

В. Ф. БОЛЮХ, И. С. ЩУКИН

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ВОЗБУЖДЕНИЯ НА СИЛОВЫЕ И СКОРОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ УДАРНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНДУКЦИОННОГО И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ТИПОВ

На основе математической модели, что враховує взаємозалежні електричні, магнітні, механічні та теплові процеси, досліджено вплив коливально-загасаючого, однонапівперіодного і аперіодичного імпульсів збудження на показники лінійних ударних електромеханічних перетворювачів (ЛУЭП) індукційного і електродинамічного типів в режимах неробочого ходу, навантаження і гальмування. Показано, що найбільш високі швидкісні показники виникають в режимі неробочого ходу, коли обмотка якоря розганяється без виконавчого елемента, а найбільш високі силові показники - в режимі гальмування, при якому якорь нерухомий. Встановлено, що найбільшу швидкість (18,95 м/с) забезпечує ЛУЭП електродинамічного типу при збудженні однонапівперіодним і коливально-загасаючим імпульсами в режимі неробочого ходу. Найбільший ККД (29,2%) має ЛУЭП індукційного типу при збудженні однонапівперіодним імпульсом в режимі неробочого ходу. Найбільшу величину імпульсу електродинамічних зусиль (19,2 Н·с) розвиває ЛУЭП індукційного типу в режимі гальмування. Найбільше перевищення температури обмотки індуктора (1,7 К) відбувається в ЛУЭП індукційного типу в режимі неробочого ходу, а найбільше перевищення температури обмотки якоря (0,7 К) – в ЛУЭП електродинамічного типу в режимі гальмування.

Ключові слова: лінійний ударний електромеханічний перетворювач, електричні, магнітні, механічні та теплові процеси, силові і швидкісні показники, режим неробочого ходу, навантаження і гальмування.

На основе математической модели, учитывающей взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы, исследовано влияние колебательно-затухающего, однополупериодного и аперіодического импульсов возбуждения на показатели линейных ударных электромеханических преобразователей (ЛУЭП) индукционного и электродинамического типов в режимах холостого хода, нагрузки и торможения. Показано, что наиболее высокие скоростные показатели возникают в режиме холостого хода, когда обмотка якоря разгоняется без исполнительного элемента, а наиболее высокие силовые показатели – в режиме торможения, при котором якорь неподвижен. Установлено, что наибольшую скорость (18,95 м/с) обеспечивает ЛУЭП электродинамического типа при возбуждении однополупериодным и колебательно-затухающим импульсами в режиме холостого хода. Наибольший КПД (29,2 %) имеет ЛУЭП электродинамического типа при возбуждении однополупериодным импульсом в режиме холостого хода. Наибольшую величину импульса электродинамических усилий (19,2 Н·с) развивает ЛУЭП индукционного типа в режиме торможения. Наибольшее превышение температуры обмотки индуктора (1,7 К) происходит в ЛУЭП индукционного типа в режиме холостого хода, а наибольшее превышение температуры обмотки якоря (0,7 К) – в ЛУЭП электродинамического типа в режиме торможения.

Ключевые слова: линейный ударный электромеханический преобразователь, электрические, магнитные, механические и тепловые процессы, силовые и скоростные показатели, режим холостого хода, нагрузки и торможения.

Purpose. To study the effect of vibrational-damping, half-wave and aperiodic excitation pulses on the power and speed parameters of a linear shock electromechanical transducer (LSET) of induction and electrodynamic types when operating in idle, load and braking modes. **Methodology.** To account for the interconnected electrical, magnetic, mechanical and thermal processes, as well as a number of nonlinear dependencies, a mathematical chain model with lumped element parameters is used. This model allows you to quickly carry out the calculation of indicators and characteristics of the LSET with varying the shape of the excitation pulse and the operating mode. **Results.** The electrical and mechanical characteristics, power and speed parameters of the induction and electrodynamic type LSETs are obtained upon excitation of a vibrationally damped, half-wave and aperiodic excitation pulse when operating in idle, load and braking modes. **Originality.** It is shown that the highest speed indicators occur in idle mode, when the armature winding accelerates without an actuator, and the highest power indicators - in braking mode, in which the armature is stationary. **Practical value.** It has been established that the highest speed (18.95 m/s) is developed by an electrodynamic type LSET excited by single-half and vibrationally-damped pulses in the idle mode. The highest efficiency (29.2%) is developed by an electrodynamic type LSET upon excitation by a half-wave pulse in idle mode. The largest magnitude of the pulse of electrodynamic forces (19.2 N·s) is developed by an induction-type LSET in braking mode. The largest excess of the temperature of the inductor winding (1.7 K) occurs in the LSET of the induction type in idle mode, and the largest excess of the temperature of the armature of the armature (0.7 K) is in the LSET of the electrodynamic type in braking mode.

Keywords: linear shock electromechanical converter, electrical, magnetic, mechanical and thermal processes, power and speed indicators, idle mode, load and braking.

Введение. Для создания мощных силовых импульсов и обеспечения высоких скоростей на коротком участке разгона используются линейные ударные электромеханические преобразователи (ЛУЭП) [1 - 4]. Известно несколько типов указанных преобразователей: рельсотронный, электромагнитный, индукционный, электродинамический и др.

