

В.Ф. Боллох, А.И. Кочерга, С.В. Олексенко, И.С. Щукин

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Розроблено методику експериментальних досліджень, яка полягає у одночасному реєструванні електричних та механічних параметрів лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача. При роботі в якості ударно-силового пристрою силові показники реєструються з використанням пьезодатчика, системи тензодатчиків, датчика пульсації тиску та швидкісної відео зйомки. При роботі перетворювача в якості електромеханічного прискорювача швидкісні показники реєструються з використанням резистивного датчика переміщень. Показано, що електромеханічні процеси в перетворювачі носять складний просторово-часовий характер. Результати експериментальних досліджень задовільно узгоджуються з розрахунковими показниками, які отримані за допомогою математичної моделі, що описує швидкоплинні електромагнітні, теплові та механічні процеси, що виникають при переміщенні якоря відносно індуктора. Бібл. 13, рис. 18.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, ударно-силовий пристрій, електромеханічний прискорювач, методика експериментальних досліджень, математична модель.

Разработана методика экспериментальных исследований, которая состоит в одновременной регистрации электрических и механических силовых и скоростных параметров линейного импульсного электромеханического преобразователя. При работе преобразователя в качестве ударно-силового устройства силовые показатели регистрируются с использованием пьезодатчика, системы тензодатчиков, датчика пульсации давления и скоростной видеосъемки. При работе преобразователя в качестве электромеханического ускорителя скоростные показатели регистрируются с использованием резистивного датчика перемещений. Показано, что электромеханические процессы в преобразователе носят сложный пространственно-временной характер. Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с расчетными показателями, полученными при помощи математической модели, которая описывает быстропротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, возникающие при перемещении якоря относительно индуктора. Библ. 13, рис. 18.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь, ударно-силовое устройство, электромеханический ускоритель, методика экспериментальных исследований, математическая модель.

Введение. Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) предназначены для создания ударно-механических импульсов на объект воздействия при незначительном перемещении исполнительного элемента (ИЭ) или для его ускорения на коротком активном участке [1]. Эти преобразователи используются во многих отраслях науки и техники в качестве ударно-силовых устройств и электромеханических ускорителей.

В строительстве применяются электромагнитные молоты и устройства для забивания свай, в горной промышленности – бутобои и вибраторы, в геолого-разведке – вибросейсмоисточники, в машиностроении – прессы и молоты с большим диапазоном энергии удара, в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и дозаторы.

ЛИЭП также применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственной аппаратуры на ударные нагрузки, в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, уничтожения информации на цифровых носителях и др. [2-4].

ЛИЭП индукционного типа обеспечивает бесконтактное перемещение электропроводящего якоря относительно неподвижного индуктора, возбуждаемого от импульсного источника, например, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) с электронной системой формирования токового импульса [5]. В нем возникают быстропротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, которые проявляются при быстром перемещении якоря в условиях окру-

жающей среды.

Математические модели ЛИЭП реализуется, как правило, с использованием либо цепных, либо полевых представлений [6, 7]. При этом возникает вопрос о соответствии параметров ЛИЭП, полученных расчетными методами при помощи математических моделей, и параметров, полученных экспериментально.

Поскольку рабочий цикл рассматриваемых преобразователей длится 1...2 мс с быстрым перемещением якоря, то это накладывает особенности на проведение экспериментальных исследований [8].

Целью статьи является обоснование методики экспериментальных исследований ЛИЭП, которые используются в качестве ударно-силовых устройств и электромеханических ускорителей, и сравнение экспериментальных результатов с расчетными показателями, полученными при помощи математической модели.

Математическая модель. В ЛИЭП индукционного типа при возбуждении от ЕНЭ возникают быстропротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, происходящие при быстром перемещении якоря относительно обмотки индуктора (ОИ). Реализация математической модели ЛИЭП с использованием цепного подхода, основанного на теории электрических цепей, не позволяет в полной мере описать совокупность пространственно-временных процессов [7]. Исходя из этого, разработана математическая модель ЛИЭП, которая основана на полевом подходе, использующем метод конечных элементов [9]. Для определения электромагнитных параметров ЛИЭП в цилиндрической системе коор-

© В.Ф. Боллох, А.И. Кочерга, С.В. Олексенко, И.С. Щукин

динат $\{r, z\}$ рассчитывается векторный магнитный потенциал A

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

где $\mu(B)$ – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля B ферромагнитного материала; σ – электропроводность якоря.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}; \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}. \quad (2)$$

Граничными условиями системы выступает уравнение $n \times A = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали к поверхности. Для ферромагнитных материалов используется нелинейная кривая намагничивания $B = f(H)$

Ток в индукторе определяется с использованием уравнения:

$$(R_e + R_1)i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_l}{dt} dv = U_0, \quad (3)$$

где R_e – активное сопротивление внешней цепи; R_1 – активное сопротивление ОИ; i_1 – ток ОИ; L_e – индуктивность внешней цепи; U_0 – зарядное напряжение ЕНЭ; C – емкость ЕНЭ; N_1 – число витков индуктора; s – площадь поперечного сечения ОИ, пронизываемая магнитным потоком; A_l – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V – объем индуктора.

Электродинамические усилия (ЭДУ), действующие на якорь, находятся с использованием тензора натяжений Максвелла:

$$f_z = 0,5 \oint_S [B \cdot n + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (4)$$

где S – площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря; n – единичный вектор нормали к поверхности якоря.

Импульс ЭДУ, определяющий интегральное силовое воздействие на якорь, описывается выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (5)$$

Механические процессы ЛИЭП при аксиальном перемещении якоря описываются уравнением

$$(m_e + m_2) \frac{dv_z}{dt} = f_z', \quad (6)$$

где $f_z' = f_z - k_\mu v_z - 0,125\pi\gamma_a \beta_a D_m^2 v_z^2$; m_e – масса ИЭ; m_2 – масса якоря; v_z – скорость якоря; k_μ – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность воздуха; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления; D_m – внешний диаметр ИЭ.

Аксиальные перемещение Δz и скорость v_z якоря на каждом расчетном шаге Δt можно представить в виде рекуррентных соотношений [5]

$$\Delta z(t_{k+1}) = \Delta z(t_k) + v_z(t_k) \Delta t + f_z' \Delta t^2 (m_e + m_2)^{-1}; \quad (7)$$

$$v_z(t_{k+1}) = v_z(t_k) + f_z' \Delta t (m_e + m_2)^{-1}. \quad (8)$$

Уравнения (1) – (8) описывают электромеханические процессы в ЛИЭП при начальных условиях: $u_c(0)=U_0$; $i_1(0)=0$; $\Delta z(0)=0$; $v_z(0)=0$, где u_c – напряжение ЕНЭ. При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора, деформации элементов и строго аксиальное расположение и перемещения якоря относительно индуктора.

Для определения температуры нагрева ОИ и якоря ЛИЭП используем полевую модель, которая позволяет на каждом временном шаге учесть пространственное распределение температур в активных (ОИ и якорь) и пассивных (каркас индуктора, силовой диск якоря) элементах ЛИЭП [10].

Решение системы уравнений (1) – (8) получено с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира при интегрировании по времени. При перемещении якоря используется «деформируемая» сетка. Для решения поставленной цели была разработана математическая модель ЛИЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [11].

