

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ЛИНЕЙНЫХ УДАРНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

Запропонована концепція лінійного електромеханічного перетворювача комбінованого типу з єдиним індуктором, що збуджується від ємнісного накопичувача енергії аперіодичним імпульсом, яка об'єднує індукційний та електромеханічний перетворювачі. Для вибору параметрів перетворювачів використано метод Монте-Карло. В якості цільової функції вибрана найбільша величина імпульсу сили, утвореного електродинамічною та електромагнітною силами, що діє на комбінований якорь. Встановлені особливості електромеханічних характеристик та магнітних полів перетворювачів. Розглянуто декілька стратегій вибору та за допомогою інтегрального показника визначені найбільш та найменш ефективні конструктивні схеми перетворювачів. Бібл. 16, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: лінійний ударний електромеханічний перетворювач, електропровідний елемент якоря, ферромагнітний елемент якоря, електродинамічні сили, електромагнітні сили, стратегія вибору, інтегральний показник ефективності.

Предложена концепция линейного ударного электромеханического преобразователя комбинированного типа с единым индуктором, возбуждаемым от емкостного накопителя энергии аперiodическим импульсом, объединяющая индукционный и электромагнитный преобразователи. Для выбора параметров преобразователей использован метод Монте-Карло. В качестве целевой функции выбрана наибольшая величина импульса силы, созданного электродинамической и электромагнитной силами, действующего на комбинированный якорь. Установлены особенности электромеханических характеристик и магнитных полей преобразователей. Рассмотрено несколько стратегий выбора и при помощи интегрального показателя определены наиболее и наименее эффективные конструктивные схемы преобразователей. Библ. 16, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: линейный ударный электромеханический преобразователь, электропроводящий элемент якоря, ферромагнитный элемент якоря, электродинамические силы, электромагнитные силы, стратегия выбора, интегральный показатель эффективности.

Вступлення. Линейные ударные электромеханические преобразователи (ЛУЭП) широко используются в науке и технике, где необходимы значительные импульсные нагрузки при относительно небольшом перемещении исполнительного элемента (ИЭ) [1-3]. ЛУЭП применяются в электромагнитных молотах и перфораторах [4, 5], в сейсмоисточниках [6], в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки [7], в системах очистки вагонов, трюмов, фильтров и иных емкостей от остатков продуктов и налипших материалов [8], в системах защиты информации на цифровых накопителях [9] и т.п.

Существует ряд типов ЛУЭП, но наиболее эффективными являются преобразователи индукционного (индукционно-динамического) и электромагнитного типов [3, 5]. В этих преобразователях имеется многовитковый индуктор, который возбуждается от импульсного источника энергии, например, емкостного накопителя. Магнитное поле индуктора воздействует на подвижный якорь, который совершает перемещение с ударным ИЭ.

В ЛУЭП индукционного типа якорь является электропроводящим и за счет индуцированных вихревых токов на него со стороны индуктора действует электродинамическая сила отталкивания f_i . В ЛУЭП электромагнитного типа якорь является ферромагнитным и на него со стороны индуктора действует электромагнитная сила притяжения f_e .

Указанные ударные преобразователи, как правило, имеют коаксиальную конфигурацию. Они содержат неподвижный многовитковый индуктор, который возбуждается от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), и якорь, который аксиально перемещается вместе с ИЭ за счет воздействия на него магнитного поля индуктора.

Для ЛУЭП индукционного и электромагнитного типов характерен ряд взаимоисключающих особенностей рабочего процесса. Так в ЛУЭП индукционного типа наибольшие величины электродинамической силы отталкивания f_i и скорости якоря V достигаются в начале рабочего процесса. В этом преобразователе исходно расстояние между якорем и индуктором выбирается минимально возможным. При этом величина рабочего хода якоря, который, как правило, выполняется в виде тонкого медного диска, ограничивается упором, устанавливаемым на необходимом расстоянии от индуктора.

В ЛУЭП электромагнитного типа, наоборот, наибольшие значения электромагнитной силы притяжения f_e и скорости якоря V достигаются в конце рабочего процесса при взаимодействии, например соударении, ферромагнитного якоря с индуктором. Якорь выполняется в виде относительно толстого ферромагнитного диска и исходно устанавливается на определенном расстоянии от индуктора, которое и определяет величину рабочего хода якоря.

Как показывает анализ, эффективность ЛУЭП индукционного и электромагнитного типа относительно невысока [10]. Поэтому актуальным представляется подход, при котором предлагаются новые конструктивные схемы ЛУЭП, объединяющие элементы нескольких типов электромеханических преобразователей ударного действия [11].

Концепция ЛУЭП комбинированного типа. Рассмотрим концепцию ЛУЭП комбинированного типа, которая объединяет в себе элементы ударных преобразователей индукционного и электромагнитного типов. В предлагаемой концепции ЛУЭП комбинированного типа содержится единый индуктор и два

взаимосвязанных между собой якоря. Один якорь выполняется электропроводящим и исходно устанавливается на минимальном расстоянии от индуктора, а второй якорь выполняется ферромагнитным и исходно устанавливается на расстоянии рабочего хода от индуктора в аксиальном направлении.

Таким образом, в предлагаемой концепции ЛУЭП содержит комбинированный якорь, представляющий собой взаимосвязанные между собой электропроводящий (ЭЭЯ) и ферромагнитный (ФЭЯ) элементы якоря. Расположение элементов якорей относительно индуктора в ЛУЭП комбинированного типа должно быть таким, чтобы направления действия электродинамической силы отталкивания f_i на ЭЭЯ и электромагнитной силы притяжения f_e на ФЭЯ относительно индуктора совпадали в аксиальном направлении.