Наиболее перспективны с точки зрения практического применения, обеспечения необходимых силовых и скоростных показателей являются ЛУЭП электродинамического и индукционного типов [5-7]. В указанных типах ЛУЭП индуктор выполнен в виде многовитковой обмотки, возбуждаемой от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). Неподвижный индуктор посредством магнитного поля взаимодействует с подвижным якорем. Возникающие при этом электродинамические усилия (ЭДУ) обеспечивают либо пере-

мещение, либо передачу усилий на якорь, взаимосвязанный с исполнительным элементом. В ЛУЭП индукционного типа якорь представляет собой одно- или многовитковую короткозамкнутую обмотку, в которой индуцируется ток. В ЛУЭП электродинамического типа якорь представляет собой многовитковую обмотку, которая электрически последовательно и встречно по магнитному полю соединена с индуктором. В ЛУЭП электродинамического типа якорь соединен с индуктором и ЕНЭ при помощи гибких тоководов.

Сравнительный анализ силовых и скоростных показателей ЛУЭП индукционного и электродинамического типов является актуальной задачей [5, 6]. При этом не исследовано влияние формы импульса возбуждения, формируемого электронной системой источника питания, на показатели ЛУЭП указанных типов. Такие исследования были проведены только для

© В. Ф. Болюх, И. С. Щукин, 2020

ЛУЭП индукционного типа [8], но при этом не рассматривались различные режимы работы ЛУЭП.

Постановка задачи. Необходимо исследовать влияние колебательно-затухающего, однополупериодного и аperiodического импульсов возбуждения на силовые и скоростные показатели ЛУЭП индукционного и электродинамического типов при работе в режимах холостого хода, нагрузки и торможения.

В работе [9] представлена математическая модель ЛУЭП индукционного и электродинамического типов, использующая упрощенный подход. В ней предполагается, что ток в обмотке изменяется по закону затухающей синусоиды и используется теория комплексных чисел. Однако такой подход не позволяет исследовать различные формы импульсов возбуждения.

Для учета взаимосвязанных электрических, магнитных, механических и тепловых процессов, а также ряда нелинейных зависимостей целесообразно использовать цепную математическую модель [10]. Такая модель позволяет оперативно осуществлять расчет показателей и характеристик ЛУЭП при варьировании формы импульса возбуждения и режима работы.

Математические модели электромагнитных процессов ЛУЭП индукционного и электродинамического типов описаны в работе [6]. Эти цепные математические модели используют сосредоточенные параметры активных элементов – обмотки индуктора (ОИ) и обмотки якоря (ОЯ). Решения уравнений представляются в рекуррентном виде, что позволяет учитывать комплекс взаимосвязанных между собой и изменяющихся процессов при различных формах импульсов возбуждения.

Перемещение якоря с исполнительным элементом относительно неподвижного индуктора описывается рекуррентными соотношениями, представленными в работе [6]. Температуры активных элементов ЛУЭП описываются рекуррентными соотношениями, представленными в работе [11].

Считая, что $n=1$ – индекс ОИ, а $n=2$ – индекс ОЯ, начальные условия математической модели запишем в виде: $T_n(0)=T_0$ – температура n -ой обмотки, $i_n(0)=0$ – ток n -ой обмотки, $\Delta z(0)=\Delta z_0$ – исходное осевое расстояние между ОИ и ОЯ, $u_c(0)=U_0$ – напряжение ЕНЭ, $v_z(0)=0$ – скорость ОЯ вдоль оси z .

В рекуррентных соотношениях расчетный шаг по времени $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ выбирается из оптимального времени расчета, при котором обеспечивается заданная точность.

Эффективность ЛУЭП оценим силовым показателем – наибольшим значением импульса ЭДУ $P_z = \int f_z(z, t) dt$, и скоростным показателем – максимальной скоростью якоря v_z при условии обеспечения наибольшего КПД η и наименьшего превышения температур обмоток θ_n ,

где $f_z(z, t) = i_1(t)i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z)$ – мгновенное значение ЭДУ, действующих на якорь ЛУЭП индукционно-

го типа; $f_z(z, t) = i^2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z)$ – мгновенное значение ЭДУ, действующих на якорь ЛУЭП электродинамического типа; $\theta_n = T_n - T_0$; i_n – ток n -ой обмотки; M_{12} – взаимная индуктивность между обмотками; T_n – температура n -ой обмотки;

$$\eta = \left[(m_2 + m_a) v_z^2 + K_P \Delta z^2 \right] C_0^{-1} (U_0^2 - U_1^2)^{-1};$$

K_P – коэффициент упругости возвратной пружины; C_0 – емкость ЕНЭ; U_1 – остаточное напряжение после рабочего цикла возбуждения; m_2 – масса якоря; m_a – масса исполнительного элемента.

Как показано в работе [12], наибольшая эффективность ЛУЭП электродинамического типа обеспечивается при одинаковых геометрических параметрах ОИ и ОЯ. Исходя из этого, для сравнительного анализа будем рассматривать ЛУЭП электродинамического и индукционного типов, у которых коаксиально установленные ОИ и ОЯ выполнены одинаковыми. Эти обмотки выполнены многотвитковыми в форме относительно тонких дисков, которые плотно наматаны в два слоя медной шины $2,0 \times 3,5$ мм². Число витков шины в каждой обмотке $N_n = 40$. Внешний диаметр n -ой обмотки $D_{en} = 100$ мм, внутренний диаметр $D_{in} = 10$ мм и аксиальная высота $H_n = 7,4$ мм. ЕНЭ имеет следующие параметры: емкость $C_0 = 3,0$ мФ, напряжение $U_0 = 0,5$ кВ. Начальное аксиальное расстояние между ОИ и ОЯ $\Delta z_0 = 1$ мм. Коэффициент упругости возвратной пружины $K_P = 25$ кН/м. Масса исполнительного элемента $m_a = 1,0$ кг.

Рассмотрим схему импульсного источника возбуждения ЛУЭП (рис. 1, а), при которой формируется:

- колебательно-затухающий импульс (ключ Q_1 замкнут, а ключ Q_2 разомкнут);
- однополупериодный импульс (ключи Q_1 и Q_2 разомкнуты);
- аperiodический импульс (ключ Q_1 разомкнут, а ключ Q_2 замкнут).

