраном, охватывающим индуктор, который возбуждается от емкостного накопителя энергии аperiodическим импульсом. Разработана математическая модель ЛИЭП, которая учитывает пространственно-распределенные и изменяемые во времени взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы. Показано, что в ЛИЭП электромагнитного типа электромеханические процессы протекают медленнее при меньшей величине тока в индукторе, но обеспечивают больший импульс силы. ЛИЭП индукционного типа развивает большую скорость исполнительного элемента при меньших магнитных полях рассеяния и более высоком КПД. Библиограф. 6, рис. 2.*

**Ключевые слова:** линейный импульсный электромеханический преобразователь электромагнитного и индукционного типов, ферромагнитный экран.

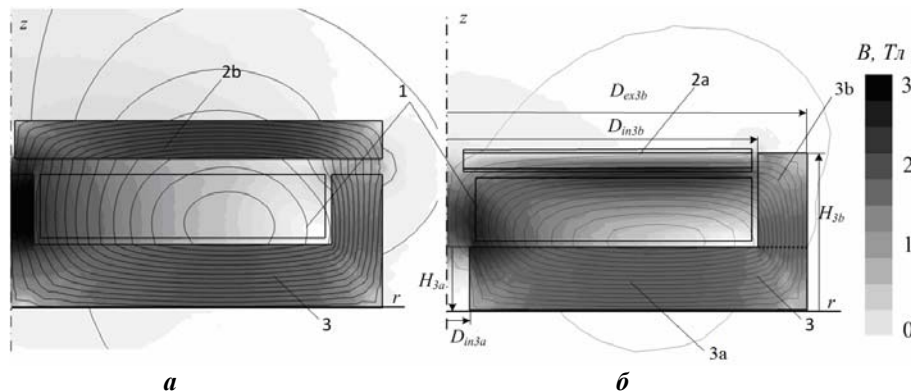
Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) электромагнитного и индукционного типов широко используются в различных отраслях промышленности, при проведении научных исследований и испытаний, в системах защиты различного назначения и др. для обеспечения высокоскоростного линейного перемещения исполнительного элемента или для создания мощных силовых импульсов на объект воздействия [1,2,6]. Основным элементом ЛИЭП является неподвижный индуктор, возбуждаемый импульсным источником, например, емкостным накопителем энергии (ЕНЭ). Индуктор посредством магнитного поля взаимодействует с якорем, который перемещает исполнительный элемент. В ЛИЭП электромагнитного типа имеется ферромагнитный якорь, на который со стороны индуктора действует электромагнитная сила притяжения. В ЛИЭП индукционного типа имеется электропроводящий якорь, на который со стороны индуктора действует электродинамическая сила отталкивания.

Несмотря на широкое применение ЛИЭП электромагнитного и индукционного типов отсутствует их сравнительный анализ при одинаковых габаритах, параметрах индуктора и ЕНЭ, что затрудняет проблему выбора типа преобразователя для решения тех или иных технических задач.

*Целью статьи* является обоснование выбора типа ЛИЭП для обеспечения или высокоскоростного линейного перемещения исполнительного элемента, или для создания мощных силовых импульсов.

Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель ЛИЭП, которая при соответствующих начальных и граничных условиях учитывает пространственно-распределенные и изменяемые во времени взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы, а также нелинейные физические параметры материалов и процессов. Модель предполагает осевую конструкцию преобразователя, аксиальное перемещение якоря с исполнительным элементом, отсутствие деформации элементов и отдачи индуктора. На каждом расчетном временном шаге учитывается распределение индуцированного тока по сечению массивного электропроводящего якоря, теплоотдача элементов при работе в условиях окружающей среды и аэродинамическое сопротивление среды при движении якоря [4]. Математическая модель ЛИЭП реализована в программном пакете *COMSOL Multiphysics 4.4*.

Рассмотрим коаксиальный ЛИЭП дисковой конфигурации с ферромагнитным экраном, который охватывает индуктор с противоположной якорю торцевой и наружной боковой сторон [4]. Ферромагнитный экран и якорь для устранения внутренних вихревых токов выполнены из магнетодиэлектрика с магнитными свойства-



**Рис. 1**

вами стали марки Ст.10 [5]. В исходном положении ферромагнитный якорь устанавливается на расстоянии рабочего хода от индуктора, а электропроводящий якорь – на минимальном расстоянии от индуктора.

ЛИЭП содержит многовитковый индуктор 1, электропроводящий 2а или ферромагнитный якорь 2б и ферромагнитный экран 3, состоящий из дискового основания 3а и наружной обечайки 3б (рис. 1).