Предлагаемая концепция ЛУЭП комбинированного типа включает ферромагнитный сердечник (ФС), усиливающий магнитные поля в активных зонах элементов комбинированного якоря и уменьшающий поле рассеяния. Учитывая быстрдействие протекания рабочего процесса, ФС и ФЭЯ должны иметь минимальную электропроводность. В качестве источника питания используем ЕНЭ с электронной схемой, формирующей апериодический импульс тока в индукторе (индуктор шунтирован обратным диодом). Это позволяет использовать электролитические конденсаторы повышенной удельной энергоемкости.

Однако конструктивные схемы данной концепции ЛУЭП комбинированного типа не разработаны и не исследованы.

Целью статьи является разработка и сравнительный анализ конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа.

Математическая модель ЛУЭП с ферромагнитным сердечником и ЭЭЯ, которая применима и для рассматриваемого преобразователя, представлена в работах [12, 13].

Постановка задачи выбора параметров ЛУЭП комбинированного типа. Для конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа выбираем постоянные параметры и параметрические ограничения. В качестве постоянных параметров ЛУЭП комбинированного типа принимаем:

- рабочий ход $\Delta Z = 5$ мм;
- высоту ЭЭЯ $H_2 = 3$ мм;
- исходное расстояние между индуктором и ЭЭЯ $\delta = 1$ мм;
- количество витков индуктора $N_1 = 46$;
- сечение шины $a \times b$ индуктора $S_1 = 8,64$ мм²;
- массу ИЭ $m_e = 0,5$ кг;
- емкость ЕНЭ $C = 2850$ мкФ;
- напряжение ЕНЭ $U_0 = 400$ В.

В качестве ограничений геометрических параметров ЛУЭП используем следующие соотношения:

- наружный диаметр $D_{ex} < 125$ мм;
- высота $H_{ex} < 75$ мм;
- внешний диаметр индуктора $D_{ex1} < D_{ex}$;
- внутренний диаметр индуктора $D_{in1} < D_{ex1}$;
- высота индуктора $H_1 = 2(D_{ex1} - D_{in1})^{-1} \cdot K_z^{-1} \cdot N_1 \cdot a \times b$;

- внешний диаметр ЭЭЯ $D_{ex2} < D_{ex}$;
 - внутренний диаметр ЭЭЯ $D_{in2} < D_{ex2}$;
 - внешний диаметр ЭЭЯ $D_{ex2} = D_{ex1}$;
 - внутренний диаметр ЭЭЯ $D_{in2} = D_{in1}$;
 - внешний диаметр ФЭЯ $D_{ex3} < D_{ex}$;
 - внутренний диаметр обечайки ФЭЯ $D_{in3} < D_{ex1}$;
 - высота ФЭЯ $H_3 < H_{ex} - \Delta Z - H_4$;
 - внешний диаметр внутреннего цилиндра ФС $D_{ex4} < D_{ex1}$;
 - внешний диаметр диска ФС $D_{ex4} < D_{ex}$,
- где K_z – коэффициент заполнения индуктора.

Считаем, что многовитковый индуктор 1 и ЭЭЯ 2, который выполнен в форме массивного диска или плоского кольца, изготовлены из технической меди. ФЭЯ 3 и ФС 4 изготовлены из магнетодиэлектрика со свойствами стали марки Ст.10 (AISI 1010, UNS G10100). Указанные обозначения активных элементов ЛУЭП будут использоваться в последующем.

Для выбора геометрических параметров каждой из конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа используем метод Монте-Карло. В качестве целевой функции выбираем наибольшую величину импульса силы $F_z = \int f_z dt$, действующего на комбинированный якорь.

КПД ЛУЭП будем оценивать соотношением [3]:

$$\eta = (m_a + m_e) V^2 C^{-1} U_0^{-2},$$

где m_a – масса комбинированного якоря; V – скорость якоря с ИЭ.

Для оценки эффективности предлагаемых конструктивных схем в качестве базового варианта используем ЛУЭП индукционного типа, удовлетворяющий указанным ограничениям, основные показатели и характеристики которого представлены в работе [14] (рис. 1). Указанная на рис. 1 шкала интенсивности индукции магнитного поля B будет единой для всех последующих рисунков.

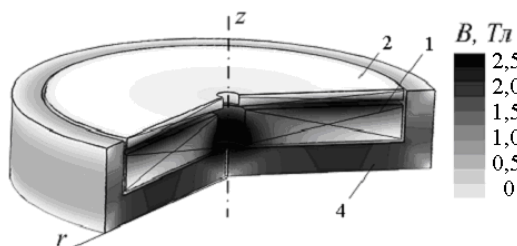


Рис. 1. Базовый вариант ЛУЭП с распределением магнитного поля в момент максимума тока индуктора: 1 – индуктор; 2 – ЭЭЯ; 4 – ФС

В базовом варианте ЛУЭП, в котором отсутствует ФЭЯ, а ФС выполнен в виде диска с наружной цилиндрической обечайкой, которые охватывают индуктор, можно отметить следующий характер распределения магнитного поля (рис. 2). Магнитное поле рассеяния наблюдается на торцевых сторонах преобразователя. Максимальные значения индукции магнитного поля наблюдаются в диске ФС и в области внутреннего отверстия индуктора. Наименьшие значения индукции наблюдаются в области индуктора, смежной с участком соединения дисковой и цилиндрической частей ФС.