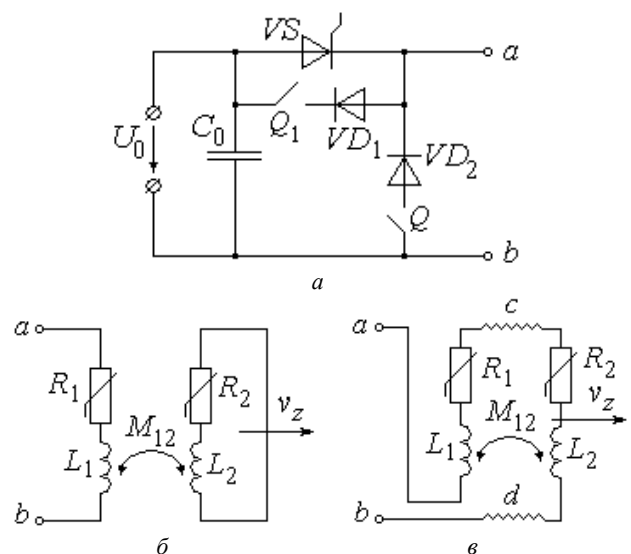


Рис. 1 – Схема импульсного источника возбуждения (а), к которому подключаются ЛУЭП индукционного (б) и электродинамического (в) типов

К схеме импульсного возбуждения подключается или ЛУЭП индукционного типа (рис. 1,б), или ЛУЭП электродинамического типа (рис. 1,в). В обоих преобразователях имеется неподвижная ОИ (активное сопротивление R_1 и индуктивность L_1) и подвижная ОЯ (активное сопротивление R_2 и индуктивность L_2). При этом активные сопротивления обмоток зависят от соответствующих температур T_n .

В ЛУЭП индукционного типа ОЯ выполнена короткозамкнутой, а в ЛУЭП электродинамического типа она через гибкие токовводы c , d последовательно соединена с импульсным источником возбуждения и с ОИ.

Электромеханические характеристики ЛУЭП.

Рассмотрим электрические и механические характеристики преобразователей в трех режимах:

режим холостого хода (I), при котором масса исполнительного элемента $m_a=0$ (тонкие линии),

режим нагрузки (II), при котором масса исполнительного элемента $m_a=1,0$ (тонкие линии с круглыми метками),

режим торможения (III), при котором масса исполнительного элемента $m_a=\infty$ (жирные линии).

На рис. 2 представлены электрические (j_1 – плотность тока ОИ, j_2 – плотность тока ОЯ) и механические характеристики (f_z – мгновенное значение ЭДУ, P_z – импульс ЭДУ, Δz – величина перемещения ОЯ с исполнительным элементом) ЛУЭП индукционного типа при возбуждении колебательно-затухающим импульсом.

В данном преобразователе токи в обмотках имеют колебательно-затухающий вид. Наибольшие амплитуды токов реализуются в режиме торможения III, а наименьшие – в режиме холостого хода I. В режиме холостого хода I амплитуда плотности тока в ОИ j_{1m} больше, чем в ОЯ j_{2m} на 45 %, а в режиме торможения III – на 38 %. В режиме III амплитуды токов: в ОИ $j_{1m}=638,6$ А/мм², в ОЯ $j_{2m}=462,0$ А/мм². В режимах холостого хода I и нагрузки II наблюдается фазовый сдвиг между токами, в то время как в режиме торможения III он практически отсутствует. Отметим, что показатели в режиме нагрузки II расположены между показателями в режимах холостого хода I и торможения III.

ЭДУ имеют вид последовательно затухающих всплесков, приводящих к повышению скорости ОЯ. Наибольшая величина второго силового всплеска возникает в режиме торможения III, что обусловлено сильной магнитной связью между обмотками, а наименьшая – в режиме холостого хода I, что обусловлено ослабленной магнитной связью между обмотками. Наибольшая амплитуда первого всплеска ЭДУ ($f_{zm}=32,5$ кН) возникает в режиме торможения, а наименьшая – в режиме холостого хода ($f_{zm}=19,7$ кН). В конце рабочего цикла в режиме III величина импульса ($P_z=19,2$ Н·с) существенно больше, чем в режиме I ($P_z=7,9$ Н·с).

В режиме холостого хода I ОЯ без исполнительного элемента ускоряется до скорости $v_z=15,4$ м/с, что обеспечивает КПД $\eta=20,4$ %. Отметим, что превышение температуры ОИ θ_1 выше, чем превышение температуры ОЯ θ_2 . В режиме холостого хода I $\theta_1=1,7$ К, $\theta_2=0,3$ К. В режиме торможения III превышение тем-

пературы ОИ уменьшается до величины $\theta_1=1,3$ К, а превышение температуры ОЯ повышается до величины $\theta_2=0,6$ К.

В ЛУЭП электродинамического типа при возбуждении колебательно-затухающим импульсом в целом вид электрических и механических характеристик сохраняется (рис. 3).