Моделирование электрических процессов осуществлялось физическими модулями «Electrical circuit», который рассчитывал переходные процессы, и «Magnetic fields», который рассчитывал параметры на основе магнитного поля с учетом перемещения электропроводящего якоря. Моделирование магнитных процессов осуществлялось физическим модулем «Magnetic fields», в котором электромагнитный процесс описывается системой дифференциальных уравнений для каждого узла сеточного разбиения. Моделирование тепловых процессов осуществлялось физическим модулем «Heat transfer in solid».

Математическая модель ЛИЭП реализуется в следующей последовательности:

- выбираются физические модули («Magnetic fields», «Electrical circuit», «Heat transfer in solid», «Fluid structure interaction»), размерность задачи (2D), тип модели (*time-dependent*) и метод расчета;
- формируется геометрия ЛИЭП и определяются расчетные области физических задач;
- задаются исходные данные в виде величин и функций, описывающих взаимосвязи между параметрами, например, зависимость удельного сопротивления материала от температуры;
- задаются начальные и граничные условия рассматриваемых физических задач;
- выполняется дискретизация расчетных областей с учетом геометрической модели ЛИЭП;
- выбираются методы решения, как правило, *MUMPS*, *PARDISO* и проводятся численные расчеты.

Решение мультифизической математической модели ЛИЭП производится методом *BDF* (*backward differentiation formula*) или методом *Generalized alpha* с плавающим шагом и ограничениями по времени. Это обусловлено изменением величины погрешности расчета в зависимости от выбранного шага. Решение задачи начинается с шага по времени на 6 порядков

меньшего, чем максимально установленный шаг. Этот шаг автоматически варьируется в зависимости от условий сходимости и показателей относительной погрешности полученных решений.

Электро-механические процессы ЛИЭП. Рассмотрим ЛИЭП индукционного типа коаксиальной дисковой конфигурации [12]. Данный ЛИЭП состоит из неподвижной ОИ с внешним диаметром $D_{ex1} = 100$ мм, внутренним диаметром $D_{in1} = 10$ мм, высотой $H_1 = 10$ мм и количеством витков $N_1 = 46$ шт. медной шины сечением $a \times b = 1,8 \times 4,8$ мм². Якорь выполнен в виде медного диска с параметрами: внешний диаметр $D_{ex2} = 100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2} = 10$ мм, высота $H_2 = 3$ мм. К якорю присоединен ударный ИЭ массой $m_e = 0,275$ кг. ЕНЭ имеет емкость $C = 2850$ мкФ и зарядное напряжение $U_0 = 400$ В. Электронная система обеспечивает формирование полярного аperiodического тока в ОИ, для чего последняя шунтирована обратным диодом.

Электро-механические процессы в ЛИЭП носят сложный пространственно-временной характер. На рис. 1 представлены: плотность тока в индукторе j_1 , усредненная по сечению плотность тока в якорю j_2 , величина ЭДУ f_z и импульс ЭДУ F_z , которые действуют на якорь, перемещаемый на расстояние z относительно индуктора со скоростью v_z . Через $t = 1,2$ мс после начала рабочего процесса ток в якорю меняет полярность, что обуславливает следующий характер силового воздействия: начальное отталкивание сменяется последующим притяжением.

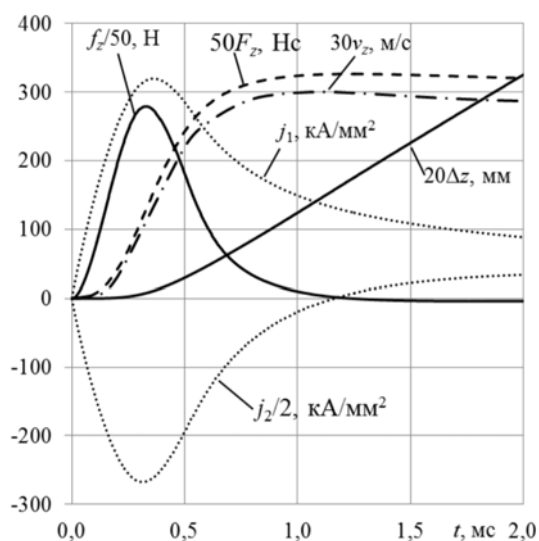


Рис. 1. Электро-механические характеристики ЛИЭП

Процесс перемещения якоря начинается через определенное время после начала рабочего процесса. На каждом временном шаге наблюдается существенная неравномерность распределения индукции магнитного поля B в активных элементах ЛИЭП (рис. 2,а). Наибольшая концентрация поля наблюдается в области между ОИ и якорем. Однако это происходит только в определенные моменты времени, например, в момент действия максимальных ЭДУ. В последующем максимальная индукция магнитного поля уменьшается и перемещается в центральную часть индуктора.

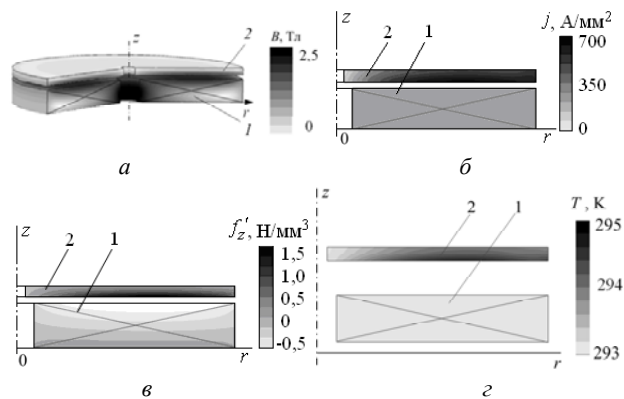


Рис. 2. Распределение магнитных полей (а) и плотностей тока (б) и удельных аксиальных усилий (в) в момент максимума ЭДУ и распределение теплового поля в конце рабочего цикла (г): 1 – ОИ; 2 – якорь

При работе ЛИЭП в каждый момент времени наблюдается существенная пространственная неравномерность плотности индуцированного тока в якорю (рис. 2,б). Удельные ЭДУ f_z неравномерно воздействуют как на якорь, так и на ОИ (рис. 2,в). При этом градиенты температур T в якорю незначительны, а в ОИ практически отсутствуют через 1 мс после начала работы при одном рабочем цикле (рис. 2,г).

При работе ЛИЭП в качестве ускорителя необходимо, в первую очередь, контролировать перемещение якоря, а при работе в качестве ударно-силового устройства – величину силового воздействия на соответствующий объект.

В экспериментальных исследованиях использовались электролитические конденсаторы НЛ с номинальным напряжением $U_0 = 450$ В и емкостями $C = 150$ мкФ и $C = 330$ мкФ.

Методика проведения экспериментальных исследований ЛИЭП состоит в том, что одновременно регистрируются электрические параметры (ток в ОИ) и механические параметры, характеризующие силовые и скоростные показатели якоря с ИЭ. Силовые показатели, прежде всего, важны для ударно-силовых устройств, а скоростные – для электро-механических ускорителей.

Силовые показатели исследовались с использованием пьезодатчиков, системы тензодатчиков, датчика пульсации давления и скоростной видеосъемки. Скоростные показатели исследовались при помощи резистивного датчика перемещений, позволяющего регистрировать характер движения якоря с ИЭ в каждый момент времени.

Исследования ЛИЭП в качестве ударно-силового устройства.

Исследование с использованием пьезодатчиков. Для экспериментальных исследований ЛИЭП, работающего в качестве ударно-силового устройства была разработана установка, включающая индуктор 1, содержащий ОИ, которая при помощи эпоксидной смолы замонтирована в стеклотекстолитовом каркасе (рис. 3).