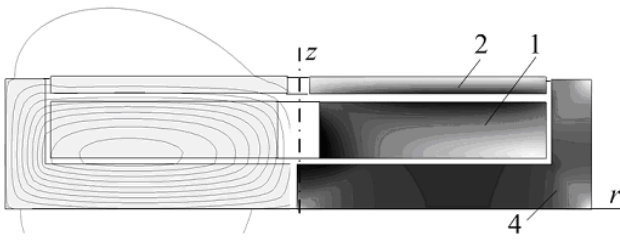


Рис. 2. Распределение магнитного поля в базовом варианте ЛУЭП в момент максимума тока индуктора

Рассмотрим следующие варианты конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа (рис. 3):

- ФЭЯ выполнен в виде диска и наружной обечайки, которые охватывает индуктор с торцевой и наружной боковой стороны; ФС содержит цилиндр, охваченный индуктором (варианты схем № 1 – 3);
- ФЭЯ выполнен в виде цилиндра, расположенного во внутреннем отверстии индуктора (вариант схемы № 4);
- ФЭЯ выполнен в виде диска, наружный диаметр которого совпадает с наружным диаметром ФС (вариант схемы № 5);
- Индуктор, ЭЭЯ и ФЭЯ расположены в пазу ФС (варианты схем № 6, 7);
- ФЭЯ выполнен в виде внутреннего цилиндра и диска, наружный диаметр которого совпадает с наружным диаметром ФС (вариант схемы № 8).

Для того чтобы понять работу ЛУЭП комбинированного типа рассмотрим электромеханические характеристики одного из вариантов конструктивных схем. Рассмотрим конструктивную схему № 1, в которой ФЭЯ выполнен в виде диска и наружной обечайки, а ФС выполнен в виде цилиндра, охваченного индуктором. На рис. 4 показано изменение плотности тока в индукторе j_1 в течение рабочего хода якоря ЛУЭП.

Ток в индукторе имеет выраженный импульсный характер с максимальной плотностью $j_1 = 323 \text{ А/мм}^2$ при $t = 0,8 \text{ мс}$. Со стороны индуктора на ЭЭЯ действует электродинамическая сила отталкивания f_i , а на ФЭЯ – электромагнитная сила притяжения f_e , которые формируют результирующую аксиально-направленную силу f_z , действующую на комбинированный якорь. Электродинамическая сила f_i имеет импульсный характер, достигая максимального значения 12,15 кН. Максимум этой силы возникает несколько раньше, чем максимум тока индуктора, что обусловлено индуцированным током ЭЭЯ [12].

Характер изменения электромагнитной силы f_e , которая действует на ФЭЯ, отличается от характера изменения электродинамической силы f_i . Если бы ток в индукторе был постоянным, то при перемещении ФЭЯ к индуктору магнитное поле в активной зоне должно было бы усиливаться, а сила притяжения ФЭЯ к индуктору – возрастать. Но поскольку в процессе перемещения ФЭЯ ток в индукторе через 0,8 мс уменьшается, то увеличение силы притяжения f_e после этого момента времени практически не происходит. В характере изменения электромагнитной силы f_e можно отметить возрастание до максимальной величины 4,15 кН при $t = 1,0 \text{ мс}$, после чего наблюдается незначительное уменьшение силы и последующее повторное увеличение до момента соударения ФЭЯ с индуктором.

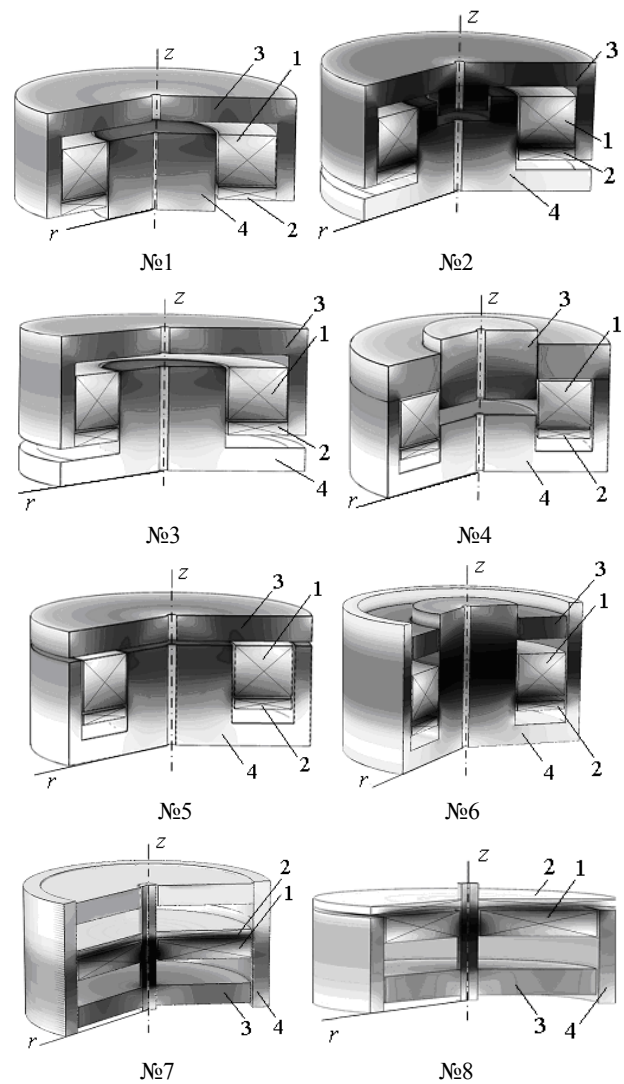


Рис. 3. Варианты конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа и распределения магнитных полей в момент максимума тока в индукторе:

