

В.Ф. Боллох, И.С. Щукин

ВОЗБУЖДЕНИЕ СЕРИЕЙ ИМПУЛЬСОВ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ТИПА, РАБОТАЮЩЕГО В СИЛОВОМ И СКОРОСТНОМ РЕЖИМАХ

Представлена математична модель лінійного імпульсного перетворювача електродинамічного типу (ЛІПЕТ), в якій рішення рівнянь, що описують взаємопов'язані електричні, магнітні, механічні та теплові процеси, подані в рекуррентному вигляді. Досліджено електромеханічні і електродинамічні характеристики ЛІПЕТ при роботі в швидкісному режимі, що забезпечує прискорення обмотки якоря з виконавчим елементом, та в силовому режимі при загальмованій обмотці якоря. Показано, що при збудженні одиночним імпульсом ЛІПЕТ, який працює в швидкісному режимі, в порівнянні з силовим режимом, відбувається зменшення амплітуди струму в обмотках на 7,5 %, амплітуди електродинамічних зусиль (ЕДЗ) – на 21,8 %, значення імпульсу ЕДЗ – на 27,1 %. При цьому обмотка якоря з виконавчим елементом розганяється до швидкості 7,1 м/с. При збудженні серією імпульсів від однакових секцій ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) та роботі ЛІПЕТ в силовому режимі амплітуди імпульсів струму і ЕДЗ практично незмінні, а при роботі в швидкісному режимі відбувається послідовне зменшення цих амплітуд. Збільшення кількості імпульсів збудження при збереженні енергії ЄНЕ призводить до зменшення основних показників ЛІПЕТ. Але за рахунок зменшення амплітуди ЕДЗ, яка проявляється як сила віддачі, ефективність ЛІПЕТ збільшується. Для ЛІПЕТ, що працює в швидкісному режимі, запропоновано зменшення максимальних амплітуд струму і ЕДЗ за рахунок послідовного збільшення ємностей секцій ЄНЕ, які формують серії імпульсів збудження. Для ЛІПЕТ, що працює в силовому режимі доцільно використовувати однакові ємності всіх секцій ЄНЕ. Бібл. 22, рис. 9.

Ключові слова: лінійний імпульсний перетворювач електродинамічного типу, математична модель, швидкісний і силовий режим роботи, збудження серією імпульсів, сила віддачі, критерій ефективності.

Представлена математическая модель линейного импульсного преобразователя электродинамического типа (ЛИПЭТ), в которой решения уравнений, описывающих взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы, представлены в рекуррентном виде. Исследованы электромеханические и электродинамические характеристики ЛИПЭТ при работе в скоростном режиме, обеспечивающем ускорение обмотки якоря с исполнительным элементом, и в силовом режиме, когда обмотка якоря заторможена. Показано, что при возбуждении одиночным импульсом ЛИПЭТ, работающего в скоростном режиме, по сравнению с силовым режимом происходит уменьшение амплитуды тока в обмотках на 7,5 %, амплитуды электродинамических усилий (ЭДУ) – на 21,8 %, значения импульса ЭДУ – на 27,1 %. При этом обмотка якоря с исполнительным элементом разгоняется до скорости 7,1 м/с. При возбуждении серией импульсов от одинаковых секций емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) и работе ЛИПЭТ в силовом режиме амплитуды импульсов тока и ЭДУ практически неизменны, а при работе в скоростном режиме происходит последовательное уменьшение амплитуд токов и ЭДУ. Увеличение количества импульсов возбуждения при сохранении энергии ЕНЭ приводит к уменьшению основных показателей ЛИПЭТ. Но за счет уменьшения амплитуды ЭДУ, которая проявляется как сила отдачи, эффективность ЛИПЭТ увеличивается. Для ЛИПЭТ, работающего в скоростном режиме, предложено уменьшение максимальных амплитуд тока и ЭДУ за счет последовательного увеличения емкостей секций ЕНЭ, формирующих серии импульсов возбуждения. Для ЛИПЭТ, работающего в силовом режиме, целесообразно использовать одинаковые емкости всех секций ЕНЭ. Библ. 22, рис. 9.

Ключевые слова: линейный импульсный преобразователь электродинамического типа, математическая модель, скоростной и силовой режим работы, возбуждение серией импульсов, сила отдачи, критерий эффективности.

Введение. Линейные импульсные преобразователи электродинамического типа (ЛИПЭТ) широко используются для разгона исполнительного элемента (ИЭ) до высокой скорости на коротком активном участке и для создания мощных силовых импульсов на объект воздействия при незначительном перемещении ИЭ [1-3]. Такие преобразователи, работающие как в скоростном, так и в силовом режимах, широко используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей ИЭ и ударно-силовых устройств [4, 5].

Как показывает анализ, ЛИПЭТ обладают повышенными силовыми и скоростными показателями по сравнению с преобразователями индукционного и электромагнитного типов, которые также широко используются для аналогичных применений [6].

В преобразователе индукционного типа якорь выполнен в виде одно- или многовитковой короткозамкнутой обмотки, в которой индуцируется ток от

обмотки индуктора. Однако из-за фазового сдвига между токами в обмотках индуктора и якоря помимо электродинамических усилий отталкивания возникают и паразитные силы притяжения. Вследствие этого эффективность такого преобразователя снижается [7].

У преобразователя электромагнитного типа якорь выполнен ферромагнитным и на него со стороны обмотки индуктора действует электромагнитная сила притяжения. Однако из-за физических свойств ферромагнетика в таком преобразователе электромагнитные процессы носят замедленный характер с относительно невысокими амплитудами сил. Это также обуславливает низкую эффективность преобразователя электромагнитного типа, особенно при работе в скоростном режиме [8].

ЛИПЭТ содержит подвижную обмотку якоря (ОЯ), которая электродинамически взаимодействует с неподвижной обмоткой индуктора (ОИ) [9, 10]. Эти

обмотки, как правило, соединены последовательно и возбуждаются от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). Поскольку обе обмотки намотаны встречно по магнитному полю, то между ними возникают электродинамические усилия (ЭДУ) отталкивания. Обмотки ЛИПЭТ выполнены многовитковыми в форме дисков, коаксиально установленных друг напротив друга (рис. 1).

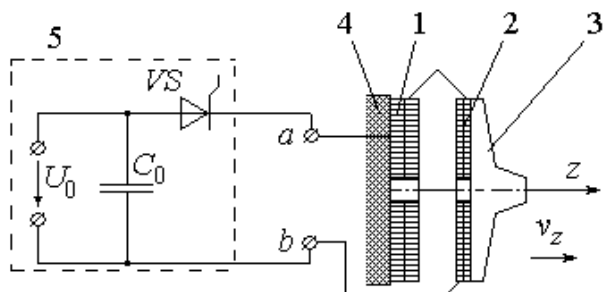


Рис. 1. Схема ЛИПЭТ: 1 – ОИ, 2 – ОЯ, 3 – ИЭ, 4 – упор, 5 – ЕНЭ

В скоростном режиме работы под действием ЭДУ отталкивания ОЯ вместе с ИЭ аксиально перемещаются относительно ОИ вдоль оси z со скоростью v_z . Однако эти же ЭДУ воздействует и на ОИ, что приводит к возникновению силы отдачи ЛИПЭТ. Сила отдачи негативно влияет на функционирование преобразователя во многих технических объектах и системах, снижая их механическую надежность. Для ряда применений, например, клепального, долбежного, маркировочного и иных ручных ударных инструментов, для пусковых систем, например, катапульт для беспилотных летательных аппаратов, различных автономных пускателей и др. сила отдачи негативно воздействует как на само устройство, так и на обслуживающий персонал [11]. Особенно негативно сила отдачи проявляется в различных измерительных устройствах. Так, в баллистическом лазерном гравиметре, предназначенном для измерения ускорения свободного падения, используется электромеханическая катапульта, которая обеспечивает вертикальное подбрасывание ИЭ – уголкового оптического отражателя [12]. Этот отражатель является составной частью измерительной системы лазерного интерферометра Майкельсона. Возникающая при подбрасывании ИЭ сила отдачи вызывает автосейсмические колебания, которые снижают точность измерения ускорения свободного падения [13].