Индуктор прикреплен к опорной пластине 2. К якорю 3 присоединен стальной ударный диск 4, который воздействует на вертикально установленный боек 5, изготовленный из стали 70, совершающий удары по

верхней стальной плиты 6. Опорная пластина 2 прикреплена к нижней стальной плите 7. Плиты 6 и 7 соединены между собой посредством регулируемых опор 8, что позволяет изменять величину рабочего хода бойка Z_e . Пружины 9 обеспечивают заданную силу противодействия движению. На плите 6, ограничивающей рабочий ход бойка 5, сверху установлен пьезодатчик 10, который осуществляет преобразование механических колебаний, возникающих при ударе бойка, в электрические сигналы, передавая их на измеритель шума и вибрации ВШВ-003. Измеритель преобразует электрические сигналы пьезодатчика в величины виброускорения a_f и виброскорости v_f . При исследовании ЛИЭП одновременно измеряются ток в ОИ и вибрация плиты 6 при помощи двухканального электронного осциллографа RIGOL DS 522M.

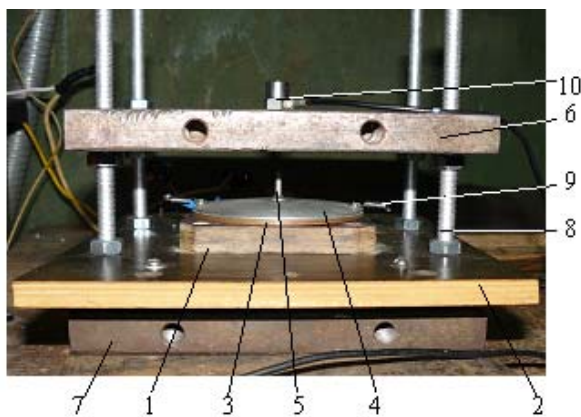
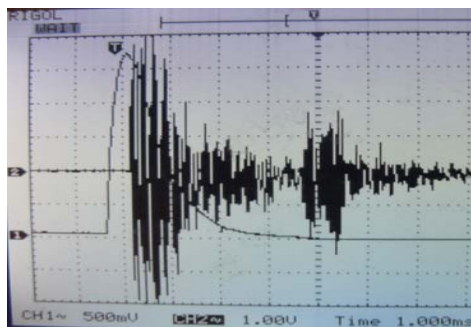
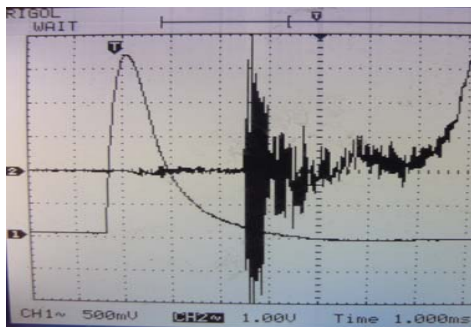


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования ЛИЭП с использованием пьезодатчика

На рис. 4 представлены осциллограммы токов ОИ i_1 и виброускорений a_f при различной величине рабочего хода якоря Z_e .



а



б

Рис. 4. Осциллограммы тока в ОИ (канал CH1) и виброускорения (канал CH2) при величине рабочего хода Z_e : 0 мм (а); 10 мм (б)

При отсутствии рабочего хода якоря вибрация верхней плиты, регистрируемая датчиком, возникает с некоторым запаздыванием t_0 по отношению к моменту возникновения тока в ОИ. При увеличении величины рабочего хода Z_e возрастает и время запаздывания вибрационных процессов верхней плиты по отношению к моменту возникновения тока в ОИ t_z .

На основе экспериментальных исследований определяются:

- форма i_1 и амплитудное значение I_{1m} тока ОИ;
- длительность фронта импульса тока ОИ t_{fr} ;
- длительность импульса тока ОИ t_{pul} ;
- время запаздывания вибрации верхней плиты по отношению к моменту возникновения тока ОИ t_z ;
- средняя скорость якоря с ИЭ $V_0 = Z_e(t_z - t_0)^{-1}$;
- величина виброускорения $a_f(t)$, пропорциональная мгновенной силе $f_z(z, t)$, действующей на верхнюю плиту;
- величина виброскорости $v_f(t)$, пропорциональная импульсу силы F_z , действующему на верхнюю плиту.

Измеренные значения средней скорости якоря с ИЭ V_0 при различной величине рабочего хода якоря Z_e на 8 – 15 % меньше расчетных, что можно объяснить не полным учетом всех противодействующих и тормозных сил. Аналогичные зависимости проявляются между расчетными и экспериментальными значениями импульса ЭДУ F_z (рис. 5).

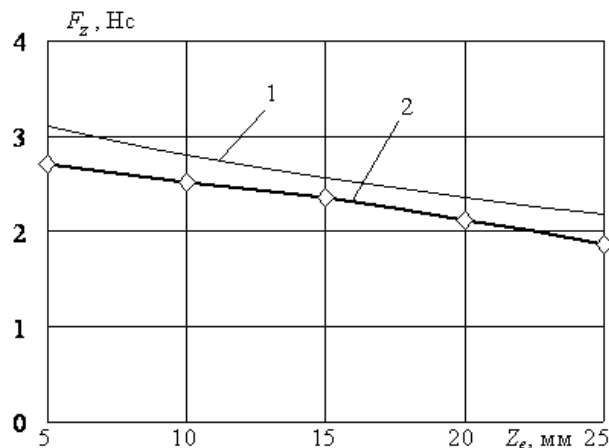


Рис. 5. Зависимости рассчитанных (1) и измеренных (2) значений импульса ЭДУ от величины рабочего хода якоря

Таким образом, наибольшие значения импульса ЭДУ F_z возникают при заторможенном якоре, затем они уменьшаются практически линейно с увеличением рабочего хода якоря Z_e . Как экспериментальные, так и расчетные зависимости практически линейно возрастают при увеличении напряжения U_0 , причем амплитуды тока ОИ I_{1m} при наличии якоря возрастают.

Экспериментально было исследовано влияние формы якоря, параметров ЕНЭ, рабочего хода Z_e , начального зазора ΔZ_0 между якром и индуктором и ускоряемой массы на показатели ЛИЭП. Установлено, что при использовании круглого якоря по сравнению с якром прямоугольной формы процессы изменяются следующим образом: максимальная величина ЭДУ f_z возрастает на 25 %, амплитуда тока ОИ I_{1m} возрастает на 5 %, а длительность импульса тока ОИ

t_{pul} и время запаздывания t_z уменьшаются на 10 %. Это свидетельствует о большей эффективности круглого якоря по сравнению с прямоугольным.

С увеличением напряжения ЕНЭ в 2 раза амплитуда тока ОИ возрастает более чем в 2 раза, практически в 5 раз увеличивается амплитуда виброускорения a_{vib} , а значит и мгновенное значение ЭДУ f_z , действующих на верхнюю плиту. Время запаздывания t_z при этом уменьшается от 0,7 до 0,5 мс.

С увеличением рабочего хода Z_e растет время запаздывания t_z вибрации верхней плиты по отношению к началу токового импульса ОИ, что приводит к уменьшению амплитуды ЭДУ f_z . На осциллограммах незначительная вибрация верхней плиты, возникающая до удара по ней бойка, обусловлена отдачей индуктора, передаваемой через регулируемые опоры (рис. 4,б).