1 – индуктор; 2 – ЭЭЯ; 3 – ФЭЯ; 4 – ФС

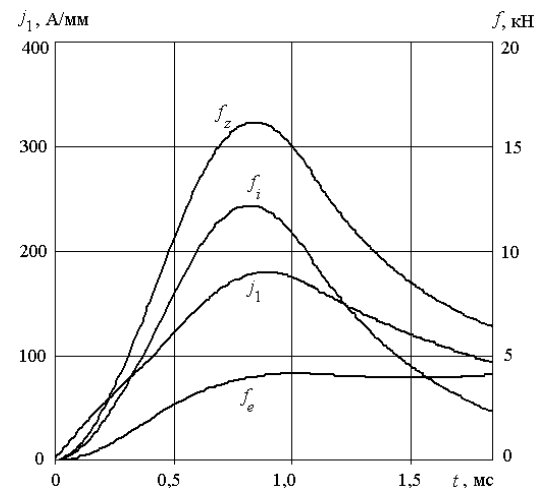


Рис. 4. Плотность тока индуктора и силы, действующие на якорь и его элементы в течение рабочего хода

Поскольку ЭЭЯ и ФЭЯ соединены между собой, то возникающая при этом результирующая аксиально-направленная сила f_z имеет выраженный импульсный характер с максимальным значением 16,14 кН

в момент времени $t = 0,8$ мс. Характер изменения результирующей силы f_z во многом повторяет характер изменения электродинамической силы f_i . Однако после достижения максимального значения и до момента соударения ФЭЯ с индуктором затухание силы f_z происходит более медленно по сравнению затуханием электродинамической силы f_i .

Как следствие указанных процессов импульсы сил, действующие на элементы комбинированного якоря, имеют следующие особенности (рис. 5).

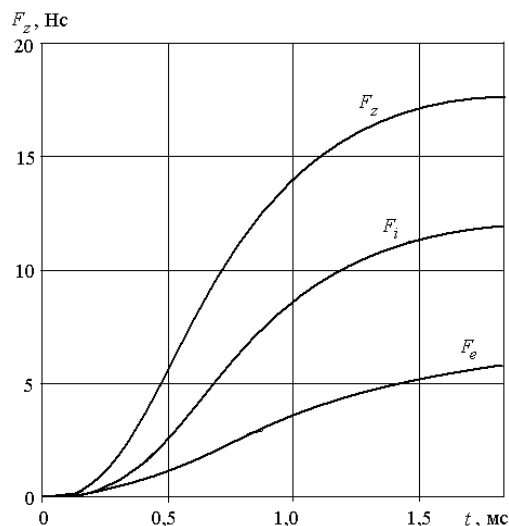


Рис. 5. Импульсы сил, действующие на якорь и его элементы в течение рабочего хода ЛУЭП

Импульс электродинамической силы F_i , действующий на ЭЭЯ, резко возрастает примерно до момента времени $t = 0,8$ мс, после чего его рост замедляется, достигая максимального значения 11,9 Нс в конце рабочего хода. Импульс электромагнитной силы F_e , действующий на ФЭЯ, также возрастает, но практически без замедления роста, достигая максимального значения 5,8 Нс в конце рабочего хода. В результате совместного действия электродинамической и электромагнитной сил на комбинированный якорь действует импульс результирующей аксиально-направленной силы F_z , который достигает величины 17,7 Нс, что более чем в 2,2 раза превышает импульс силы в базовом варианте ЛУЭП.

Под действием импульса результирующей аксиально-направленной силы F_z комбинированный якорь вместе с ИЭ совершает перемещение ΔZ со скоростью V (рис. 6). Их скорость постоянно возрастает, достигая максимального значения $V_m = 5,55$ м/с в конце рабочего хода. При этом наблюдается замедление роста скорости V , особенно после момента времени $t = 1,0$ мс. Отметим, что данная скорость почти на 37 % меньше, чем в базовом варианте ЛУЭП. Это объясняется тем, что масса комбинированного якоря почти в 7 раз больше массы базового варианта ЛУЭП. КПД ЛУЭП комбинированного типа возрастает на 36 % по сравнению с базовым вариантом.

Оценку эффективности указанных выше конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа проведем при помощи безразмерных параметров, отнесенных к соответствующим параметрам базового варианта ЛУЭП.

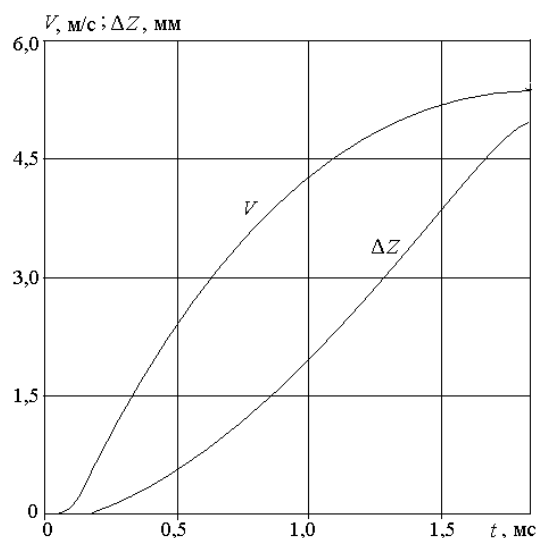


Рис. 6. Скорость и перемещение якоря в течение рабочего хода ЛУЭП

Для базового варианта ЛУЭП получены следующие электромеханические показатели: максимальная скорость $V_m = 8,52$ м/с, максимальная величина электродинамической силы $f_{zm} = 15,22$ кН, импульс силы $F_z = 7,99$ Нс, максимальная плотность тока в индукторе $j_{im} = 523,6$ А/мм² и КПД $\eta = 7,07$ % [10, 11]. Этот ЛУЭП имеет следующие массогабаритные показатели: масса якоря $m_a = 0,204$ кг, общая масса $m = 2,221$ кг и высота $G = 25$ мм.