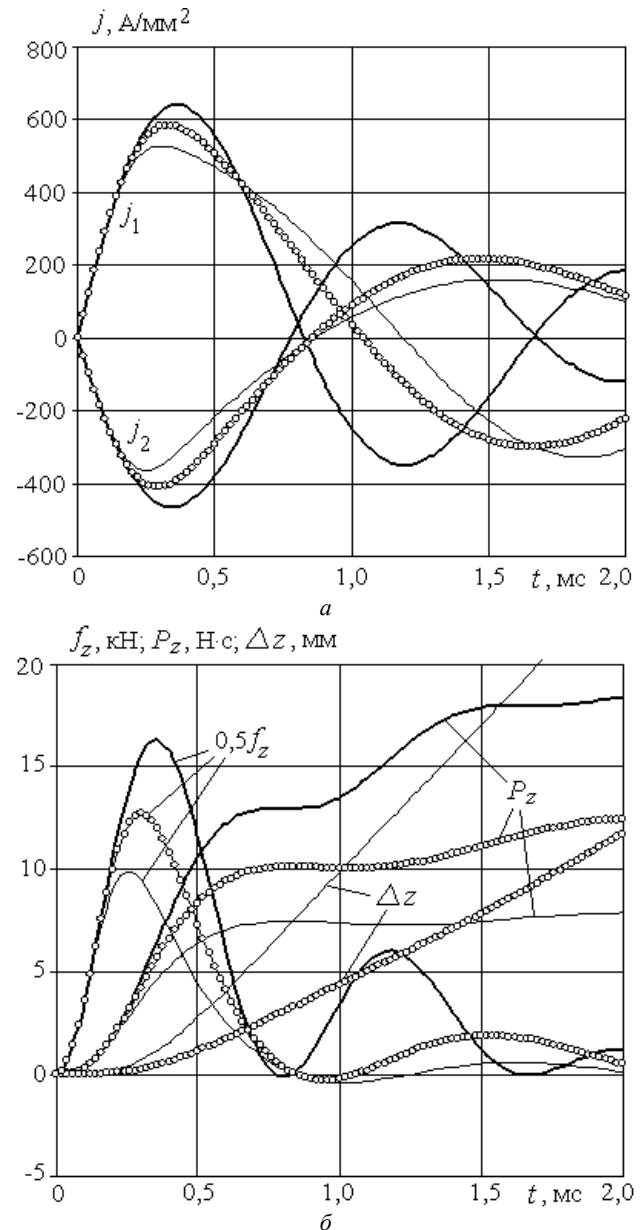


Рис. 2 – Электрические (а) и механические (б) характеристики ЛУЭП индукционного типа при возбуждении колебательно-затухающим импульсом

При этом токи в обмотках находятся в противофазе, и между ними не возникает фазового сдвига. На рис. 3,а помимо одинаковых плотностей токов в ОИ и ОЯ ($j_1=j_2$) показано и напряжение ЕНЭ u_c . В ЛУЭП электродинамического типа амплитуда плотности тока в обмотках ниже, чем в ОИ, и выше, чем в ОЯ, по сравнению с ЛУЭП индукционного типа. Амплитудные значения всплеска ЭДУ f_{zm} во всех режимах работы в данном преобразователе выше (на 21 % - в режиме холостого хода I и на 5 % - в режиме торможения

III). Однако импульс ЭДУ P_z имеет не столь однозначную тенденцию: в режиме I он возрастает на 23 %, а в режиме III он уменьшается на 5 %. Скоростные показатели ЛУЭП электродинамического типа выше: в режиме холостого хода I ОЯ без исполнительного элемента ускоряется до скорости $v_z=18,9$ м/с, что обеспечивает КПД $\eta=26,8$ %.

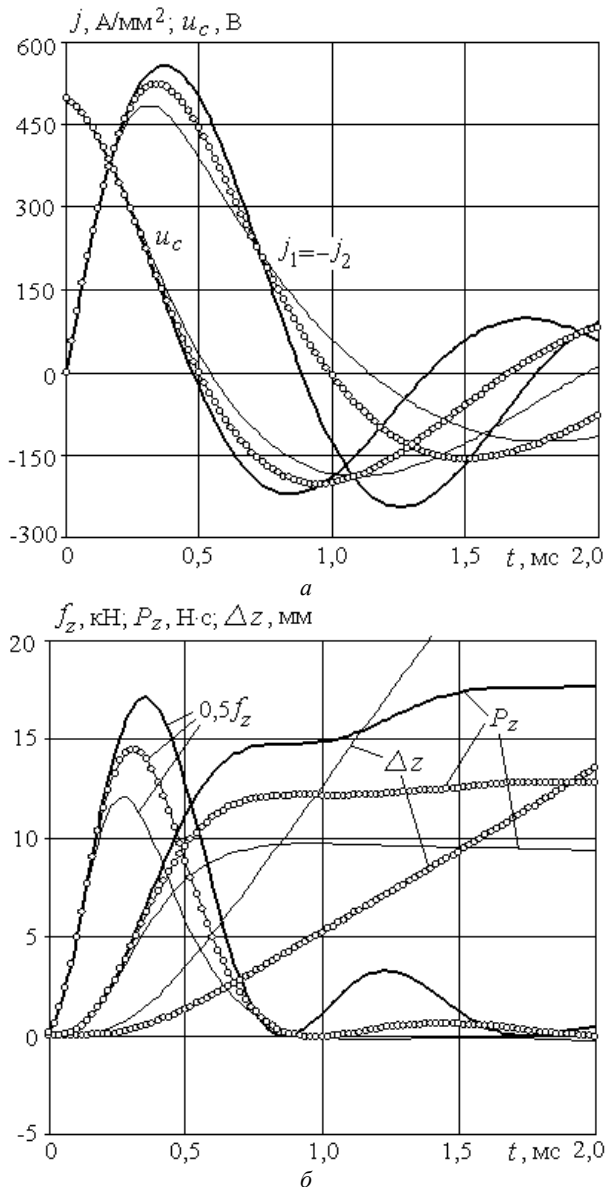


Рис. 3 – Электрические (а) и механические (б) характеристики ЛУЭП электродинамического типа при возбуждении колебательно-затухающим импульсом

В данном преобразователе, также как и в ЛУЭП индукционного типа, превышение температуры ОИ θ_1 выше, чем превышение температуры ОЯ θ_2 , но при значительно меньшей разности между ними. В режиме холостого хода I $\theta_1=0,7$ К, $\theta_2=0,5$ К. В режиме торможения III превышения температур обмоток увеличиваются: $\theta_1=0,9$ К, $\theta_2=0,7$ К.