На рис. 6,а показано влияние емкости C при различных напряжениях U_0 ЕНЭ на амплитуду тока ОИ I_{1m} ЛИЭП. Экспериментальные и расчетные значения амплитуды тока возрастают при увеличении емкости C : при увеличении емкости в 2 раза (от 2000 до 4000 мкФ), величина тока возрастает на 17 %. Причем амплитуда тока ОИ I_{1m} тем выше, чем больше напряжение U_0 . Рост значений I_{1m} более существенный в интервале емкостей $C = 2000 \dots 3000$ мкФ.

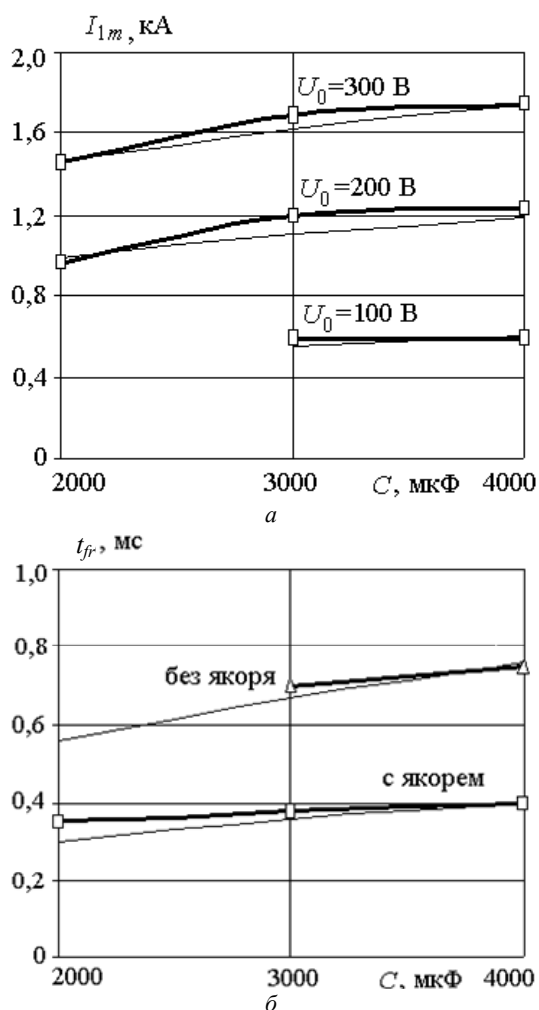


Рис. 6. Зависимость экспериментальных (жирные линии) и расчетных (тонкие линии) значений амплитуды (а) и длительности фронта (б) тока ОИ ЛИЭП от емкости ЕНЭ

Величина напряжения U_0 ЕНЭ незначительно влияет на длительность фронта импульса тока ОИ t_{fr} . Длительность фронта остается практически неизменной при разных U_0 и фиксированных значениях емкости C ЕНЭ. На рис. 6,б приведены кривые, отображающие влияние емкости ЕНЭ C на длительность фронта импульса тока ОИ t_{fr} при наличии и отсутствии якоря в ЛИЭП. Как экспериментальные, так и расчетные значения длительности фронта тока ОИ растут при увеличении емкости ЕНЭ C , имея практически одинаковую закономерность. Причем длительность фронта тока ОИ t_{fr} выше в ЛИЭП без якоря.

На эффективность ЛИЭП существенно влияет начальный зазор между якорем и индуктором ΔZ_0 (рис. 7). При увеличении зазора ΔZ_0 уменьшается магнитная связь между якорем и ОИ, а значит, влияние якоря на ток ОИ i_1 снижается, что приводит к уменьшению амплитуды тока I_{1m} .

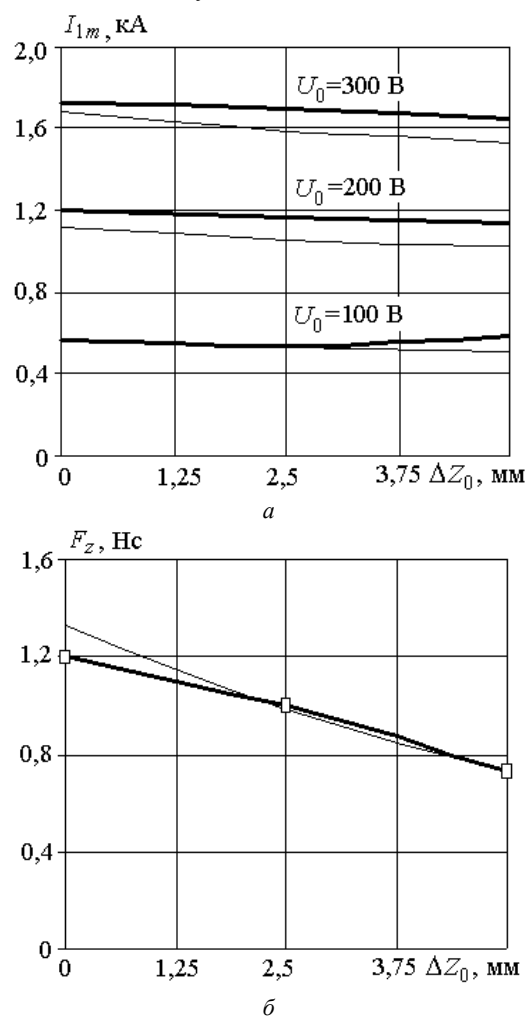


Рис. 7. Зависимость экспериментальных (жирные линии) и расчетных (тонкие линии) значений амплитуды тока в ОИ (а) и импульса ЭДУ (б) от величины начального зазора между индуктором и якорем

Чем больше начальный зазор, тем больше кривая тока ОИ становится подобной кривой тока ОИ при отсутствии якоря (магнитная связь индуктора с якорем равна нулю). Увеличение начального зазора ΔZ_0 приводит к существенному уменьшению импульса ЭДУ. На рис. 7,б показана зависимость эксперимен-

тального и расчетного значений импульса ЭДУ от начального зазора при использовании ЕНЭ с параметрами $C = 3000 \text{ В}$, $U_0 = 200 \text{ В}$.

С увеличением начального зазора ΔZ_0 между якорем и индуктором в 2 раза с 2,5 до 5 мм амплитуда тока в ОИ I_m уменьшается на 8 %, длительность импульса тока ОИ t_{pul} увеличивается на 6 %, а фронт импульса тока ОИ t_{fr} – на 8 %. При этом величина виброускорения a_{vib} , а значит и ЭДУ f_z уменьшаются на 25 %, время запаздывания t_z увеличивается почти в 2 раза. При увеличении ΔZ_0 от 0 до 5 мм величина импульса силы уменьшается на 54 %. Это свидетельствует о том, что начальный зазор между индуктором и якорем необходимо выбирать минимально возможным.

На рис. 8 приведены экспериментальные и расчетные значения средней скорости якоря V_0 на участке рабочего хода Z_e при $C=7000 \text{ мкФ}$, но разных напряжениях U_0 ЕНЭ. Расчетная скорость несколько выше экспериментальной, что можно объяснить более сложным характером реального аэродинамического сопротивления, по сравнению с заложенным в математическую модель, не полным учетом всех противодействующих сил и наличием отдачи индуктора.