В последнее время появились исследования линейных импульсных электромеханических преобразователей, для возбуждения которых от ЕНЭ используются различные формы импульсов тока, формируемые электронными устройствами [14]. Интерес представляет возбуждение линейного электромеханического ускорителя индукционного типа со сверхпроводящими магнитами серий прямоугольных импульсов [15, 16]. Данная система возбуждения используется для рекуперации части энергии в источнике питания.

Известен способ возбуждения линейного электромеханического ускорителя индукционного типа серий последовательных импульсов от секций ЕНЭ [17]. Однако в этом ускорителе каждая секция ЕНЭ

подключается к своей секции ОИ, которые смещены друг относительно друга вдоль оси перемещения электропроводящего якоря. Однако если ОИ выполнена несекционированной, то такая система не решает задачу уменьшения силы отдачи.

Таким образом, снижение амплитуды ЭДУ, проявляющихся в виде силы отдачи, при выполнении ЛИПЭТ своих функций в скоростном и силовом режимах является актуальной задачей.

Целью статьи является повышение эффективности ЛИПЭТ при работе в скоростном и силовом режимах за счет уменьшения амплитуды силы отдачи путем возбуждения его обмоток серий импульсов от секций ЕНЭ.

Для возбуждения ЛИПЭТ от ЕНЭ используем однополупериодный полярный импульс, формируемый пусковым тиристором VS , полагая, что его сопротивление в прямом направлении пренебрежимо мало, а в обратном направлении его проводимость столь же мала. Заметим, что при таком импульсе возбуждения к концу рабочего цикла часть энергии сохраняется в ЕНЭ, что позволяет ее дальнейшее использование [18, 19].

Математическая модель ЛИПЭТ. Рассмотрим математическую модель ЛИПЭТ, в которой используются сосредоточенные параметры активных элементов – ОИ и ОЯ. Такая модель позволяет оперативно осуществлять расчет показателей ЛИПЭТ при возбуждении серий последовательных импульсов. Для учета взаимосвязанных электрических, магнитных, механических и тепловых процессов, а также ряда нелинейных зависимостей решения уравнений, описывающих указанные процессы, представим в рекуррентном виде. При расчете рабочий процесс разбиваем на ряд численно малых интервалов времени $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, в пределах которых все величины считаем неизменными. При таком подходе для определения тока возбуждения и напряжения ЕНЭ на расчетном интервале времени Δt можно использовать линейные уравнения и соотношения.

Электрические процессы в ЛИПЭТ при возбуждении одиночным токовым импульсом от ЕНЭ можно описать уравнением [7]:

$$[R_1(T_1) + R_2(T_2)] \cdot i + \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C_0} \int idt = 0, \quad u_C(0) = U_0, \quad (1)$$

где $n = 1, 2$ – индексы ОИ и ОЯ соответственно; R_n, T_n – активное сопротивление и температура n -ой обмотки соответственно; i – ток ОИ и ИЯ; C_0 – емкость ЕНЭ, заряженного до напряжения U_0 ; u_C – напряжение ЕНЭ;

$$\frac{d\psi}{dt} = [L_1 - 2M_{12}(z) + L_2] \frac{di}{dt} - 2iv_z(t) \frac{dM_{12}}{dz}; \quad (2)$$

где L_n – индуктивность n -ой обмотки; $M_{12}(z)$ – взаимная индуктивность между ОИ и ОЯ, перемещаемой вдоль оси z со скоростью v_z .

На численно малом интервале времени Δt полагаем, что все функциональные зависимости неизменны: $R_1(T_1) = R_1, R_2(T_2) = R_2, M_{12}(z) = M_{12}, v_z(t) = v_z$.

Подставляя уравнение (2) в (1) получаем:

$$\left(R_1 + R_2 - 2v_z \frac{dM_{12}}{dz} \right) \cdot i + [L_1 - 2M_{12} + L_2] \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t idt = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) будем искать в виде:

$$i = A_1 \exp(\alpha_1 t) + A_2 \exp(\alpha_2 t), \quad (4)$$

где $\alpha_{1,2} = -0,5 \frac{\Theta}{\Xi} \pm \left[0,25 \left(\frac{\Theta}{\Xi} \right)^2 - \frac{1}{C_0 \Xi} \right]^{0,5}$ – корни

характеристического уравнения; A_1, A_2 – произвольные постоянные;

$$\Xi = L_1 - 2M_{12} + L_2;$$

$$\Theta = R_1 + R_2 - 2v_z \frac{dM_{12}}{dz}.$$

Если $\Theta > 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, то после ряда преобразований получаем выражения для произвольных постоянных в момент времени t_k :

$$A_{1,2} = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k) + \alpha_{2,1} \Xi \cdot i(t_k)}{\Xi \exp(\alpha_{1,2} t_k) (\alpha_{2,1} - \alpha_{1,2})}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (5) в уравнение (4), получаем выражение для тока в рекуррентном виде:

$$i(t_{k+1}) = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)}{\Xi (\alpha_2 - \alpha_1)} [\exp(\alpha_1 \Delta t) - \exp(\alpha_2 \Delta t)] + \frac{i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1} [\alpha_2 \exp(\alpha_1 \Delta t) - \alpha_1 \exp(\alpha_2 \Delta t)] \quad (6)$$

Напряжение на ЕНЭ:

$$u_C(t_{k+1}) = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1} [\alpha_2 \exp(\alpha_1 \Delta t) - \alpha_1 \exp(\alpha_2 \Delta t)] + \Xi \frac{i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1} [\alpha_2^2 \exp(\alpha_1 \Delta t) - \alpha_1^2 \exp(\alpha_2 \Delta t)] \quad (7)$$

Если $\Theta < 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, то корни характеристического уравнения представим в виде:

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm j\omega_1 = \omega_0 \exp(j(\pi \pm \theta)), \quad (8)$$

где $\delta = 0,5\Theta\Xi^{-1}$; $\theta = \arctg(4\Xi\Theta^{-2}C_0^{-1} - 1)^{0,5}$;

$$\omega_0 = (\Xi C_0)^{-0,5}; \quad \omega_1 = (\Xi^{-1}C_0^{-1} - 0,25\Theta^2\Xi^{-2})^{0,5}.$$

Подставляя значения корней (8) в уравнение (6) и учитывая, что

$$2j \sin(\omega_1 \Delta t) = \exp(j\omega_1 \Delta t) - \exp(-j\omega_1 \Delta t),$$