При возбуждении однополупериодным импульсом вид электрических и механических характеристик ЛУЭП претерпевает изменения. В ЛУЭП индукционного типа ток в ОИ (рис. 4, а), а в ЛУЭП электродина-

мического типа токи в ОИ и ОЯ (рис. 5,а) прерываются при достижении нулевого значения. После этого напряжение U_1 , полярность которого противоположна зарядному напряжению U_0 , сохраняется в ЕНЭ. При этом в ЛУЭП индукционного типа ток в ОЯ начинает затухать.

Исходя из указанной закономерности протекания токов, меняется и вид механических характеристик при данной форме импульса возбуждения. ЭДУ f_z имеет только один всплеск, вследствие чего скоростные характеристики после достижения определенного значения существенно не меняются.

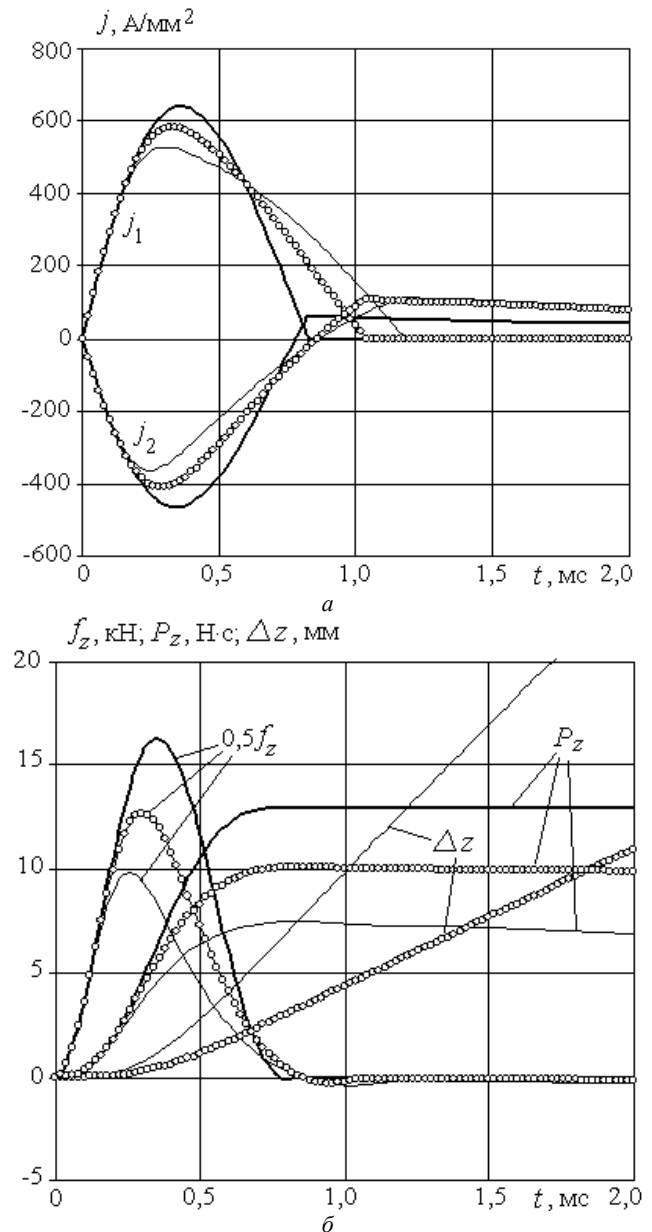


Рис. 4 – Электрические (а) и механические (б) характеристики ЛУЭП индукционного типа при возбуждении однополупериодным импульсом

В ЛУЭП индукционного типа (рис. 4, б) при однополупериодном возбуждении по сравнению с возбуждением колебательно-затухающим импульсом в режиме холостого хода I ОЯ ускоряется до меньшей

скорости ($v_z=14,6$ м/с). Однако за счет сохранения энергии в ЕНЭ КПД преобразователя повышается до величины $\eta=22,7\%$. Импульс ЭДУ P_z в режиме холостого хода I уменьшается незначительно (на 5,3%), а в режиме торможения III – значительно (на 48,3%). При этом превышения температур обеих обмоток при данном возбуждении уменьшаются: в режиме I $\theta_1=0,87$ К, $\theta_2=0,29$ К, а в режиме III $\theta_1=0,94$ К, $\theta_2=0,38$ К.

В ЛУЭП электродинамического типа (рис. 5,б) можно отметить следующие закономерности. По сравнению с возбуждением колебательно-затухающим импульсом в режиме холостого хода I максимальная скорость ОЯ остается практически неизменной, но КПД преобразователя возрастает на 8,6%. В режиме холостого хода I импульс ЭДУ P_z не изменяется, а в режиме торможения III – уменьшается на 23,8%. Превышение температуры более нагруженной ОИ в режиме I уменьшается на 16,6%, а в режиме III – на 24%.