В табл. 1 представлены относительные показатели конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа с выбранными параметрами.

Как видно из табл. 1, максимальная электродинамическая сила отталкивания f_{im} уменьшается в конструктивных схемах ЛУЭП № 1 – 6 на 20-35 % и незначительно увеличивается в схемах ЛУЭП № 7, 8 по сравнению с базовым вариантом.

Таблица 1

Относительные показатели конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа

| № схемы ЛУЭП | j_{im}^* | f_{im}^* | f_{zm}^* | F_i^* | F_z^* | V_m^* | η^* | m_a^* | m^* | G^* |
|--------------|------------|------------|------------|---------|---------|---------|----------|---------|-------|-------|
| 1 | 0,340 | 0,798 | 1,060 | 1,490 | 2,218 | 0,651 | 1,360 | 6,970 | 1,243 | 1,8 |
| 2 | 0,349 | 0,810 | 1,058 | 1,532 | 2,229 | 0,635 | 1,321 | 7,142 | 1,576 | 2,2 |
| 3 | 0,325 | 0,798 | 1,060 | 1,518 | 2,251 | 0,663 | 1,395 | 6,970 | 1,576 | 2,2 |
| 4 | 0,306 | 0,616 | 0,841 | 0,956 | 1,399 | 1,079 | 1,655 | 3,098 | 1,679 | 2,8 |
| 5 | 0,307 | 0,626 | 1,105 | 0,711 | 1,249 | 0,852 | 1,494 | 4,480 | 1,576 | 2,2 |
| 6 | 0,332 | 0,727 | 0,761 | 1,340 | 1,485 | 0,971 | 2,312 | 5,348 | 1,790 | 3,0 |
| 7 | 0,563 | 1,093 | 1,178 | 1,117 | 1,388 | 0,736 | 1,164 | 4,676 | 1,538 | 2,4 |
| 8 | 0,579 | 1,101 | 1,188 | 1,070 | 1,349 | 0,669 | 0,959 | 4,656 | 1,046 | 1,6 |

Однако за счет электромагнитной силы притяжения f_e результирующая сила f_z , действующая на комбинированный якорь, примерно такая же, как в базовом варианте ЛУЭП. Только в конструктивных схемах ЛУЭП № 4 и № 6 указанная сила снижается.

Импульс результирующей силы F_z возрастает по сравнению с базовым вариантом для всех конструктивных схем ЛУЭП: более чем в 2,2 раза для схем ЛУЭП №1-3 и в 1,2-1,4 раза для схем ЛУЭП №4-8. За счет увеличения массы комбинированного якоря в 3-7 раз его скорость в основном снижается до 35 % по сравнению с базовым вариантом. Массогабаритные показатели ЛУЭП комбинированного типа существ-

венно увеличиваются по сравнению с базовым вариантом. Но при этом уменьшается плотность тока в индукторе, что благоприятно для электронной схемы возбуждения.

КПД всех конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа выше, чем у базового варианта. Наибольшая величина КПД в схеме ЛУЭП № 6, которая более чем в 2,3 раза превышает величину КПД базового варианта.

Магнитные поля ЛУЭП комбинированного типа. Рассмотрим распределение магнитных полей в ЛУЭП комбинированного типа, конструктивные схемы которых представлены на рис. 3. На рис. 7 показано распределение силовых линий и интенсивности индукции магнитного поля в момент максимума тока индуктора для этих конструктивных схем ЛУЭП.

Рассмотрим магнитные поля в конструктивных схемах ЛУЭП, в которых ФЭЯ выполнен в виде диска с наружной обечайкой, а ФС содержит внутреннюю цилиндрическую часть, охваченную индуктором (схемы № 1 – 3) (рис. 7, а – в). В конструктивной схеме ЛУЭП № 1 магнитное поле рассеяния мало (рис. 7, а). Наибольшая индукция магнитного поля наблюдается на верхнем наружном участке ФС.

На рис. 7, б показана конструктивная схема ЛУЭП № 2. Здесь ФС выполнен с центральным пазом, в котором расположен внутренний цилиндр ФЭЯ, и диском, обращенным к ЭЭЯ.

В данном преобразователе наибольшая индукция магнитного поля наблюдается во внутреннем цилиндре ФЭЯ и верхней части ФС. При отсутствии внутреннего цилиндра ФЭЯ и центрального паза в ФС наибольшая индукция наблюдается в верхней части ФС и в области между индуктором и ЭЭЯ (рис. 7, в). Таким образом, наличие дисковой части ФС заметно усиливает поле, которое становится более равномерным в ФЭЯ.

Если ФЭЯ выполнен в виде цилиндра, расположенного во внутреннем отверстии индуктора (рис. 7, г), то максимальная индукция магнитного поля наблюдается в нижней его части у наружной боковой поверхности. При этом ФС практически является малонасыщенным. Если ФЭЯ выполнен в виде диска, наружный диаметр которого совпадает с наружным диаметром ФС (рис. 7, д), то магнитная индукция в верхней части конструктивной схемы ЛУЭП № 5 принимает наибольшие значения, а поле становится более равномерным.