получаем:

$$i(t_{k+1}) = -\omega_1^{-1} \exp(-\delta \Delta t) \left\{ \Xi^{-1} [u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)] \times \sin(\omega_1 \Delta t) + \omega_0 i(t_k) \sin(\omega_1 \Delta t - \theta) \right\}. \quad (9)$$

Напряжение на ЕНЭ при этом:

$$u_C(t_{k+1}) = -\omega_0 \omega_1^{-1} \exp(-\delta \Delta t) \left\{ [u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)] \times \sin(\omega_1 \Delta t - \theta) + i(t_k) \omega_0 \Xi \sin(\omega_1 \Delta t - 2\theta) \right\}. \quad (10)$$

Если $\Theta = 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, то $\delta = \omega_0$ и ток равен:

$$i(t_{k+1}) = \exp(-\delta \Delta t) \Delta t \left\{ i(t_k) \delta - \Xi^{-1} \times [u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)] \right\}. \quad (11)$$

Напряжение на ЕНЭ при этом:

$$u_C(t_{k+1}) = [u_C(t_k) - i(t_k) \Xi \delta + \Theta \cdot i(t_k)] (\delta \Delta t + 1) \times \exp(-\delta \Delta t) + i(t_k) (\Xi \delta - \Theta). \quad (12)$$

Величину перемещения ОЯ с ИЭ относительно ОИ можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$h_z(t_{k+1}) = h_z(t_k) + v_z(t_k) \Delta t + \vartheta \cdot \Delta t^2 / (m_a + m_2), \quad (16)$$

где $v_z(t_{k+1}) = v_z(t_k) + \vartheta \cdot \Delta t / (m_a + m_2)$ – скорость ОЯ с

ИЭ; $\vartheta = f_z(z, t) - K_T v_z(t_k) - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{e2}^2 v_z^2(t_k)$;

$f_z(z, t) = i^2(t_k) \frac{dM_{12}}{dz}(z)$ – мгновенное значение акси-

альных ЭДУ между обмотками; m_2, m_a – масса ОЯ и масса ИЭ соответственно; h_z – величина перемещения ОЯ с ИЭ; K_T – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность среды перемещения; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления; D_{e2} – наружный диаметр ИЭ.

При работе ЛИПЭТ в силовом режиме между ОИ и ОЯ существует тепловой контакт через изоляционную прокладку. Температуру n -ой обмотки ЛИПЭТ при этом можно описать рекуррентным соотношением [20]:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \xi + (1 - \xi) \left[\pi^{-1} i^2(t_k) R_n(T_n) (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} + 0,25 \pi T_0 D_{en} H_n \alpha_{Tn} + T_m(t_k) \lambda_a(T) d_a^{-1} \right] \times \left\{ 0,25 \pi \alpha_{Tn} D_{en} H_n + \lambda_a(T) d_a^{-1} \right\}^{-1}, \quad (17)$$

где $\xi = \exp \left\{ -\frac{\Delta t}{c_n(T_n) \gamma_n} \left(0,25 D_{en} \alpha_{Tn} + \frac{\lambda_a(T)}{d_a H_n} \right) \right\}$;

$\lambda_a(T)$ – коэффициент теплопроводности прокладки; d_a – толщина прокладки; D_{en}, D_{in} – внешний и внутренний диаметры n -ой обмотки соответственно; α_{Tn}, c_n – коэффициент теплоотдачи и теплоемкость n -ой обмотки соответственно.

При работе ЛИПЭТ в скоростном режиме температуру n -ой обмотки можно описать рекуррентным соотношением [20]:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \chi + (1 - \chi) \left[T_0 + 4 \pi^{-2} i^2(t_k) \times R_n(T_n) \alpha_{Tn}^{-1} D_{en}^{-1} H_n^{-1} (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} \right], \quad (18)$$

где $\chi = \exp \left\{ -0,25 \Delta t D_{en} \alpha_{Tn} c_n^{-1} (T_n) \gamma_n^{-1} \right\}$.

Для расчета характеристик и показателей ЛИПЭТ используем алгоритм циклического действия, позволяющий учесть комплекс взаимосвязанных процессов и различных нелинейных зависимостей, например $R_n(T_n), M_{12}(z)$. По полученным в момент времени t_{k+1} значениям тока рассчитываются температуры обмоток T_1 и T_2 , перемещение h_z и скорость ОЯ v_z , взаимоиндуктивность M_{12} между обмотками и др. Значение расчетного шага Δt выбирается таким образом, чтобы оно не оказывало существенного влияния на результаты расчета, обеспечивая при этом необходимую точность.

Начальные условия математической модели:

$$T_n(0) = T_0 - \text{температура } n\text{-ой обмотки};$$

$$i_n(0) = 0 - \text{ток } n\text{-ой обмотки};$$

$$h_z(0) = h_{z0} - \text{расстояние между ОИ и ОЯ};$$

$u_c(0) = U_0$ – напряжение ЕНЭ;

$v_z(0) = 0$ – скорость ОЯ вдоль оси z .

Основные параметры ЛИПЭТ. Рассмотрим ЛИПЭТ, у которого ОИ ($n = 1$) и ОЯ ($n = 2$) выполнены в форме двуслойных дисковых катушек. ОИ намотана медной шиной сечением $1,2 \times 5,0 \text{ мм}^2$, а ОЯ – медной шиной сечением $1,2 \times 2,5 \text{ мм}^2$. Число витков n -ой обмотки $N_n = 60$, внешний диаметр $D_{en} = 100 \text{ мм}$, внутренний диаметр $D_{in} = 8 \text{ мм}$. ЕНЭ: энергия $W_0 = 180 \text{ Дж}$, напряжение $U_0 = 300 \text{ В}$. Начальное расстояние между обмотками $h_{z0} = 1 \text{ мм}$.

При работе ЛИПЭТ в скоростном режиме будем использовать ИЭ массой $m_a = 0,5 \text{ кг}$, а его эффективность будем оценивать максимальной скоростью v_{zm} при минимальной силе отдачи. При работе ЛИПЭТ в силовом режиме будем полагать отсутствие перемещения ОЯ с ИЭ ($m_a = \infty$), а его эффективность будем оценивать максимальным значение импульса ЭДУ $P_z = \int f_z(z, t) dt$ при минимальной силе отдачи.

Возбуждение ЛИПЭТ одиночным импульсом осуществляется от ЕНЭ емкостью $C_0 = 4 \text{ мФ}$. При работе в силовом режиме (рис. 2) амплитуда тока в обмотках ЛИПЭТ составляет $i_m = 1,478 \text{ кА}$, что приводит к возникновению между обмотками ЭДУ амплитудой $f_{zm} = 10,56 \text{ кН}$. Значение импульса ЭДУ к концу рабочего процесса (1,65 мс) составляет $P_z = 7,88 \text{ Н·с}$. Заметим, что превышения температур обмоток $\theta_n = T_0 - T_n$ незначительны ($\theta_1 = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$).