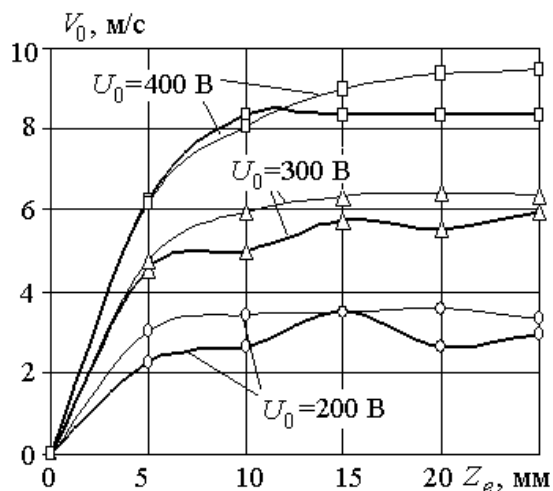


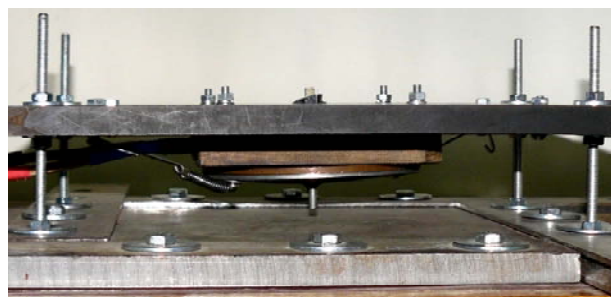
Рис. 8. Экспериментальные (жирные линии) и расчетные (тонкие линии) зависимость средней скорости от перемещения якоря ЛИЭП

С уменьшением емкости ЕНЭ C в 2,2 раза (от 6270 до 2859 мкФ) электрические процессы изменяются следующим образом: амплитуда тока в ОИ I_m уменьшается на 28 %, длительность импульса тока в ОИ t_{pul} – на 71 %, фронт импульса тока ОИ t_{fr} – на 43 %. Вследствие этого время запаздывания t_z уменьшается на 14 %, а величина импульса ЭДУ F_z – в 3,12 раза.

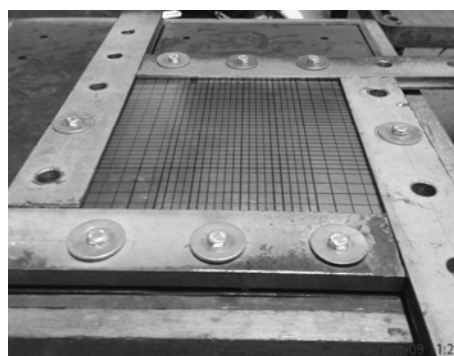
В целом, проведенные экспериментальные исследования с использованием пьезодатчиков удовлетворительно согласуются с теоретическими результатами. Они показали, что можно эффективно регистрировать показатели силового воздействия ЛИЭП на объект, что важно для ударно-силовых устройств.

Исследование с использованием тензодатчиков. Рассмотрим эффективность применения тензодатчиков для регистрации силового воздействия на объект. Экспериментальный стенд для исследования ЛИЭП, работающего в качестве ударно-силового

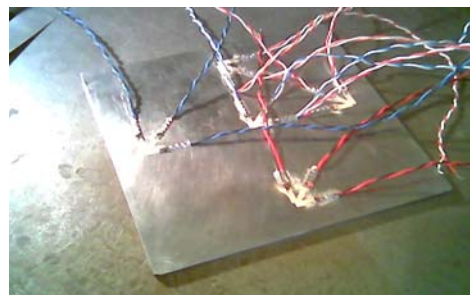
устройства, представлен на рис. 9,а. ЛИЭП крепится к изоляционной опорной плите, которая устанавливается на вертикальных регулируемых опорах. При помощи этих опор можно изменять высоту подъема опорной плиты, устанавливая таким образом величину рабочего хода якоря с бойком Z_e .



а



б



в

Рис. 9. Экспериментальная установка для исследования ЛИЭП с использованием тензодатчиков (а) и объект воздействия – стальная пластина с тензодатчиками: вид сверху (б) и снизу (в)

ЛИЭП обеспечивает перемещение якоря с бойком вертикально вниз до соударения с объектом воздействия – ударной стальной пластиной с размерами $0,18 \times 0,18 \times 0,006 \text{ м}^3$ (рис. 9,б). Ударная пластина с обратной стороны покрыта сетью тензодатчиков, объединенных в розетки. Провода от датчиков выводятся сквозь отверстия в плите, которая закреплена на опорной раме. Эти датчики образуют пять групп, симметрично расположенных относительно точки удара, причем в каждой группе содержится три датчика, одна сторона которых образует узел, а другие стороны – лучи под углом 45° друг к другу (рис. 9,в). Стенд содержит сменный держатель ударной пластины, что позволяет реализовать различные виды крепления: шарнирное, жесткое и свободное опирание.

Для измерения сопротивления тензорезисторов применена мостовая схема. Для измерения падения

напряжения использован дифференциальный приемник сигнала.

При проведении экспериментов использован информационно-измерительный комплекс, предназначенный для регистрации деформационных процессов в объекте воздействия [13]. Комплекс содержит блок формирования сигналов тензодатчиков, стабилизированный блок питания, блок сопряжения и защиты, АЦП ADA-1406 и персональный компьютер. Цифровые данные, полученные с платы АЦП, поступают на компьютер, где обрабатываются при помощи специального программного обеспечения. Оно позволяет записать сигнал, определить значения измеренных параметров, спектров сигналов и время затухания колебаний. В качестве приемника в блоке формирования сигналов датчиков применен прецизионный инструментальный усилитель AD623, позволяющий подавлять синфазную помеху, попадающую на вход вместе с полезным сигналом. Запуск испытательной установки происходит дистанционно одновременно с началом испытаний.

При работе ЛИЭП возбуждаются интенсивные магнитные поля, которые генерирует сигналы тензодатчиков, пропорциональные аксиальной составляющей поля в их месте расположения. Таким образом, при отсутствии деформационных процессов в ударной пластине магнитное поле ЛИЭП формирует фоновые сигналы тензодатчиков, амплитуды которых увеличиваются с повышением напряжения U_0 (рис. 10).

Опытным путем было установлено, что воздействие бойка по центру ударной пластины не вызывает в ней пластических деформаций. Была проведена серия ударных воздействий, на основании которых определено среднее значение амплитуды сигнала, снимаемого с центральной «розетки» тензодатчиков ударной пластины. Вычитая из значений сигналов фоновый уровень, получаем величину деформации ударной пластины. На рис. 11 кружками обведены всплески сигналов тензодатчиков на осциллограммах, которые соответствуют деформационным процессам, вызванным ударными воздействиями бойка ЛИЭП на пластину.

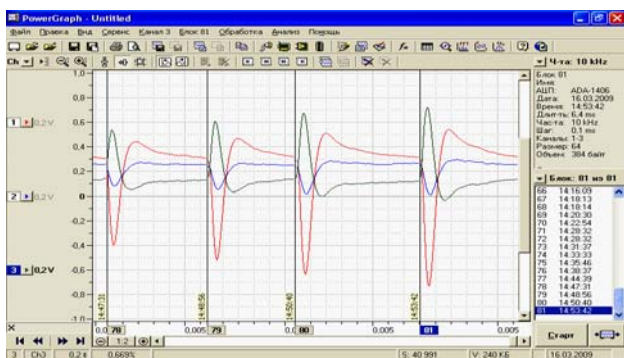
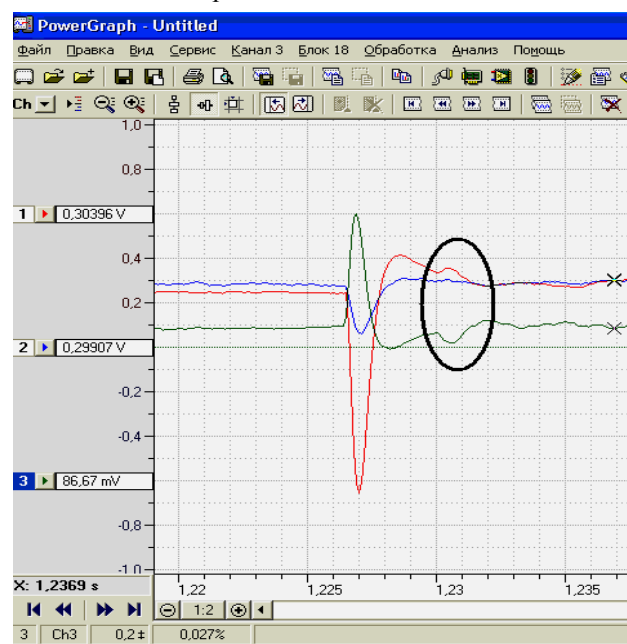