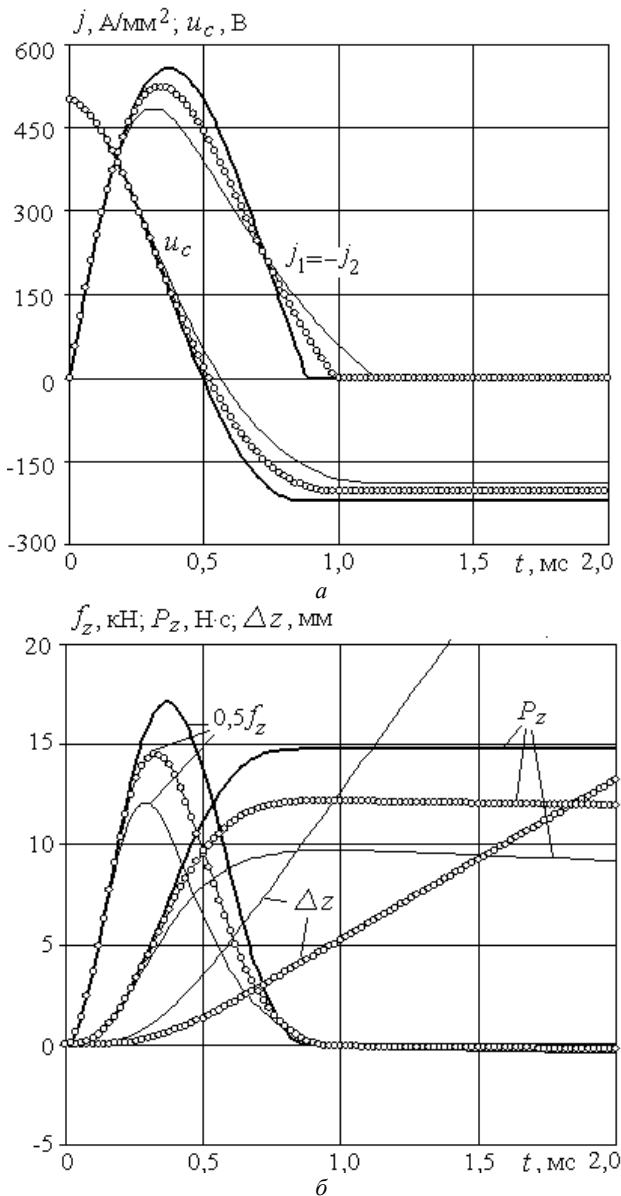


Рис. 5 – Электрические (а) и механические (б) характеристики ЛУЭП электродинамического типа при возбуждении однополупериодным импульсом

Следует отметить, что при возбуждении колебательно-затухающим и однополупериодным импульсами для ЕНЭ необходимо использовать конденсаторы с переменной полярностью. При возбуждении аperiodическим импульсом можно использовать полярные электролитические конденсаторы с повышенными технико-экономическими показателями (рис.6, рис.7).

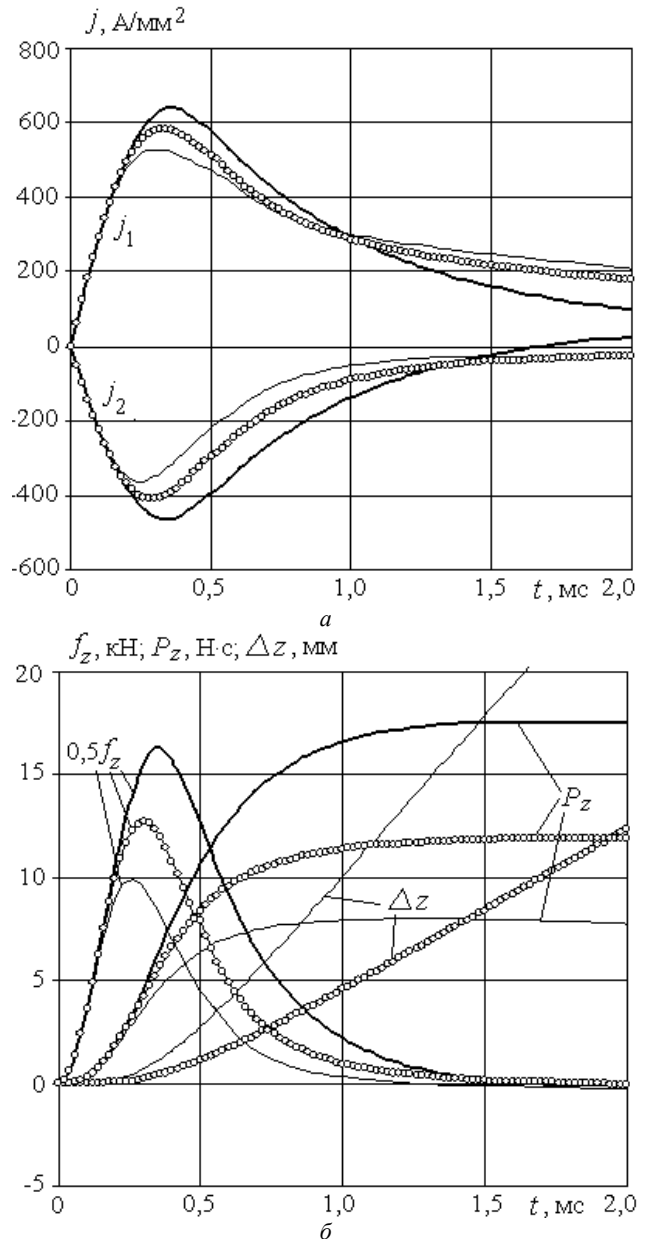


Рис. 6 – Электрические (а) и механические (б) характеристики ЛУЭП индукционного типа при возбуждении аperiodическим импульсом

При возбуждении аperiodическим импульсом в ЛУЭП индукционного типа ток в ОИ сохраняет полярность во всех режимах работы, а ток в ОЯ сохраняет полярность только в режимах холостого хода I и нагрузки II. Вследствие этого только в режиме торможения III возникают отрицательные ЭДУ, однако их величина относительно мала. По сравнению с возбуждением колебательно-затухающим импульсом максимальная скорость ОЯ в режиме холостого хода I практи-

чески не изменяется, КПД уменьшается на 10,4 %, величина импульса ЭДУ P_z практически не изменяется, а превышение температуры ОИ θ_1 уменьшается на 6 %. В режиме торможения III величина импульса ЭДУ P_z заметно уменьшается (на 9,4 %). При этом превышение температуры ОИ θ_1 увеличивается на 13,7 %.