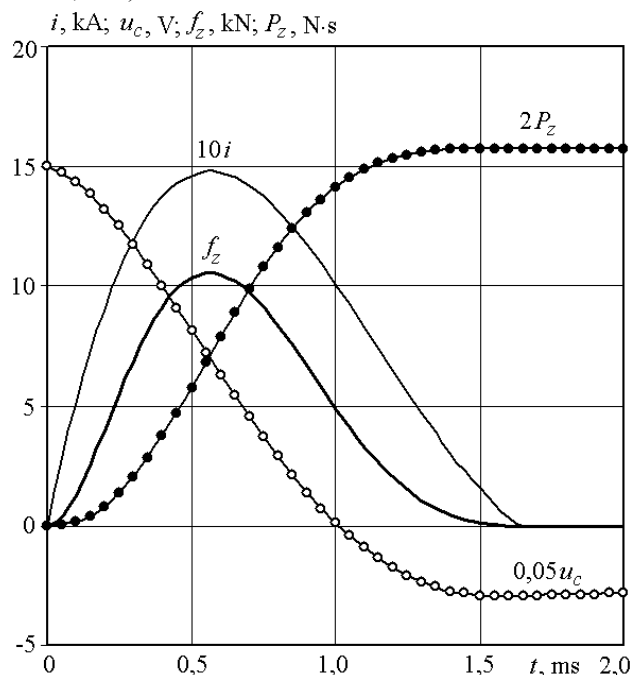


Рис. 2. Электродинамические характеристики ЛИПЭТ при работе в силовом режиме

При работе в скоростном режиме происходит затягивание рабочего процесса до 2 мс с уменьшением всех основных показателей (рис. 3). Амплитуда тока в обмотках уменьшается до $i_m = 1,375 \text{ кА}$, что приводит к уменьшению амплитуды ЭДУ между обмотками до значения $f_{zm} = 8,67 \text{ кН}$. Значение импульса ЭДУ к концу рабочего процесса составляет $P_z = 6,2 \text{ Н·с}$.

Уменьшаются и превышения температур обмоток ($\theta_1 = 0,18 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$). Такое изменение рабочего процесса обусловлено перемещением ОЯ с ИЭ, которые достигают максимальной скорости $v_{zm} = 7,1 \text{ м/с}$.

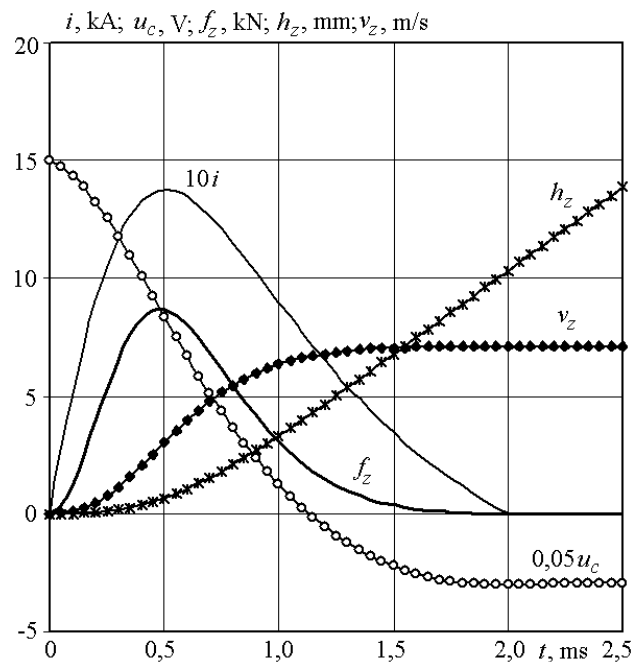


Рис. 3. Электромеханические характеристики ЛИПЭТ при работе в скоростном режиме

Возбуждение ЛИПЭТ серией импульсов осуществляется путем последовательного во времени подключения к клеммам a и b секций ЕНЭ. Так образуется параллельное подключение секций ЕНЭ к обмоткам преобразователя.

Заметим, что параллельное подключение секций ЕНЭ к ОИ линейного импульсного ускорителя индукционного типа исследовано в работах [21, 22]. Однако в этих исследованиях все секции ЕНЭ подключаются к ОИ одновременно.

Суммарная емкость секций равна $C_0 = 4 \text{ мФ}$. Время задержки подключения секций определяет период следования импульсов тока возбуждения. При таком способе возбуждения эффективность ЛИПЭТ в силовом и скоростном режимах будем оценивать безразмерными критериями:

$$K_p^* = \frac{P_z}{f_{zm}} \frac{f_{zm}^0}{P_z^0}, \quad K_v^* = \frac{v_{zm}}{f_{zm}} \frac{f_{zm}^0}{v_{zm}^0}, \quad (19)$$

где $f_{zm}^0, P_z^0, v_{zm}^0$ – максимальные значения амплитуды и импульса ЭДУ, скорости ОЯ с ИЭ соответственно при возбуждении одиночным импульсом.

Суть указанных критериев состоит в обеспечении наибольшего значения импульса ЭДУ для силового режима, и наибольшей скорости ОЯ с ИЭ для скоростного режима при минимальной амплитуде ЭДУ, которая определяет силу отдачи. Эти критерии оценивают эффективность ЛИПЭТ при возбуждении серией импульсов по отношению к возбуждению одиночным импульсом.

На рис. 4 показаны электродинамические характеристики ЛИПЭТ при работе в силовом режиме от

пяти одинаковых секций ЕНЭ, подключаемых к обмоткам последовательно с задержкой 0,75 мс. При каждом импульсе возбуждения амплитуда тока практически неизменна и составляет $i_m = 0,788$ кА, что почти в 2 раза меньше, чем при возбуждении одиночным импульсом. Еще в большей степени уменьшается амплитуда ЭДУ, составляя $f_{zm} = 3$ кН. Значение импульса ЭДУ к концу рабочего процесса также уменьшается, но в меньшей степени, составляя $P_z = 4,9$ Н·с. Уменьшаются и превышения температур обмоток ($\theta_1 = 0,13$ °С, $\theta_2 = 0,42$ °С). Однако критерий эффективности преобразователя K_p^* повышается более чем в 2 раза, по сравнению с его возбуждением одиночным импульсом.

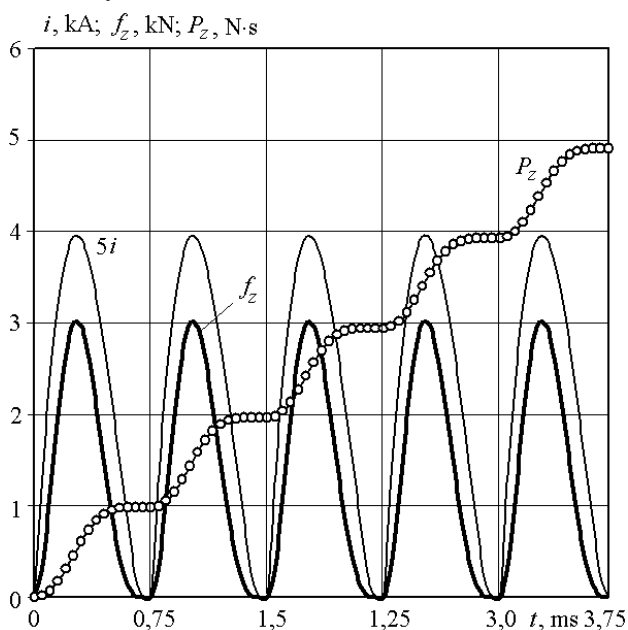


Рис. 4. Электродинамические характеристики ЛИПЭТ при возбуждении от одинаковых секций ЕНЭ