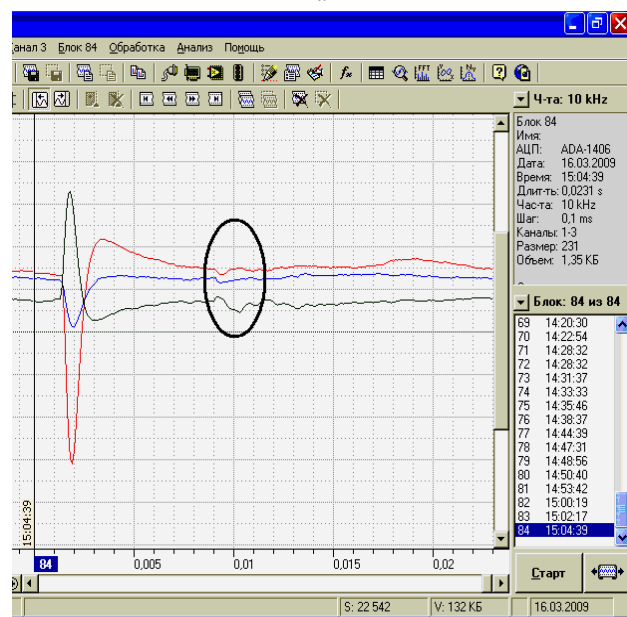
Рис. 10. Фоновые сигналы тензодатчиков, наводимые магнитным полем при напряжениях U_0 : 250; 300; 350; 400 В (слева направо)

Усредненная величина максимальных значений этих всплесков сигналов соответствует максимальной величине ЭДУ f_z , действующих на ударную пластину

(1 мВ сигнала эквивалентен силовой нагрузке 8,936 Н). Длительность ударного импульса t_{pul} определяется длительностью первого всплеска сигнала.



а



б

Рис. 11. Сигналы тензодатчиков при $U_0 = 350$ В, $C = 2850$ мкФ, $Z_e = 10$ мм (а), $Z_e = 25$ мм (б)

При увеличении напряжения U_0 ЕНЭ в данных экспериментах, так же, как и при использовании пьезодатчика, увеличиваются амплитуды токов ОИ и якоря (фоновые сигналы магнитного поля), величина деформации ударной пластины и уменьшается время задержки между электрическими и деформационными процессами t_z .

Экспериментально установлено, что импульс ЭДУ F_z уменьшается при увеличении рабочего хода Z_e при $U_0 = \text{const}$ и растет при увеличении напряжения ЕНЭ U_0 при $Z_e = \text{const}$. У ЛИЭП от начала импульса тока ОИ (электромагнитные процессы) до взаимодействия бойка, ускоряемого якорем, с ударной пласти-

ной (механические процессы) существует запаздывание, составляющее $t_0 = 0,5$ мс при $C = 2850$ мкФ и $U_0 = 300 \dots 350$ В и $Z_e = 0$.

Были проведены экспериментальные исследования по определению средних скоростей якоря V_0 на участке рабочего хода Z_e при разных напряжениях U_0 . Полученная в результате измерений средняя скорость якоря при напряжении 200 В составила 5,1 м/с, что удовлетворительно совпадает с результатами расчета.

Таким образом, тензодатчики позволяют регистрировать не только начало и величину силового воздействия, а и его продолжительность. В целом экспериментальные результаты, полученные с использованием пьезо- и тензодатчиков, хорошо согласуются между собой.

Исследование циклического ударного воздействия ЛИЭП на тонкую стальную пластину. Были проведены эксперименты по пробиванию тонкой (1,5 мм) пластины из нержавеющей стали. При напряжении ЕНЭ $U_0 = 200$ В в этой пластине значение механических напряжений составляет 93,4 МПа, а при $U_0 = 400$ В – 186,8 МПа. Для тонкого листа из стали 12Х18Н10Т предел текучести составляет $\sigma_T = 205$ МПа. Таким образом, при напряжении ЕНЭ $U_0 = 400$ В механические напряжения в пластине находятся на границе предела текучести. Для исследования ударного воздействия ЛИЭП на эту пластину использовалось малоцикловое ударное нагружение и было определено среднее значение числа циклов N до пробивания пластины бойком.

Для первой группы опытов, в которых реализовывалась нагрузка с величиной механических напряжений 400 МПа, $N = 146$ циклов, а для второй группы, при напряжении 457 МПа, $N = 39$ циклов. При пробивании образовалась выпуклость (пробка) диаметром 4 мм и толщиной 1,1 мм с ровными краями.

На рис. 12,а приведены экспериментальная кривая малоциклового ударной прочности и фотографии тонкой стальной пластины, деформированной при соответствующих величинах механических напряжений. На рис. 12,б приведена фотография пробитой бойком ЛИЭП пластины. В результате нескольких экспериментов при циклической работе ЛИЭП было установлено, что среднее число циклов до пробивания пластины $N = 79$.

Исследование с использованием видеосъемки. На стенде для исследования ЛИЭП с использованием тензодатчиков были проведены измерения мгновенной скорости якоря с бойком при помощи видеосъемки цифровым фотоаппаратом. После съемки осуществлялась обработка записи и разложение ее на отдельные кадры (рис. 13). При этом определялось время, за которое якорь с бойком проходит расстояние до ударной пластины. В среднем время от отрыва якоря до контакта бойка с ударной пластиной составило 9,65 мс. Расстояние от конца бойка до ударной пластины в этом эксперименте – 5 мм. Следовательно, средняя скорость на участке рабочего хода составила 5,18 м/с, что удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов, описанных выше.

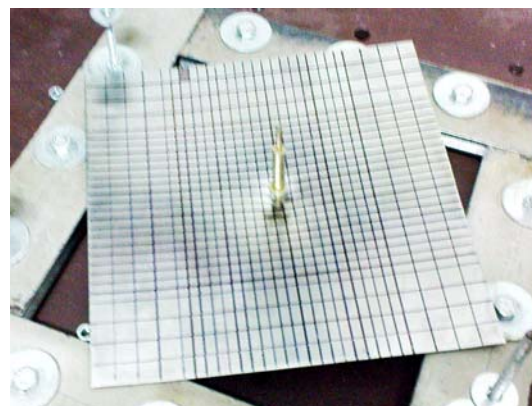
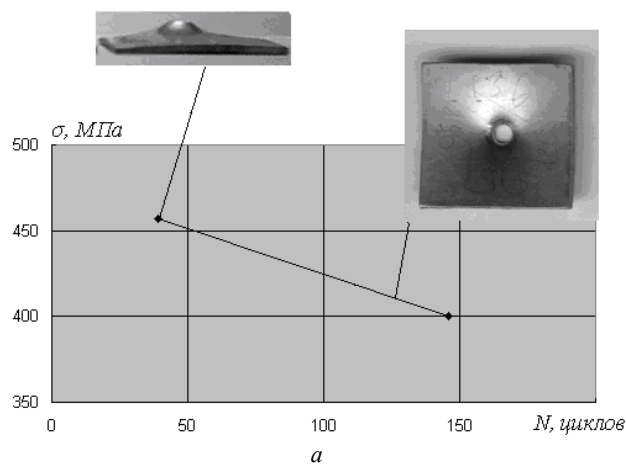


Рис. 12. Кривая малоциклового ударной прочности (а) и пробитая бойком ЛИЭП тонкая стальная пластина (б)



Рис. 13. Результаты видеосъемки в начале (а) и в конце (б) рабочего процесса

Исследование с использованием датчика пульсации давления. Для измерения динамического давления, которое оказывает боек на ударную пластину, был использован пьезоэлектрический датчик пульсаций давления M101A06 фирмы PCB (США) (рис. 14).