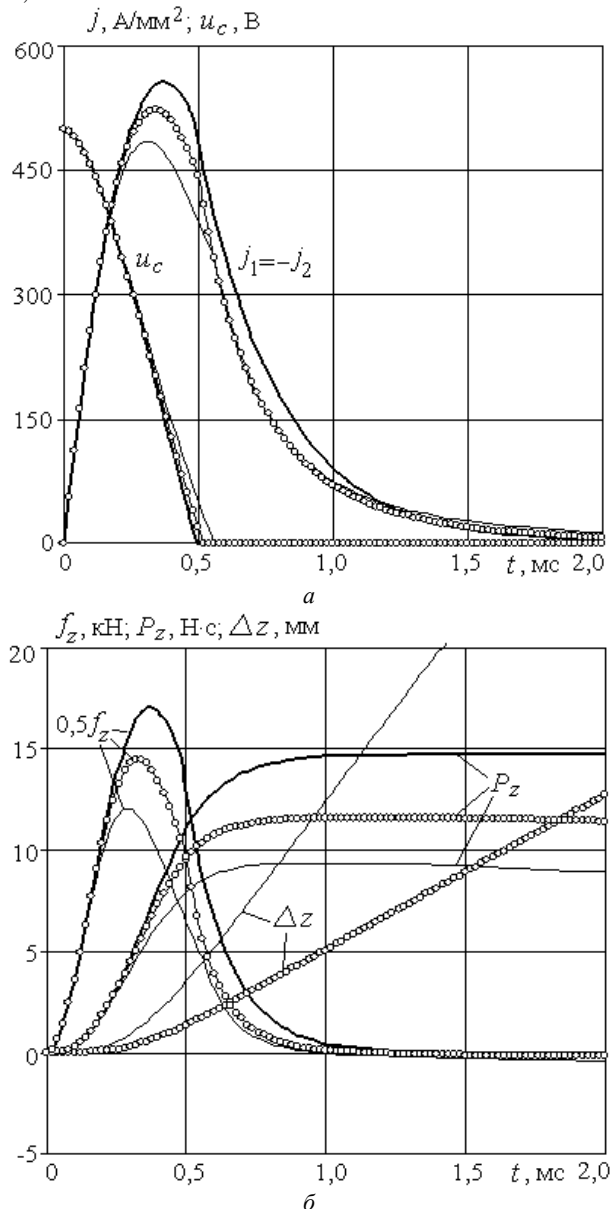


Рис. 7 – Электрические (а) и механические (б) характеристики ЛУЭП электродинамического типа при возбуждении аperiodическим импульсом

При возбуждении аperiodическим импульсом в ЛУЭП электродинамического типа токи и ЭДУ затухают быстрее, чем в ЛУЭП индукционного типа. По сравнению с возбуждением колебательно-затухающим импульсом при возбуждении аperiodическим импульсом в режиме холостого хода I максимальная скорость и величина импульса ЭДУ уменьшаются незначительно (на 3,5 %), КПД уменьшается более заметно (на 13,6 %), а превышение температуры ОИ снижается еще более заметно (на 20,5 %). При возбуждении аperiodическим импульсом в режиме торможения III

величина импульса ЭДУ и величина превышения температуры ОИ уменьшаются примерно на 24 %.

Выводы.

1. На основе математической модели, учитывающей взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы, исследовано влияние колебательно-затухающего, однополупериодного и аperiodического импульсов возбуждения на показатели ЛУЭП индукционного и электродинамического типов в режимах холостого хода, нагрузки и торможения.

3. Показано, что наиболее высокие скоростные показатели возникают в режиме холостого хода, когда ОЯ разгоняется без исполнительного элемента, а наиболее высокие силовые показатели – в режиме торможения, при котором якорь неподвижен.

4. Установлено, что наибольшую скорость (18,95 м/с) развивает ЛУЭП электродинамического типа при возбуждении однополупериодным и колебательно-затухающим импульсами в режиме холостого хода. Наибольший КПД (29,2 %) развивает ЛУЭП электродинамического типа при возбуждении однополупериодным импульсом в режиме холостого хода. Наибольшую величину импульса ЭДУ (19,2 Н·с) развивает ЛУЭП индукционного типа в режиме торможения. Наибольшее превышение температуры ОИ (1,7 К) наблюдается в ЛУЭП индукционного типа в режиме холостого хода, а наибольшее превышение температуры ОЯ (0,7 К) – в ЛУЭП электродинамического типа в режиме торможения.

Список литературы

- Balikci A. Improved performance of linear induction launchers / A. Balikci, Z. Zabar, L. Birenbaum // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41. – № 1. – P. 171–175.
- Chemerys V.T. Prospectives of new coilgun design development / V.T. Chemerys, V.F. Bolyukh // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – № 3. – С. 44–52.
- Боков А.А. Одноосное компактирование нанопорошков на магнитно-импульсном прессе / А.А.Боков, Г.Ш.Болтачев, Н.Б.Волков // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып. 10. – С. 68–77.
- Болох В.Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электро-механических преобразователей электромагнитного и индукционного типов / В.Ф. Болох, С.В. Олексенко, И.С. Шукин // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 46–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.046>.
- Bissal A. Comparison of two ultra-fast actuator concept / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48. – № 11. – P. 3315–3318.
- Болох В.Ф., Кашанский Ю.В., Шукин И.С. Сравнительный анализ силовых и скоростных показателей линейных импульсных электро-механических преобразователей электродинамического и индукционного типов / В.Ф. Болох, Ю.В. Кашанский, И.С. Шукин // Технічна електродинаміка. – 2019. – № 6. – С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.035>.
- Акарачкин С.А. Радиальный магнитноимпульсный пресс совмещенной электродинамической и индукционной системы // С.А. Акарачкин, Ю.М. Анненков, А.С. Ивашутенко, А.А. Сивков // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 65–69.
- Болох В.Ф. Исследование линейного импульсно-индукционного электро-механического преобразователя при различных схемах питания индуктора / В.Ф. Болох, А.И. Кочерга, И.С. Шукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2018. – №1. – С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.03>.
- Городжа А.Д. Расчет параметров импульсного электродинамического излучателя упругих волн / А.Д. Городжа, К.А. Горо-