При расположении ЭЭЯ и ФЭЯ в пазу ФС распределение магнитного поля существенно зависит от наружного диаметра внутреннего цилиндра ФС. Если наружный диаметр внутреннего цилиндра ФС значителен, то магнитное поле в активных элементах конструктивной схемы ЛУЭП № 6 относительно небольшое (рис. 7, е). Если указанный диаметр мал, то магнитная индукция во внутреннем цилиндре ФС превышает индукцию насыщения материала, из которого выполнен сердечник (рис. 7, ж, з). При этом существенно увеличивается индукция магнитного поля в области между индуктором и ЭЭЯ.

Стратегия выбора конструктивной схемы ЛУЭП комбинированного типа. Анализируя данные табл. 1, 2 и характер распределения магнитных полей,

сложно отдать предпочтение тому или иному варианту, поскольку эффективность ЛУЭП комбинированного типа характеризует ряд противоречивых показателей. ЛУЭП должен развивать наибольший импульс силы F_z , действующий на комбинированный якорь, и обладать максимальным КПД η . Но при этом масса m и габариты G такого ЛУЭП должны быть минимальными. Наименьшей должна быть и максимальная плотность тока в индукторе j_{1m} , что важно для электронной системы возбуждения. Учитывая данные обстоятельства, введем интегральный показатель эффективности, учитывающий основные показатели ЛУЭП, значимость которых оценивается весовыми коэффициентами, определяемые из принятой стратегии выбора конструктивной схемы [15].

Для ЛУЭП комбинированного типа интегральный показатель эффективности, учитывающий максимальные значения импульса силы и КПД при минимальных массогабаритных показателях и плотности тока в индукторе, принимает вид:

$$K^* = \beta_1 \frac{j_{1m0}}{j_{1m}} + \beta_2 \frac{F_z}{F_{z0}} + \beta_3 \frac{\eta}{\eta_0} + \beta_4 \frac{m_0}{m} + \beta_5 \frac{G_0}{G},$$

где β_1 – весовой коэффициент, учитывающий максимальное значение плотности тока в индукторе j_{1m} ; β_2 – весовой коэффициент, учитывающий величину импульса силы, действующего на комбинированный якорь F_z ; β_3 – весовой коэффициент, учитывающий КПД ЛУЭП η ; β_4 – весовой коэффициент, учитывающий массу ЛУЭП m ; β_5 – весовой коэффициент, учитывающий габариты ЛУЭП G . Индексом «0» обозначены показатели базового варианта ЛУЭП.

Все весовые коэффициенты, указывающие степень важности соответствующего показателя в интегральном показателе эффективности ЛУЭП связаны соотношением [16]:

$$\sum_{i=1}^5 \beta_i = 1.$$

Рассмотрим шесть стратегий выбора наиболее эффективной конструктивной схемы ЛУЭП комбинированного типа, варианты которых представлены в табл. 2. Вариант стратегии выбора определяется соотношением весовых коэффициентов, которые задают приоритетность соответствующих показателей ЛУЭП.

Таблица 2
Варианты стратегии выбора конструктивной схемы ЛУЭП

| | I | II | III | IV | V | VI |
|-----------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|
| β_1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,1 | 0,1 |
| β_2 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| β_3 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| β_4 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,1 |
| β_5 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 |

В варианте стратегии выбора I все показатели оцениваются равнозначно. В варианте стратегии II наивысший приоритет отдан величине импульса силы, действующего на комбинированный якорь F_z , в варианте III – КПД η , а в варианте IV – максимальной плотности тока в индукторе j_{1m} . В вариантах II – IV массогабаритные показатели оцениваются наиболее низким приоритетом.