На рис. 5 показаны электромеханические характеристики ЛИПЭТ при работе в скоростном режиме от пяти одинаковых секций ЕНЭ, подключаемых к обмоткам последовательно с задержкой 1 мс. Особенностью данного преобразователя является последовательное уменьшение амплитуд токов i_m и ЭДУ f_{zm} при подключении секций ЕНЭ. Такое уменьшение указанных амплитуд обусловлено последовательным ослаблением магнитной связи между обмотками за счет перемещения ОЯ на величину h_z . В данном преобразователе наибольшие амплитуды наблюдаются в первом импульсе, составляя для тока $i_m = 0,783$ кА, для ЭДУ $f_{zm} = 2,95$ кН. Значение импульса ЭДУ составляет при этом $P_z = 3,34$ Н·с, обеспечивая скорость ОЯ с ИЭ $v_z = 3,82$ м/с. Превышения температур обмоток составляют $\theta_1 = 0,11$ °С, $\theta_2 = 0,37$ °С. Таким образом в скоростном режиме все показатели ЛИПЭТ, возбуждаемого серией из пяти импульсов, уменьшаются по сравнению с возбуждением одиночным импульсом, но критерий эффективности преобразователя K_v^* при этом повышается на 58 %.

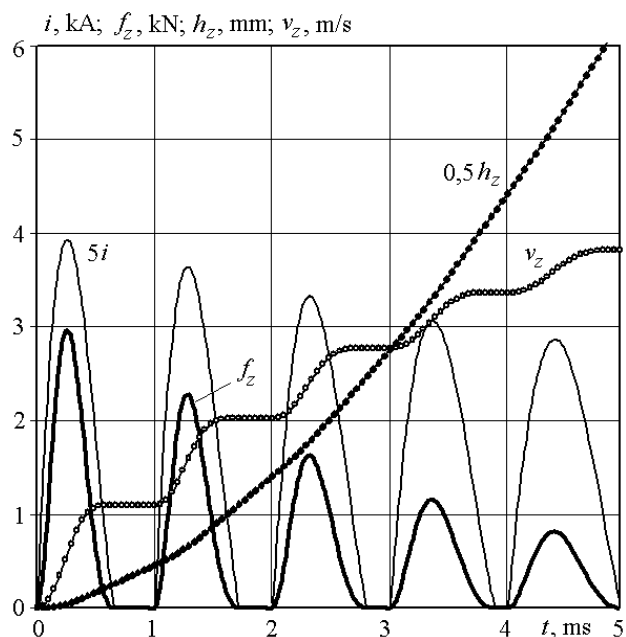


Рис. 5. Электромеханические характеристики ЛИПЭТ при возбуждении от одинаковых секций ЕНЭ

Оценить влияние количества импульсов возбуждения N_i на показатели ЛИПЭТ позволяет рис. 6. Как в силовом, так и в скоростном режимах работы, при увеличении количества импульсов возбуждения N_i , неизменном напряжении секций ЕНЭ $U_0 = 300$ В и сохранении общей их энергии $W_0 = 180$ Дж все основные показатели уменьшаются. Это амплитуды токов i_m и ЭДУ f_{zm} , величина импульса ЭДУ P_z и скорость ОЯ вместе с ИЭ v_z . Но за счет более сильного уменьшения амплитуды ЭДУ f_{zm} , которая проявляется как сила отдачи, от увеличения количества импульсов возбуждения критерии эффективности ЛИПЭТ K_p^* и K_v^* повышаются.

Уменьшить максимальные амплитуды тока и ЭДУ в первом импульсе серии для ЛИПЭТ, работающего в скоростном режиме, можно за счет последовательного увеличения емкости секций ЕНЭ при сохранении их суммарного значения $C_0 = 4$ мФ.

На рис. 7 показаны электромеханические характеристики ЛИПЭТ при работе в скоростном режиме и возбуждении от пяти секций ЕНЭ, емкости которых линейно возрастают от 0,4 мФ в первой секции до 1,2 мФ в пятой секции.

При таком возбуждении ЛИПЭТ, работающего в скоростном режиме, максимальная амплитуда тока наблюдается не в первом, а в четвертом импульсе серии и равна $i_m = 713,9$ А, что ниже, чем при возбуждении от одинаковых секций ЕНЭ. Максимальная амплитуда ЭДУ наблюдается в третьем импульсе серии и составляет $f_{zm} = 2,04$ кН. Заметим, что уменьшение амплитуды тока после четвертого импульса серии обусловлено ослаблением магнитной связи между ОИ и ОЯ. А уменьшение амплитуд ЭДУ после третьего импульса серии дополнительно вызвано увеличением расстояния между ними.

При данном способе возбуждения ЛИПЭТ значение импульса ЭДУ составляет $P_z = 3,33$ Н·с, что обеспечивает скорость ОЯ с ИЭ $v_z = 3,81$ м/с.

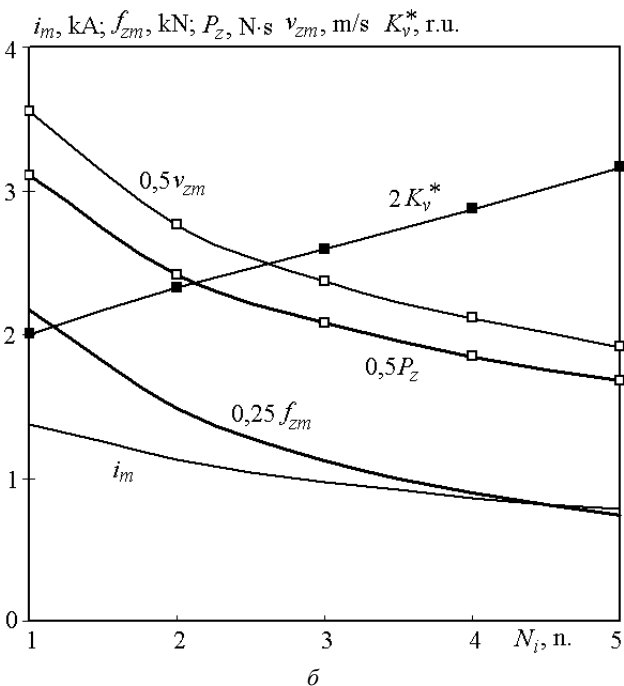
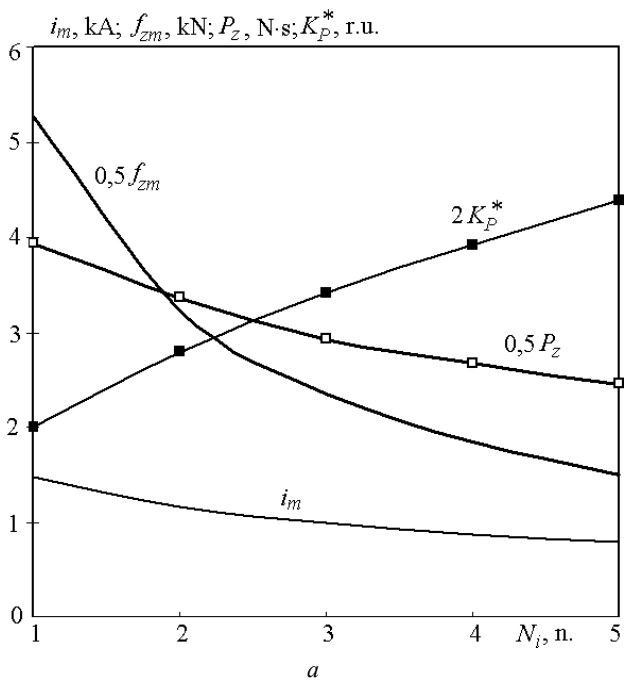