Расстояние между смежно-расположенными сторонами индуктора и экрана заполнено изоляцией толщиной  $\delta=1$  мм. Якорь перемещает исполнительный элемент массой 0,5 кг (на рис. 1 не показан) на расстояние рабочего хода 9,5 мм. Индуктор ЛИЭП содержит  $N_1=46$  витков медной шины сечением  $a \times b=1,8 \times 4,8$  мм<sup>2</sup> и выполнен с наружным диаметром  $D_{ex1}=100$  мм, внутренним диаметром  $D_{in1}=10$  мм и высотой  $H_1=10$  мм. Электропроводящий якорь имеет наружный диаметр  $D_{ex2}=100$  мм, внутренний диаметр  $D_{in2}=10$  мм и высоту  $H_2=2,5$  мм. Ферромагнитный якорь имеет наружный диаметр  $D_{ex2}=118$  мм, внутренний диаметр  $D_{in2}=10$  мм и высоту  $H_2=4$  мм. Ферромагнитный экран содержит дисковую часть с наружным диаметром  $D_{ex3b}=118$  мм, с внутренним диаметром  $D_{in3b}=102$  мм и высотой  $H_{3a}=10$  мм. Высота наружной обечайки экрана  $H_{3b}=24$  мм для ЛИЭП индукционного типа и  $H_{3b}=21$  мм – для ЛИЭП электромагнитного типа. В ЛИЭП электромагнитного типа ферромагнитный экран содержит внутреннюю цилиндрическую часть, охваченную индуктором.

Индуктор возбуждается от ЕНЭ емкостью  $C=2850$  мкФ и зарядным напряжением  $U_0=400$  В аperiodическим импульсом (индуктор шунтирован обратным диодом).

На рис. 2 показаны электромеханические характеристики ЛИЭП электромагнитного (а) и индукционного (б) типов. В обоих вариантах ток в индукторе плотностью  $j_1$  имеет характер аperiodического импульса. Однако в ЛИЭП электромагнитного типа величина токового импульса примерно в 2 раза меньше, а длительность существенно больше, чем в ЛИЭП индукционного типа.

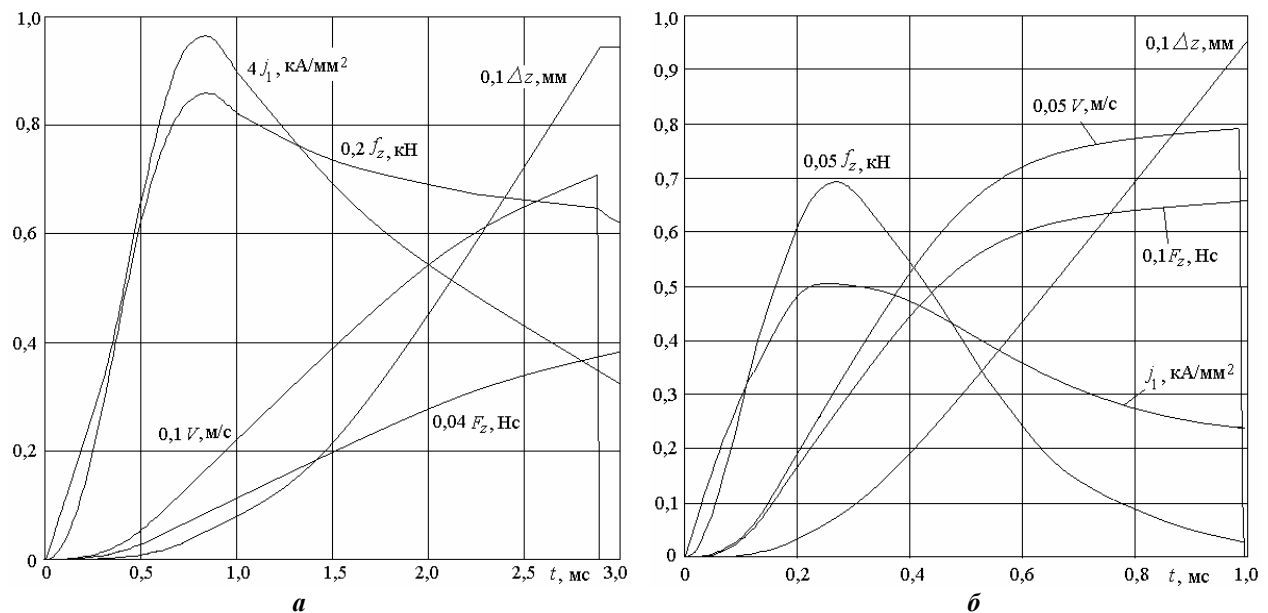


Рис. 2

Величина индукционно-динамической силы отталкивания  $f_z$ , действующая на электропроводящий якорь, в 3,2 раза больше величины электромагнитной силы притяжения  $f_z$ , действующей на ферромагнитный якорь. Однако импульс силы, действующий на подвижный якорь,  $F_z = \int f_z dt$  к концу токового импульса примерно в 3 раза больше в ЛИЭП электромагнитного типа, что объясняется большим временем воздействия на ферромагнитный якорь. При этом силовое воздействие на якорь продолжается даже после прохождения расстояния рабочего хода и его контакта с индуктором.