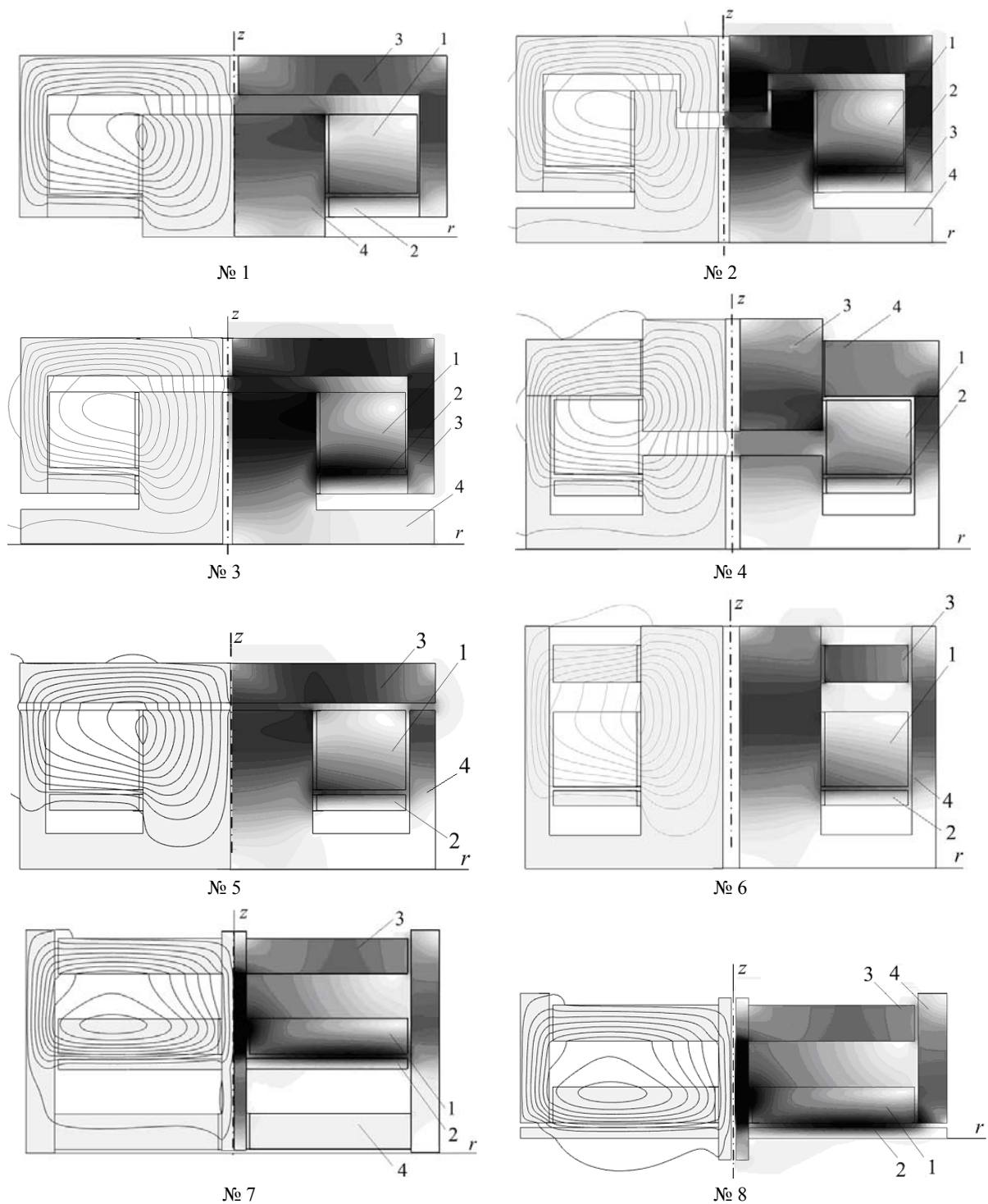


Рис. 7. Распределение магнитных полей в вариантах конструктивных схем ЛУЭП

В варианте стратегии выбора V наивысший приоритет отдан массе m , а в варианте VI – габаритам G ЛУЭП. При этом в варианте V наиболее низкий приоритет применен для максимальной плотности тока в индукторе j_{1m} и массы m ЛУЭП. А в варианте VI наивысший приоритет применен для максимальной плотности тока в индукторе j_{1m} и габаритам G ЛУЭП.

На рис. 8 представлены значения интегрального показателя эффективности для предложенных вариантов стратегии выбора конструктивной схемы ЛУЭП.

При равнозначности всех показателей (вариант стратегии I) и при наивысшем приоритете импульса силы F_2 (вариант стратегии II) наиболее эффективной

является конструктивная схема ЛУЭП № 1. Интегральный показатель эффективности данной схемы в 1,57 раз выше, чем в базовом варианте.

При наивысшем приоритете КПД η (вариант стратегии III) и максимальной плотности тока в индукторе j_{1m} (вариант стратегии IV) наиболее эффективной является конструктивная схема ЛУЭП № 6. Интегральный показатель эффективности данной схемы в варианте стратегии III в 1,91 раз выше, а в варианте стратегии IV – в 2,05 раз выше, чем в базовом варианте.

При наивысшем приоритете массы m , эффективность конструктивных схем ЛУЭП № 1 и № 6 примерно равна и является наивысшей (вариант страте-

гии выбора V). А при наивысшем приоритете габаритов G (вариант VI) наиболее эффективной является конструктивная схема ЛУЭП № 1.

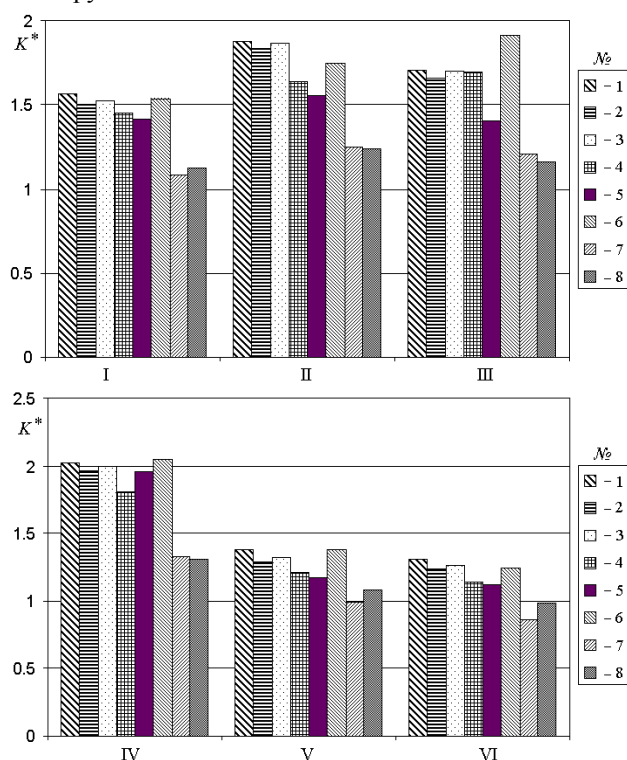


Рис. 8. Значения интегрального показателя эффективности при различных вариантах стратегии выбора конструктивной схемы ЛУЭП

Анализируя представленные варианты стратегий выбора конструктивной схемы ЛУЭП комбинированного типа, можно сделать следующие выводы.