Рис. 6. Зависимость показателей работы ЛИПЭТ в силовом (а) и скоростном (б) режимах от количества импульсов возбуждения

На рис. 8 показаны электродинамические характеристики ЛИПЭТ при работе в силовом режиме и возбуждении от пяти секций ЕНЭ, емкости которых линейно возрастают от 0,5 мФ в первой секции до 1,1 мФ в пятой секции. При таком возбуждении ЛИПЭТ, работающего в силовом режиме, максимальная амплитуда тока возникает в пятом импульсе серии и равна $i_m = 908$ А, что выше, чем при возбуждении от одинаковых секций ЕНЭ. Максимальная амплитуда ЭДУ возникает также в пятом импульсе серии и составляет $f_{zm} = 3,98$ кН. Значение импульса ЭДУ составляет $P_z = 4,98$ Н·с.

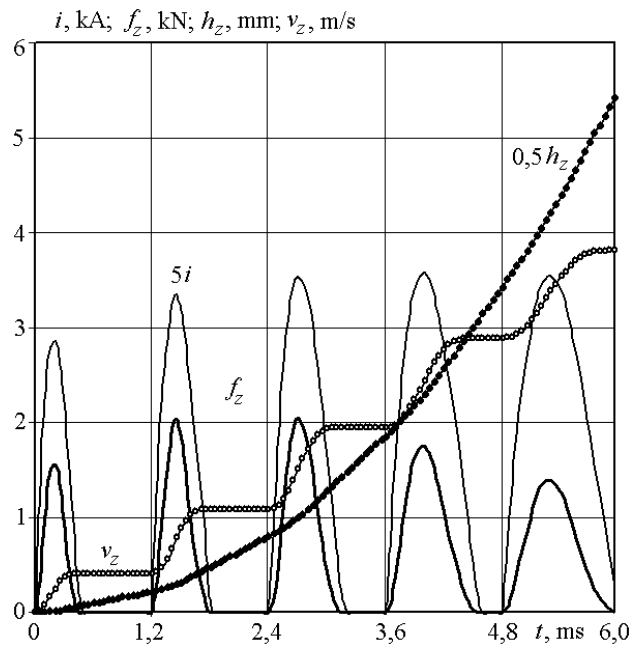


Рис. 7. Электромеханические характеристики ЛИПЭТ при работе в скоростном режиме и возбуждении от секций ЕНЭ, емкости которых линейно возрастают

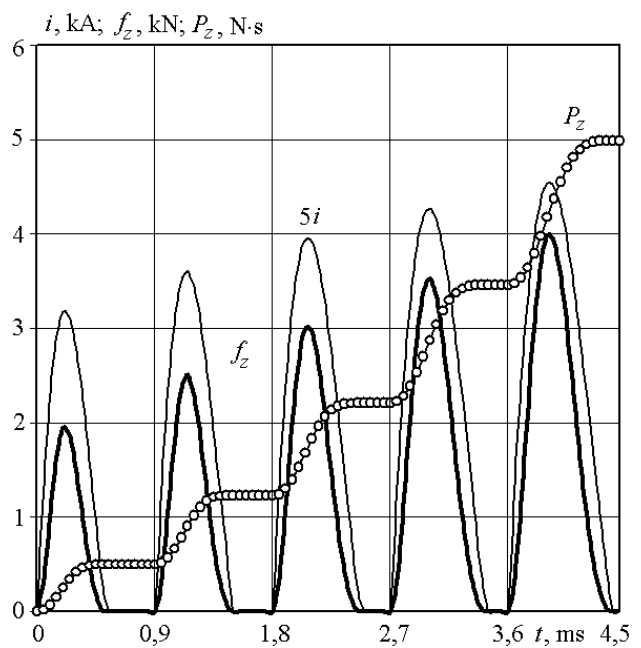


Рис. 8. Электродинамические характеристики ЛИПЭТ при работе в силовом режиме и возбуждении от секций ЕНЭ, емкости которых линейно возрастают

Оценить влияние закономерности распределения емкостей по секциям ЕНЭ на показатели ЛИПЭТ при работе в скоростном и силовом режимах позволяет рис. 9, где использован показатель распределения емкостей по секциям ЕНЭ:

$$K_c^* = 2(C_{\max} - C_{\min})(C_{\max} + C_{\min})^{-1},$$

где C_{\min} , C_{\max} – емкость первой и пятой секции ЕНЭ соответственно.

Заметим, что при $K_c^* = 0$ емкости всех пяти секций ЕНЭ одинаковы.

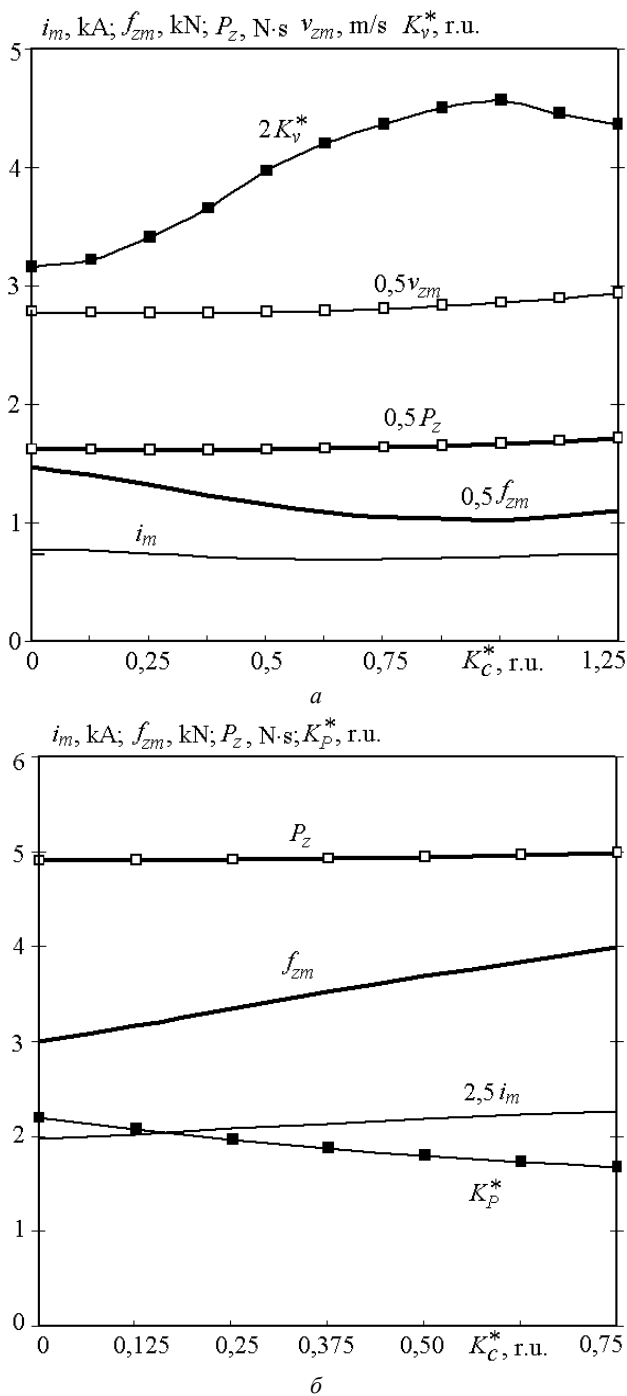


Рис. 9. Зависимость показателей работы ЛИПЭТ в скоростном (а) и силовом (б) режимах от показателя распределения емкостей по секциям ЕНЭ