Рис. 14. Внешний вид пьезоэлектрического датчика пульсаций давления M101A06 фирмы PCB

Датчик снабжен встроенным усилителем, имеет динамический диапазон 0,68-3450 кПа, чувствительность 1,45 мВ/кПа и частотный диапазон 0,01-130000 Гц. Датчик, выдерживающий максимальное давление 34,5 МПа, содержит встроенный ICP-усилитель (ICP – *Integrated Circuit Piezoelectric*). Показания датчика фиксировались с помощью электронного осциллографа RIGOL (рис. 15).

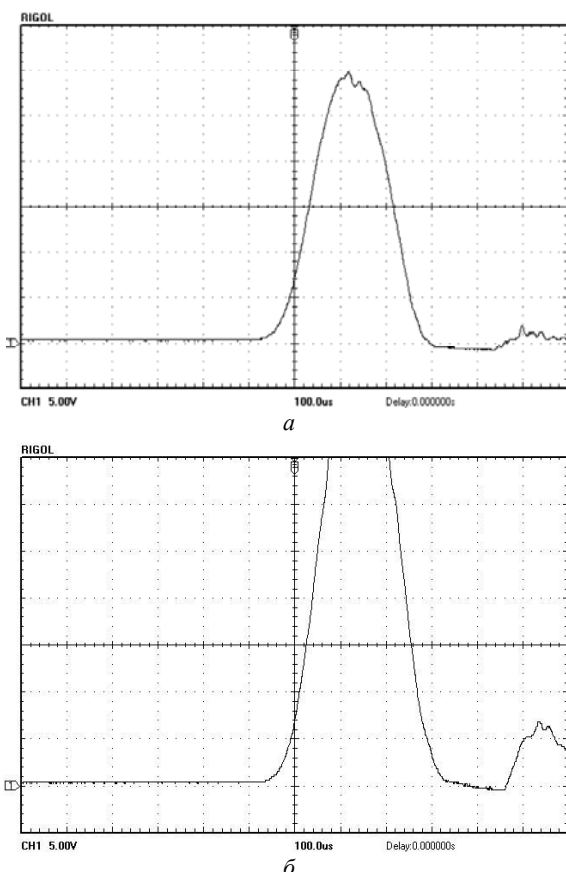


Рис. 15. Осциллограммы динамического давления на ударную пластину при напряжении ЕНЭ 300 В (а) и 400 В (б)

В данных экспериментах определялись форма, величина и длительность силового импульса в ударной пластине при воздействии на нее бойка ЛИЭП. Результаты данных исследований удовле-

творительно согласуются как с расчетными значениями ЭДУ (рис. 1), так и результатами экспериментов, описанных выше.

Исследование ЛИЭП в качестве электромеханического ускорителя. Для исследования ЛИЭП, работающего в качестве электромеханического ускорителя необходимо измерять перемещения якоря в каждый момент времени на рабочем участке. Для этого была разработана установка, представленная на рис. 16. Индуктор 1 ЛИЭП состоит из многовитковой обмотки, намотанной из медной шины в два слоя и замоноличенной при помощи эпоксидной смолы. К якору 2 прикреплен стальной ударный диск 3. Индуктор посредством токовводов 4 соединяется с ЕНЭ. Для измерения вертикальных перемещений используется резистивный датчик 5, закрепленный на С-образном каркасе 6.

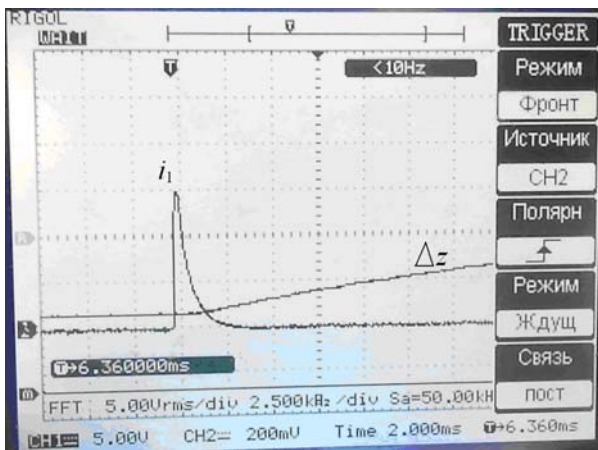


Рис. 16. Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛИЭП, работающего в качестве ускорителя со стальным силовым диском

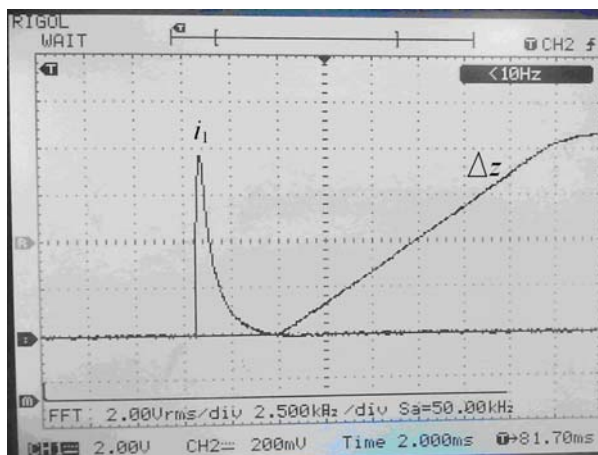
Между горизонтальными стенками каркаса 6 подвижно установлен направляющий стержень 7, проходящий через центральные отверстия индуктора и якоря. Индуктор установлен на неметаллическом основании 8 на нижней стенке каркаса, а на верхней стенке каркаса установлен резистивный датчик перемещений 5. К верхней стенке каркаса крепится демпферная пружина (на фото отсутствует). Направляющий стержень соединен с ударным диском и подвижным контактом датчика перемещений, сигнал от которого подается на электронный осциллограф. Таким образом, одновременно измеряются ток в индукторе i_1 и перемещение Δz якоря со стальным ударным диском и направляющим стержнем (рис. 17).

Экспериментально установлено, что перемещение якоря начинается с задержкой по отношению к моменту возникновения токового импульса и носит практически линейный характер на начальном участке разгона. При повышенном напряжении ЕНЭ $U_0 = 400$ В перемещение якоря после прохождения начального участка замедляется, что связано с взаимодействием его с демпферной пружиной.

Были проведены исследования влияния материала ударного диска на показатели работы электромеханического ускорителя. В экспериментах использовались стальной (рис. 16) и керамический (рис. 18) ударные диски.



