УДК 621.313:536.2.24:539.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ИНДУКЦИОННОГО ТИПА

В.Ф.Болюх, 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: vfbolyukh@gmail.com**

Проведен сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей (ЛИЭП) электромагнитного и индукционного типа с ферромагнитным экраном, охватывающим индуктор, который возбуждается от емкостного накопителя энергии апериодическим импульсом. С помощью программы Comsol проведено моделирование пространственно-распределенных и изменяемых во времени взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых процессов ЛИЭП. Показано, что в ЛИЭП электромагнитного типа электромеханические процессы протекают медленнее при меньшей величине тока в индукторе, но обеспечивается больший импульс силы. ЛИЭП индукционного типа развивает большую скорость исполнительного элемента при меньших магнитных полях рассеяния и более высоком КПД. Библ. 6, рис. 2.
Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь электромагнитного и индукционного типа, ферромагнитный экран.

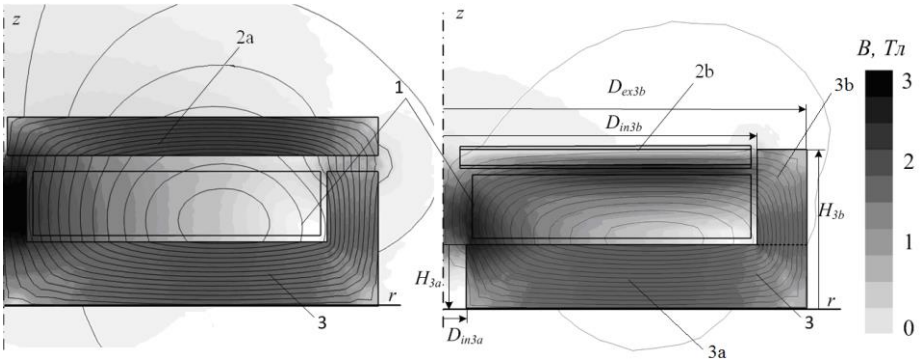
Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) электромагнитного и индукционного типов широко используются в различных отраслях промышленных, при проведении научных исследований и испытаний, в системах защиты различного назначения и др. для обеспечения высокоскоростного линейного перемещения исполнительного элемента или для создания мощных силовых импульсов на объект воздействия [1-3]. 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.

В коаксиальном ЛИЭП дисковой конфигурации якорь устанавливается напротив торцевой стороны индуктора. В исходном положении ферромагнитный якорь устанавливается на расстоянии рабочего хода от индуктора, а электропроводящий якорь – на минимальном расстоянии от индуктора.

Рассмотрим коаксиальный ЛИЭП дисковой конфигурации с ферромагнитным экраном, который охватывает индуктор с противоположной якорю торцевой и наружной боковой сторон [5]. Ферромагнитные экран и якорь для устранения внутренних вихревых токов выполнены из магнитодиэлектрика с магнитными свойствами стали марки Ст.10 [6]. Несмотря на широкое применение ЛИЭП электромагнитного и индукционного типа 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 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



а *б*

Рис. 1

© Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С., 2016

расчетном временном шаге учитывается распределение индуцированного тока по сечению массивного электропроводящего якоря, теплоотдача элементов при естественном охлаждении и аэродинамическое сопротивление среды при движении якоря [5]. Математическая модель ЛИЭП реализована в программном пакете *Comsol Multiphysics* 4.4.

Рассмотрим ЛИЭП, содержащий многовитковый индуктор *1*, ферромагнитный *2a* или электропроводящий *2b* якорь и ферромагнитный экран *3*, состоящий из дискового основания *3a* и наружной обечайки *3b* (рис. 1).

Расстояние между смежно-расположенными сторонами индуктора и экрана заполнено изоляцией толщиной δ=1 мм. Якорь перемещает исполнительный элемент массой 0,5 кг (на рис. 1 не показан) на расстояние рабочего хода 9,5 мм. Индуктор ЛЭИП содержит N_1=46 витков медной шины сечением $a\times b$=1,8×4,8 мм^2 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 ЛЭИП 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 апериодическим импульсом (индуктор шунтирован обратным диодом).

В результате моделирования получены электромеханические характеристики ЛИЭП электромагнитного (*а*) и индукционного (*б*) типов (рис. 2). В обеих вариантах ток в индукторе плотностью j_1 имеет характер апериодического импульса. Однако в ЛИЭП электромагнитного типа величина токового импульса примерно в 2 раза меньше, а длительность существенно больше, чем в ЛИЭП индукционного типа.