Перемещение  $\Delta z$  электропроводящего якоря происходит с большей скоростью  $V$ , чем перемещение ферромагнитного якоря. В момент прохождения расстояния рабочего хода скорость якоря с исполнительным элементом в ЛИЭП индукционного типа в 2,2 раза больше, а КПД, оцениваемое как отношение энергии ЕНЭ к кинетической энергии подвижных масс, в 1,67 раз больше, чем у ЛИЭП электромагнитного типа.

На рис. 1 показано распределение магнитного поля в ЛИЭП в момент максимума силы, действующей на якорь. В ЛИЭП электромагнитного типа наибольшее поле возникает во внутренней цилиндрической части, охваченной индуктором. А в ЛИЭП индукционного типа наибольшее поле концентрируется в пространстве между индуктором и якорем. При этом магнитное поле рассеяния в ЛИЭП электромагнитного типа в 2,8 раз больше, чем в ЛИЭП индукционного типа, что нежелательно с точки зрения магнитной совместимости преобразователя.

Таким образом, можно отметить следующие особенности сравниваемых ЛИЭП. В ЛИЭП электромагнитного типа электрохимические процессы протекают медленнее при меньшей величине тока в индукторе, но обеспечивается больший импульс силы. ЛИЭП индукционного типа развивает большую скорость исполнительного элемента при меньших полях рассеяния и более высоком КПД. Поэтому ЛИЭП индукционного типа целесообразно использовать для обеспечения высокоскоростного линейного перемещения исполнительного элемента, а ЛИЭП электромагнитного типа – для создания мощных силовых импульсов [3].

1. Ивашин В.В., Пенчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 42–46.
2. Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // Электротехника. – 2006. – № 1. – С. 24–27.
3. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48. – No 11. – Pp. 3315–3318.
4. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82. – No 2. – Pp. 104–110.
5. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No 7. – Pp. 425–431.
6. Zhiltsov A., Kondratenko I., Sorokin D. Mathematical modeling of nonstationary electromechanical processes i coaxial-linear engine // ECONTechMOD, Lublin-Lviv-Cracow. – 2012. – Vol. 12. – No 2. – Pp. 69–73.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПІВ

**В.Ф.Болюх**, докт.техн.наук, **С.В.Олексенко**, **І.С.Щукін**, канд.техн.наук  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна, e-mail: [vfbolyukh@gmail.com](mailto:vfbolyukh@gmail.com)

Виконано порівняльний аналіз лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів (ЛІЕП) електромагнітного та індукційного типів з феромагнітним екраном, що охоплює індуктор, який збуджується від ємнісного накопичувача енергії аперіодичним імпульсом. Розроблена математична модель ЛІЕП, яка враховує просторово-розподілені та змінювані у часі взаємопов'язані електромагнітні, механічні та теплові процеси. Показано, що в ЛІЕП електромагнітного типу електромеханічні процеси протікають повільніше при меншій величині струму в індукторі, але забезпечується більший імпульс сили. ЛІЕП індукційного типу розвиває більшу швидкість виконавчого елемента при менших магнітних полях розсіювання та більш високому ККД. Бібл. 6, рис. 2.

**Ключові слова:** лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач електромагнітного та індукційного типів, феромагнітний екран.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF LINEAR PULSE ELECTROMECHANICAL CONVERTERS ELECTROMAGNETIC AND INDUCTION TYPES

**V.F.Bolyukh**, **S.V.Oleksenko**, **I.S.Shchukin**  
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Frunze st., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: [vfbolyukh@gmail.com](mailto:vfbolyukh@gmail.com)

The comparative analysis of the with a ferromagnetic screen covering the inductor, which is excited by capacitive energy storage aperiodic pulse, is made. The mathematical model of LPEC that takes into account spatially distributed and time-varying interconnected electromagnetic, mechanical and thermal processes is developed. It is shown that the electromechanical processes in the LPEC of electromagnetic type is more slowly at a smaller magnitude of the current in the inductor, but provide more impulse of force. LPEC of induction type develops greater speed of the actuator at lower stray magnetic fields and higher efficiency.

References 6, figures 2.

**Key words:** linear pulse electromechanical converter of electromagnetic and induction types, ferromagnetic screen.

1. Ivashin V.V., Penchev V.P. Features of the dynamics of work and energy diagrams of pulsed electromagnetic drive with parallel and series connection of excitation windings // Elektrotehnika. – 2013. – No 6. – Pp. 42–46. (Rus)
2. Tomaszewski D.N., Koshkin A.N. Modelling of linear impulse motors // Elektrotehnika. – 2006. – No 1. – Pp. 24–27. (Rus)
3. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48. – No 11. – Pp. 3315–3318.
4. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82. – No 2. – Pp. 104–110.
5. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No 7. – Pp. 425–431.
6. Zhiltsov A., Kondratenko I., Sorokin D. Mathematical modeling of nonstationary electromechanical processes i coaxial-linear engine // ECONTechMOD, Lublin-Lviv-Cracow. – 2012. – Vol. 12. – No 2. – Pp. 69–73.

Надійшла 03.02.2016  
Остаточний варіант 25.05.2016