Наиболее эффективными являются конструктивная схема ЛУЭП № 1, в которой ФЭЯ выполнен в виде диска с наружной обечайкой, а ФС содержит внутреннюю цилиндрическую часть, и конструктивная схема № 6, в которой индуктор, ЭЭЯ и ФЭЯ расположены в едином пазу ФС. Наименее эффективными являются конструктивные схемы ЛУЭП № 7 и № 8, у которых индуктор и ЭЭЯ выполнены в форме диска с малым внутренним отверстием.

Заключение. Предложена концепция ЛУЭП комбинированного типа с единым индуктором, возбуждаемым от емкостного накопителя энергии, объединяющая индукционный и электромагнитный преобразователи.

Для выбора параметров конструктивных схем ЛУЭП использован метод Монте-Карло, в котором в качестве целевой функции выбрана наибольшая величина импульса силы, созданного электродинамической и электромагнитной силами, действующего на комбинированный якорь.

Установлены особенности электромеханических характеристик и магнитных полей конструктивных схем ЛУЭП комбинированного типа.

При помощи нескольких стратегий выбора с использованием интегрального показателя определены наиболее и наименее эффективные конструктивные схемы ЛУЭП комбинированного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болюх В.Ф., Коритченко К.В. Основы напрямую розв'язку електромеханічних імпульсних прискорювачів // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №4. – С. 7-13.
2. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотров Д.В. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубке-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка. – 2001. – №2. – С. 28-32.
3. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
4. 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.
5. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах // Электротехника. – 2003. – №2. – С. 30-36.
6. 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.
7. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – №12. – С. 52-57.
8. Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. – 2002. – №11. – С. 24-28.
9. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного доступа на основе индукционно-динамического двигателя // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – С. 5-10.
10. Болюх В.Ф. Пути совершенствования линейных электромеханических преобразователей импульсного действия // Электротехніка і електромеханіка. – 2006. – №5. – С. 14-21.
11. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа // Электротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 5-11.
12. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – №6. – С. 20-27.
13. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // Measurement Techniques. – 2014. – vol.56. – iss.10. – pp. 1098-1104.
14. 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. – pp. 268-275.
15. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters // Russian Electrical Engineering. – 2004. – vol.75. – №12. – pp. 1-11.
16. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – vol.82. – №2. – pp. 104-110.

REFERENCES

1. Bolyukh V.F., Korytchenko K.V. Mainstreams of development of electromechanical impulse accelerators. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.4, pp. 7-13. (Rus).
2. Zdor G.N., Mamut A.V., Mamut V.S., Smotrakov D.V. Development of effective technological devices for magnetic elastic

impulse cutting-punching thin materials. *Metalloobrabotka – Metal Processing*, 2001, no.2, pp. 28-32. (Rus).

3. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye indukcionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).

4. Ugarov G.G., Neiman V.Y. Trends in the development and use of hand-held drum machines with electromechanical energy conversion. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika – Proceedings of the universities. Electromechanics*, 2002, no.2, pp. 37-43. (Rus).

5. Neiman V.Y. Analysis of the processes of energy conversion of linear electromagnetic machines with preliminary accumulation of magnetic energy in dynamic modes. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2003, no.2, pp. 30-36. (Rus).

6. Gurin A.G., Naboka B.G., Gladchenko V.J. Wave phenomena in electromagnetic emitters and the formation of complex acoustic signals. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2001, no.2, pp. 3-6. (Rus).

7. Tatmyshevsky K.V., Kozlov S.A. Magnetic pulse installation for testing products for aerospace shock effects. *Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace Instrument*, 2005, no.12, pp. 52-57. (Rus).

8. Tyutkin V.A. Magnetic pulse method for breaking arches and cleaning of process equipment from adhering materials. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2002, no.11, pp. 24-28. (Rus).

9. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V. F., Shchukin I.S. Device for computer information security from unauthorized access on the basis of an induction-dynamic motor. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.2, pp. 5-10. (Rus).

10. Bolyukh V.F. Ways of improvement of electromechanical linear impulse converters. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.5, pp. 14-21. (Rus).

11. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. Schematic constructive improvement of impact electromechanical induction type converters. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.5, pp. 5-11. (Rus).

12. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Influence of ferromagnetic core parameters on induction-type dynamic motor efficiency. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.6, pp. 20-27. (Rus).

13. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol.56, iss.10, pp. 1098-1104. doi: 10.1007/s11018-014-0337-z.

14. 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. pp. 268-275.

15. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*, 2004, vol.75, no.12, pp. 1-11.

16. 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. doi: 10.3103/s1068371211020027.

Поступила (received) 05.02.2015

Болюх Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
Олексенко Сергей Владимирович¹, аспирант,
Щукин Игорь Сергеевич^{1,2}, к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076427,
e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, oleksenko_sergii@mail.ru

²ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, S.V. Oleksenko¹, I.S. Schukin^{1,2}

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Firm Tetra, LTD,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

A comparative analysis of constructive schemes of linear impactor electromechanical converters combined type.

The concept of linear impactor electromechanical converter combined type with a single inductor excited by capacitive energy storage aperiodic pulse is proposed. The concept combines induction and electromagnetic converters. For the synthesis of the converter parameters the Monte Carlo method is used. As the objective function is selected the maximum value of the total pulse the electrodynamic and electromagnet force acting on the combined anchor. The features and characteristics of electro-magnetic field converters are identified. Considered several of selection policies and by means of integral index identified the most and least efficient design of the converter circuit. References 16, tables 2, figures 8.

Key words: linear impactor electromechanical converters, induction converter, electromagnetic converter, synthesis of the converter parameters, magnetic field, efficient design.