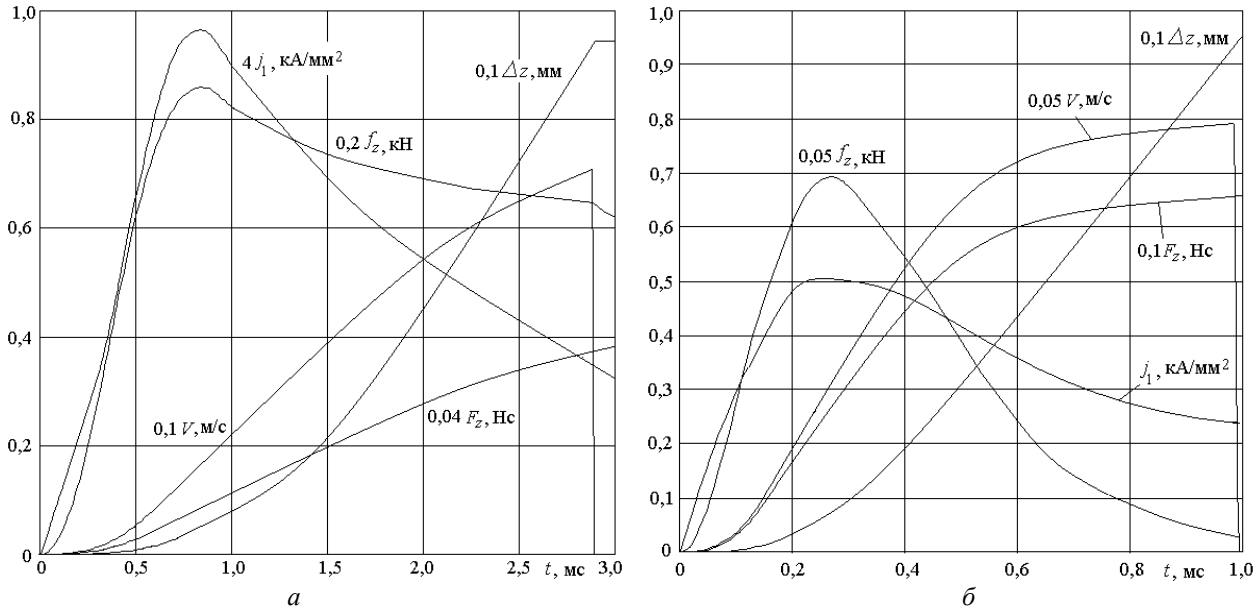


Рис. 2

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 ферромагнитный якорь продолжается даже после прохождения расстояния рабочего хода.

Перемещение Δ*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 для близко расположенных электронных устройств или биологических объектов.

Таким образом, можно отметить следующие особенности сравниваемых ЛИЭП. В ЛИЭП электромагнитного типа электромеханические 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 [4].

1. *Zhiltsov A., Kondratenko I., Sorokin D.* Mathematical modeling of nonstationary electromechanical processes in coaxial-linear engine // ECONTECHMOD, Lublin-Lviv-Cracow. – 2012. – Vol.12, № 2. – P. 69 –73.

2. *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.

3. *Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н.* Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // Электротехника. – 2006. - № 1. – С. 24-27.

4. *Bissal A., Magnusson J., Engdahl G.* Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48. – №11. – Pp. 3315-3318.

5. *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.

6. *Bolyukh V.F., Oleksenko S.V.* The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear in-duction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – № 7. – Pp. 425-431.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ

В.Ф.Болюх, докт.техн.наук, **С.В.Олексенко**, **І.С.Щукін**, канд.техн.наук

Національний технічний університет «Харківський політехнний інститут»

вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

Виконано порівняльний аналіз лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів (ЛІЕП) електромагнітного та індукційного типу з феромагнітним екраном, що охоплює індуктор, який збуджується від ємнісного накопичувача енергії аперіодичним імпульсом. За допомогою програми Comsol проведено моделювання просторово-розподілених та змінюваних у часі взаємопов'язаних електромагнітних, механічних та теплових процесів ЛІЕП. 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 елементу при менших магнітних полях розсіювання та більш високому ККД. Бібл. 6, рис. 2.

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF LINEAR PULSE ELECTROMECHANICAL CONVERTERS ELECTRO-MAGNETIC AND INDUCTION TYPE

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

The comparative analysis of the with a ferromagnetic screen covering the inductor, which is excited by capacitive energy storage aperiodic pulse, is made. By means of simulation software Comsol carried out spatially distributed and interconnected time-varying electromagnetic, mechanical and thermal processes LIEP. It is shown that the electromechanical processes in the LPEC of electro-magnetic type is more slowly at a smaller magnitude of the current in the inductor, but provide more impulse of force. LPEC of in-duction 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 type, ferromagnetic screen.

1. *Zhiltsov A., Kondratenko I., Sorokin D.* Mathematical modeling of nonstationary electromechanical processes in coaxial-linear engine // ECONTECHMOD, Lublin-Lviv-Cracow. – 2012. – Vol.12, № 2. – P. 69 –73.

2. *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 // Electrical engineering. – 2013. – № 6. – Pp.42-46. (Rus)

3. *Tomaszewski D.N., Koshkin A.N.* Modelling of linear impulse motors // Electrical engineering. - 2006. - № 1. - P. 24-27 (Rus).

4. *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.

5. *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.

6. *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.

Надійшла 03.02.2016
Остаточний варіант