При работе ЛИПЭТ в скоростном режиме увеличение показателя K_c^* существенно изменяет только максимальную амплитуду ЭДУ f_{zm} , которая заметно уменьшается в интервале $K_c^* \in (0, 1)$. Это влияет на критерий эффективности K_v^* , максимальное значение которого будет при $K_c^* = 1$ ($C_{\min} = 0,4$ мФ, $C_{\max} = 1,2$ мФ). При превышении показателем K_c^* значения 1 критерий эффективности K_v^* снижается за счет увеличения амплитуды ЭДУ в последнем пятом импульсе серии.

При работе ЛИПЭТ в силовом режиме повышение показателя K_c^* приводит к увеличению максимальной амплитуды ЭДУ f_{zm} , вследствие чего критерий эффективности K_p^* уменьшается.

Таким образом, при возбуждении серией импульсов от секций ЕНЭ за счет уменьшения амплитуды силы отдачи обеспечивается повышение эффективности ЛИПЭТ. Для преобразователя, работающего в скоростном режиме, целесообразно увеличение показателя распределения емкостей по секциям ЕНЭ до определенного значения ($K_c^* = 1$). Для преобразователя, работающего в силовом режиме, целесообразно использовать одинаковые емкости для всех секций ЕНЭ.

Выводы.

1. Показано, что при возбуждении обмоток серией импульсов от секций емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) обеспечивается повышение эффективности линейного импульсного преобразователя электродинамического типа (ЛИПЭТ) при работе в скоростном и силовом режимах за счет уменьшения амплитуды силы отдачи.

2. Представлена математическая модель ЛИПЭТ, в которой решения уравнений, описывающих взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы, представлены в рекуррентном виде.

3. Установлено, что при возбуждении одиночным импульсом ЛИПЭТ, работающего в скоростном режиме, по сравнению с силовым режимом происходит уменьшение амплитуды тока в обмотках на 7,5 %, амплитуды электродинамических усилий (ЭДУ) – на 21,8 %, значение импульса ЭДУ – на 27,1 %. При этом обмотка якоря с исполнительным элементом разгоняется до скорости 7,1 м/с.

4. Установлено, что при возбуждении серией импульсов от одинаковых секций ЕНЭ при работе ЛИПЭТ в силовом режиме, амплитуды импульсов тока и ЭДУ практически неизменны, а при работе в скоростном режиме происходит последовательное уменьшение амплитуд токов и ЭДУ. Увеличение количества импульсов возбуждения при сохранении энергии ЕНЭ приводит к уменьшению основных показателей ЛИПЭТ. Но за счет уменьшения амплитуды ЭДУ, которая проявляется как сила отдачи, эффективность ЛИПЭТ увеличивается.

5. Для ЛИПЭТ, работающего в скоростном режиме, обосновано последовательное увеличение емкостей секций ЕНЭ, формирующих серии импульсов возбуждения. Для ЛИПЭТ, работающего в силовом режиме целесообразно использовать одинаковые емкости всех секций ЕНЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.
2. Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // *Электротехника*. – 2006. – № 1. – С. 24-27.
3. J. Young-woo, L. Hyun-wook, L. Seok-won. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD. *Proceeding of the conf.*

«22-th international conference on electricity distribution». 2013, 10-13 June, Stockholm. – Paper 608.

4. D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. Characteristic Analysis and Design of a Thomson Coil Actuator Using an Analytic Method and a Numerical Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, no. 12, pp. 5749-5755. doi: 10.1109/tmag.2013.2272561.

5. Puumala V., Kettunen L. Electromagnetic design of ultrafast electromechanical switches. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, no. 3, pp. 1104-1109. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2362996.

6. Болюх В.Ф., Кашанский Ю.В., Шукин И.С. Влияние геометрических параметров индуктора и якоря на показатели линейного импульсного электромеханического преобразователя электродинамического типа. *Электротехника і електромеханіка*, 2019, № 3, С. 11-17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02.

7. Болюх В.Ф., Кашанский Ю.В., Шукин И.С. Сравнительный анализ силовых и скоростных показателей линейных импульсных электромеханических преобразователей электродинамического и индукционного типов. *Технічна електродинаміка*, 2019, № 6, С. 35-42. doi: 10.15407/techned2019.06.035.

8. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Шукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 5, С. 46-48. doi: 10.15407/techned2016.05.046.

9. Мишкин В.Н., Толстик А.И. Сравнительная оценка арретирующих устройств на электродинамическом и электромагнитном принципе действия. *Электромагнитные импульсные системы*, 1989, С. 114-117.

10. Balicki A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 171-175. doi: 10.1109/tmag.2004.839283.

11. Abdalla M.A., Mohamed H.M. Asymmetric multistage synchronous inductive coilgun for length reduction, higher muzzle velocity and launching time reduction. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 5, pp. 785-789. doi: 10.1109/TPS.2016.2543500.

12. 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.

13. Bolyukh V.F., Omel'chenko A.V., Vinnichenko A.I. Effect of self-seismic oscillations of the foundation on the readout of a ballistic gravimeter with an induction-dynamic catapult. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 137-142. doi: 10.1007/s11018-015-0675-5.

14. Zhou Y., Huang Y., Wen W., Lu J., Cheng T., Gaoet S. Research on a novel drive unit of fast mechanical switch with modular double capacitors. *Journal of Engineering*, 2019, vol. 2019, no. 17, pp. 4345-4348. doi: 10.1049/joe.2018.8148.

15. Fan G., Wang Y., Hu Y., Yan Z. Research on energy recovery system based on HTSM for synchronous induction electromagnetic launcher system. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 1, pp. 291-298. doi: 10.1109/TPS.2019.2960038.

16. Guangcheng F., Wang Y., Xu Q., Xinyi N., Yan Z. Design and analysis of a novel three-coil reconnection electromagnetic launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 814-820. doi: 10.1109/TPS.2018.2874287.

17. Niu X., Li W., Feng J. Nonparametric modeling and parameter optimization of multistage synchronous induction coilgun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 7, pp. 3246-3255. doi: 10.1109/TPS.2019.2918157.

18. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type. *Volume 2B:*

Advanced Manufacturing, Nov. 2019, 8 p. doi: 10.1115/IMECE2019-10388.

19. Liu X., Yu X., Ban R., Li Z. Analysis of the capacitor-aided meat grinder circuits for an inductive pulsed power supply. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 7, pp. 1339-1346. doi: 10.1109/TPS.2017.2705179.