а



б

Рис. 17. Осциллограммы тока индуктора i_1 и перемещения якоря Δz при напряжении ЕНЭ U_0 : 300 В (а) и 400 В (б) с использованием стального силового диска

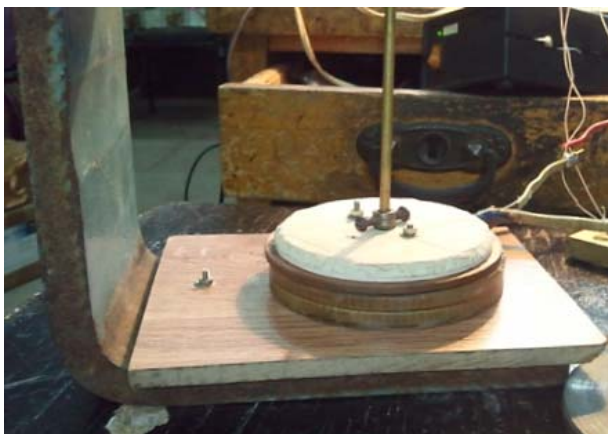


Рис. 18. Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛИЭП, работающего в качестве ускорителя с керамическим силовым диском

Как показали исследования при использовании керамического силового диска длительность импульса тока ОИ возрастает на 11 %, а его величина – на 15 %. При этом скорость якоря через 1,5 мс возрастает на 3 %, а через 5 мс – на 7 %. Таким образом, керамический силовой диск является более эффективным, чем стальной, хотя технология его изготовления и условия эксплуатации более сложны.

В целом результаты исследований ЛИЭП в качестве электромеханического ускорителя удовлетвори-

тельно согласуются с расчетными показателями: электрические показатели (ток в ОИ) – с точностью до 4 %, а механические показатели (скорость якоря) – с точностью до 9 %.

Выводы. Разработана методика экспериментальных исследований, которая состоит в одновременной регистрации электрических и механических параметров, характеризующих силовые и скоростные показатели ЛИЭП.

Разработана математическая модель ЛИЭП индукционного типа, в которой описываются быстропротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно индуктора.

Показано, что электромеханические процессы в ЛИЭП носят сложный пространственно-временной характер, причем в каждый момент времени наблюдается существенная пространственная неравномерность плотности тока, индуцированного в якоре.

Силовые показатели регистрируются с использованием пьезодатчика, системы тензодатчиков, датчика пульсации давления и скоростной видеосъемки, а скоростные показатели – с использованием резистивного датчика перемещений.

Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с результатами расчетов, полученными при помощи математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electro-mechanical. – Stockholm, Sweden. – 2013. – 120 p.
2. 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.
3. 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.
4. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – vol.82. – no.2. – pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
5. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
6. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
7. L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, Z. Yadong. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – vol.39. – no.1. – pp. 382-389. doi: 10.1109/tps.2010.2047276.
8. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Экспериментальные исследования влияния параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические показатели линейного индукционно-динамического преобразователя // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №5. – С. 13-18. doi: 10.20998/2074-272X.2014.5.02.
9. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. – 2015. – vol.86. – no.7. – pp. 425-431. doi: 10.3103/s1068371215070044.

10. 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.

11. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.

12. 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.

13. Наумов И.В., Болюх В.Ф., Бреславский Д.В. Деформирование и разрушение пластин при нагружении цилиндрическим ударником // *Механика та машинобудування*. – 2010. – №1. – С. 207-216.

REFERENCES

1. Bissal A. *Licentiate thesis on the design of ultra-fast electro-mechanical*. Stockholm, Sweden. 2013. 120 p.

2. 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.

3. 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.

4. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian electrical engineering*, 2011, vol.82, no.2, pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.

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

6. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. *Mul'tifizicheskoe modelirovanie v elektrotekhnike* [Multiphysical modeling in electrical engineering]. Kyiv: Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus).

7. L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, Z. Yadong. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol.39, no.1, pp. 382-389. doi: 10.1109/tps.2010.2047276.

8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Experimental study of ferromagnetic core parameters influence on electromechanical characteristics of a linear induction-dynamic converter. *Electrical engineering and electromechanics*, 2014, no.5, pp. 13-18. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.5.02.

9. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol.86, no.7, pp. 425-431. doi: 10.3103/s1068371215070044.

10. 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.

11. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. Available at: <http://www.comsol.com> (accessed 05 May 2015).

12. 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.

13. Naumov I.V., Bolyukh V.F., Breslavskiy D.V. Deformation and fracture of the plates during loading cylindrical drummer. *Mechanics and engineer*, 2010, no.1, pp. 207-216. (Rus).

Поступила (received) 30.11.2016

Болюх Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
 Кочерга Александр Иванович¹, аспирант,
 Олексенко Сергей Владимирович², к.т.н.,
 Щукін Ігорь Сергеевич^{1,3}, к.т.н., доц.,
¹Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +38 057 7076427,
 e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua
²Акционерная компания «Харьковоблэнерго»,
 61037, Харьков, ул. Плехановская, 149,
 тел/phone +38 057 7312486, e-mail: oleksenko_sergii@mail.ru
³ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, A.I. Kocherga¹, S.V. Oleksenko², I.S. Schukin^{1,3}
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
²Joint-stock company «Kharkivoblenergo»,
 149, Plekhanovskaia Str., Kharkiv, 61037, Ukraine.
³Firm Tetra, LTD,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

A technique of experimental investigations of linear impulse electromechanical converters.

Purpose. Development of a technique of experimental studies linear pulse electromechanical converters parameters, which are used as shock-power devices and electromechanical accelerators, and comparing the experimental results with the calculated indices obtained using the mathematical model. **Methodology.** Method of experimental investigations of linear electromechanical converter is that the electrical parameters are recorded simultaneously (inductor winding current) and mechanical parameters characterizing the power and speed indicators of the yoke with actuator. Power indicators are primarily important for shock-power devices, and high velocity - for electromechanical accelerators. Power indices were investigated using piezoelectric sensors, a system of strain sensors, pressure pulsation sensor and high-speed videorecording. Velocity indicators were investigated using a resistive movement sensor which allows to record character of the armature movement with actuating element in each moment. **Results.** The technique of experimental research, which is the simultaneous recording of electrical and mechanical power and velocity parameters of the linear electromechanical converter pulse, is developed. In the converter as a shock-power device power indicators are recorded using a piezoelectric transducer, strain sensors system, pressure pulsation sensor and high-speed video. The parameters of the inductor winding current pulse, the time lag of mechanical processes in relation to the time of occurrence of the inductor winding current, the average speed of the yoke, the magnitude and momentum of electrodynamic forces acting on the plate strikes are experimentally determined. In the converter as an electromechanical accelerator velocity performance recorded using resistive displacement sensors. It is shown that electromechanical converter processes have complex spatial-temporal character. The experimental results are in good agreement with the calculated figures obtained by means of a mathematical model that describes the ultrafast electromagnetic, thermal and mechanical processes that occur when the yoke moves relative to the inductor. **Originality.** For the first time offered during experimental studies of impulse linear electromechanical converter to both to measure the electrical parameters, namely the inductor winding current, and mechanical parameters characterizing the power and velocity performance with yoke actuator. **Practical value.** The technique of experimental investigations the parameters of the linear pulse electromechanical converter that can be used to investigate the shock-power devices and electromechanical accelerators is proposed. References 13, figures 18.

Key words: linear impulse electromechanical converter, shock-power device, electromechanical accelerator, experimental investigations technique, mathematical model.