- джа, Б.О. Трощинский, О.А. Погребный // Праці ІЕД НАНУ. – 2018. – Вип. 51. – С. 125-131.
10. Li W. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method / W. Li, C.S. Koh // 14th biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier. – 2010. – P. 1–9.
 11. Bolyukh V.F. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode / V.F. Bolyukh, I.S. Shchukin // Russian electrical engineering. – 2012. – Vol. 83, № 10. – P. 571 – 576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
 12. Болух В.Ф. Влияние геометрических параметров индуктора и якоря на показатели линейного импульсного электромеханического преобразователя электродинамического типа / В.Ф. Болух, Ю.В. Кашанский, И.С. Щукін // Електротехніка і електро-механіка. – 2019. – № 3. – С.11-17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.02>.
- References (transliterated)**
1. Balicki A. Zabar Z. Birenbaum L. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no 1, pp. 171–175.
 2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development. *Artilleriyskoye i strelkovoye vooruzheniye – Artillery and small arms*, 2008, no 3, pp. 44-52.
 3. Bokov A.A., Boltachev G.Sh, Volkov N.B. Odnoosnoye kompaktirovaniye nanoporoshkov na magnitno-impul'snom presse [Uniaxial compaction of nanopowders on a magnetic pulse press]. *Journal of Technical Physics*, 2013, Vol. 83, no. 10, pp. 68-77.
 4. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Sravnitel'nyy analiz lineynykh impul'snykh elektromekhanicheskikh preobrazovatelye elektromagnitnogo i induktsionnogo tipov [Comparative analysis of linear pulsed electromechanical converters of electromagnetic and induction types]. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 46-48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.046>.
 5. 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.
 6. Bolyukh V.F., Kashanskyi Yu.V., Schukin I.S. Sravnitel'nyy analiz silovykh i skorostnykh pokazateley lineynykh impul's-nykh elektromekhanicheskikh preobrazovatelye elektrodinami-cheskogo i induktsionnogo tipov [Comparative analysis of power and speed indicators of linear pulse electromechanical converters of electrodynamic and induction types]. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 6, pp. 35-42. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.035>
 7. Akarachkin S.A., Annenkov Yu.M., Ivashutenko A.S., Sivkov A.A. Radial'nyy magnitnoimpul'snyy press sovmeshchennoy elektrodinamicheskoy i induktsionnoy sistemy [Radial magnetic pulse press combined electrodynamic and induction systems]. *Electricity*, 2012, no. 6, pp. 65-69.
 8. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Shchukin I.S. Issledovaniye lineynogo impul'sno-induktsionnogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya pri razlichnykh skhemakh pitaniya induktora [Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with various inductor power supply circuits]. *Electrotekhnika i Elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 1, pp. 21-28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.03>.
 9. Gorodzha A.D., Gorodzha K.A, Troshchinsky B.O., Pogrebny O.A. Raschet parametrov impul'snogo elektrodinamicheskogo izluchatelya uprugikh voln [Calculation of the parameters of a pulsed electrodynamic emitter of elastic waves]. *Praci IED NASU*, 2018, issue 51, pp. 125-131.
 10. Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method, 14th biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier, 2010, pp. 1–9.
 11. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // *Russian Electrical Engineering*, 2012, Vol. 83, no 10. – pp. 571 – 576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
 12. Bolyukh V.F., Kashanskyi Yu.V., Shchukin I.S. Vliyaniye geometricheskikh parametrov induktora i yakorya na pokazately lineynogo impul'snogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya elektrodinamicheskogo tipa [The influence of the geometrical parameters of the inductor and the armature on the performance of a linear pulse electromechanical converter of electrodynamic type]. *Electrotekhnika i Elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 3, pp. 11-17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.02>.

Поступила (received) 02.12.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Болух В. Ф. Вплив форми імпульсу збудження на силові та швидкісні показники лінійних ударних електромеханічних перетворювачів індукційного та електродинамічного типів / В. Ф. Болух, І. С. Щукін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 8-14. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.02.

Болух В. Ф. Влияние формы импульса возбуждения на силовые и скоростные показатели линейных ударных электромеханических преобразователей индукционного и электродинамического типов // В. Ф. Болух, И. С. Щукін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 8-14. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.02.

Bolyukh V. F. Influence of the shape of the excitation pulse on the power and speed indicators of linear shock electromechanical converters of induction and electrodynamic types / V. F. Bolyukh, I. S. Shchukin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 8-14. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.02.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Болух Володимир Федорович (Болух Владимир Федорович, Bolyukh Vladimir Fedorovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна, тел. (057)707-64-27; ORCID: 0000-0001-9115-7828; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

Щукін Ігор Сергійович (Щукін Игорь Сергеевич, Shchukin Igor Sergeevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, м. Харків, Україна, тел. (057)707-65-14; ORCID: 0000-0001-7982-8633; e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.