20. 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.

21. Vilchis-Rodriguez D.S., Shuttleworth R., Barnes M. Experimental Validation of a Finite Element 2D Axial Thomson Coil Model with Inductance and Resistance Compensation. *13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017)*, 2017, Manchester, UK, 14-16 Feb. 2017. doi: 10.1049/cp.2017.0032.

22. Yadong Z., Ying W., Jiangjun R. Capacitor-driven coil-gun scaling relationships. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol. 39, no. 1, pp. 220-224. doi: 10.1109/TPS.2010.2052266.

REFERENCES

1. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultrafast actuator concept. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, vol. 48, no. 11, pp. 3315-3318. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.

2. Tomashevsky D.N., Koshkin A.N. Modeling of linear impulse electric motors. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no. 1, pp. 24-27. (Rus).

3. J. Young-woo, L. Hyun-wook, L. Seok-won. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD. *Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution»*. 2013, 10-13 June, Stockholm. – Paper 608.

4. D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. Characteristic Analysis and Design of a Thomson Coil Actuator Using an Analytic Method and a Numerical Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, no. 12, pp. 5749-5755. doi: 10.1109/tmag.2013.2272561.

5. Puumala V., Kettunen L. Electromagnetic design of ultrafast electromechanical switches. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, no. 3, pp. 1104-1109. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2362996.

6. Bolyukh V.F., Kashanskiy Yu.V., Schukin I.S. Influence of geometrical parameters of the inductor and armature on the indicators of a linear pulse electromechanical converter of an electrodynamic type. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 3, pp. 11-17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02.

7. Bolyukh V.F., Kashanskiy Yu.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of power and speed indicators linear pulse electro-mechanical converters electrodynamic and induction types. *Technical electrodynamic*, 2019, no. 6, pp. 35-42. (Rus). doi: 10.15407/techned2019.06.035.

8. Bolyukh V.F., Olexsenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of linear pulse electromechanical converters electromagnetic and induction types. *Technical electrodynamic*, 2016, no. 5, pp. 46-48. (Rus). doi: 10.15407/techned2016.05.046.

9. Mishkin V.N., Tolstik A.I. Comparative evaluation of arresting devices on the electrodynamic and electromagnetic principle of action. *Electromagnetic pulse systems*, 1989, pp. 114-117. (Rus).

10. Balicki A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 171-175. doi: 10.1109/tmag.2004.839283.

11. Abdalla M.A., Mohamed H.M. Asymmetric multistage synchronous inductive coilgun for length reduction, higher muzzle velocity and launching time reduction. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 5, pp. 785-789. doi: 10.1109/TPS.2016.2543500.

12. 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.
13. Bolyukh V.F., Omel'chenko A.V., Vinnichenko A.I. Effect of self-seismic oscillations of the foundation on the readout of a ballistic gravimeter with an induction-dynamic catapult. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 137-142. doi: 10.1007/s11018-015-0675-5.
14. Zhou Y., Huang Y., Wen W., Lu J., Cheng T., Gaoet S. Research on a novel drive unit of fast mechanical switch with modular double capacitors. *Journal of Engineering*, 2019, vol. 2019, no. 17, pp. 4345-4348. doi: 10.1049/joe.2018.8148.
15. Fan G., Wang Y., Hu Y., Yan Z. Research on energy recovery system based on HTSM for synchronous induction electromagnetic launcher system. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 1, pp. 291-298. doi: 10.1109/TPS.2019.2960038.
16. Guangcheng F., Wang Y., Xu Q., Xinyi N., Yan Z. Design and analysis of a novel three-coil reconnection electromagnetic launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 814-820. doi: 10.1109/TPS.2018.2874287.
17. Niu X., Li W., Feng J. Nonparametric modeling and parameter optimization of multistage synchronous induction coil-gun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 7, pp. 3246-3255. doi: 10.1109/TPS.2019.2918157.
18. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type. *Volume 2B: Advanced Manufacturing*, Nov. 2019, 8 p. doi: 10.1115/IMECE2019-10388.
19. Liu X., Yu X., Ban R., Li Z. Analysis of the capacitor-aided meat grinder circuits for an inductive pulsed power supply. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 7, pp. 1339-1346. doi: 10.1109/TPS.2017.2705179.
20. 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.
21. Vilchis-Rodriguez D.S., Shuttleworth R., Barnes M. Experimental Validation of a Finite Element 2D Axial Thomson Coil Model with Inductance and Resistance Compensation. *13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017)*, 2017, Manchester, UK, 14-16 Feb. 2017. doi: 10.1049/cp.2017.0032.
22. Yadong Z., Ying W., Jiangjun R. Capacitor-driven coil-gun scaling relationships. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol. 39, no. 1, pp. 220-224. doi: 10.1109/TPS.2010.2052266.

Поступила (received) 18.05.2020

Болух Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
Шукин Игорь Сергеевич^{1,2}, к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +380 57 7076427, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

²ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
61024, Харьков, ул. Гуданова, 18,
тел/phone +380 57 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, I.S. Schukin^{1,2}

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Firm Tetra, LTD,

18, Gudanova Str., Kharkiv, 61024, Ukraine.

Excitation with a series of pulses of a linear pulse electrodynamic type converter operating in power and high-speed modes.

Purpose. The aim of the article is to increase the efficiency of linear pulse electrodynamic type converter (LPEC) when operating in high-speed and force modes by reducing the amplitude of the recoil force by exciting its windings with a series of pulses from the capacitive energy storage (CES). **Methodology.** Using the LPEC mathematical model, in which the equations describing the interconnected electrical, magnetic, mechanical and thermal processes are presented in a recursive form, the electrodynamic and electromechanical characteristics of LPEC are simulated by excitation by a single and a series of pulses from CES sections. **Results.** It was found that when a single pulse is excited by an LPEC operating in a high-speed mode, in which the armature accelerates the actuator, compared with the force mode in which the armature is inhibited, the current amplitude in the windings decreases by 7.5 %, and the amplitudes of electrodynamic force (EDF) – by 21.8 %, impulse values of EDF – by 27.1 %. In this case, the armature winding with the actuating element accelerates to a speed of 7.1 m/s. When excited by a series of pulses from the same sections of the CES during LPEC operation in the force mode, the amplitudes of the current pulses and the EDF are practically unchanged, and when operating in high-speed mode, the amplitudes of the currents and the EDF gradually decrease. Both in power and in high-speed operating modes, an increase in the number of excitation pulses while conserving the energy of the CES leads to a decrease in the main indicators of LPEC. But by reducing the amplitude of the EDF, which manifests itself as a recoil force, the efficiency of LPEC increases. **Originality.** It is shown that the excitation of LPEC by a series of pulses increases the efficiency of LPEC when operating in high-speed and power modes, providing a minimum amplitude of the EDF, which determines the recoil force acting on the inductor winding. **Practical value.** For LPEC operating in high-speed mode, it is proposed to reduce the maximum current amplitudes and EDF due to the sequential increase in capacitances of sections of the CES, forming a series of excitation pulses. For LPEC, operating in force mode, it is advisable to use the same capacities of all sections of the CES. References 22, figures 9.

Key words: linear pulse electrodynamic type converter, mathematical model, high-speed and force operation mode, excitation by a series of pulses, recoil force, efficiency criterion.