

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗО- И ТЕНЗОДАТЧИКОВ

*Запропонована методика експериментальних досліджень ударних електромеханічних перетворювачів індукційного типу, яка заснована на одночасному вимірюванні електричних параметрів індуктора та механічних параметрів впливу на ударний об'єкт бойком, що розганяється якорем. Механічний вплив вимірюється за допомогою п'єзо- та тензодатчиків на двох установках при русі бойка вертикально вгору та вниз. Експериментально встановлені особливості перетворювачів, пов'язані з впливом якоря, його формою, рухом на задану відстань, величиною зазору між індуктором та якорем, параметрами смісного накопичувача енергії і навантаженням, що прискорюється.*

*Предложена методика экспериментальных исследований ударных электромеханических преобразователей индукционного типа, основанная на одновременном измерении электрических параметров индуктора и механических параметров воздействия на ударяемый объект бойком, разгоняемого якорем. Механическое воздействие измеряется при помощи пьезо- и тензодатчиков на двух установках при движении бойка вертикально вверх и вниз. Экспериментально установлены особенности преобразователя, связанные с влиянием якоря, его формой, движением на заданное расстояние, величиной зазора между индуктором и якорем, параметрами емкостного накопителя энергии и ускоряемой нагрузкой.*

### ВВЕДЕНИЕ

Ударные устройства и процессы находят широкое применение во многих отраслях науки, техники и технологии. Они используются для разрушения горных пород и строительных конструкций, очистки технологического оборудования, испытаний изделий и устройств на ударные воздействия, прогрессивных технологий обработки металлов, разгона объектов до высоких скоростей, зондирования земной поверхности, магнитно-импульсной сварки, штамповки и др. [1-6]. Физика ударных процессов, возникающих при работе ударных устройств, сложна и постоянно привлекает внимание ученых [7-9]. Особое внимание здесь уделяется экспериментальным методам исследований.

Одним из наиболее перспективных ударных устройств, обеспечивающих регулируемые силовые импульсы с заданными параметрами воздействия, являются ударные электромеханические преобразователи индукционного типа (УЭПИТ) [10]. В УЭПИТ неподвижный многovitковый индуктор, возбуждаемый от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), посредством импульсного магнитного поля индуцирует токи в массивном электропроводящем якоре, который под действием электродинамических сил обеспечивает мощный силовой импульс на объект воздействия или линейное перемещение якоря с ускоряемой нагрузкой.

В рассматриваемых преобразователях протекают сложные пространственно-временные, зависящие друг от друга импульсные электрические, магнитные и механические процессы [11].

Для УЭПИТ характерна существенная неравномерность распределения токов, индуцированных в ускоряемом якоре при возбуждении индуктора аperiodическим импульсом от ЕНЭ. В математической модели это можно учесть путем представления массивного якоря в виде совокупности упорядочено расположенных коаксиальных короткозамкнутых контуров малого поперечного сечения. В этом случае электрические процессы в УЭПИТ можно описать системой уравнений [10]:

$$R_1(T_1)i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^{t_p} i_1(t) dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + \dots \quad (1)$$

$$\dots + M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_2(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_n(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = U_0,$$

$$R_1(T_1)i_1(t) + R_q i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + \dots \quad (2)$$

$$\dots + M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_2(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_n(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = U_0,$$

$$R_2(T_2)i_2(t) + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_2}{dt} + M_{23}(z) \frac{di_3}{dt} + \dots \quad (3)$$

$$\dots + M_{2n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_1(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} = 0,$$

$$R_n(T_n)i_n(t) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{n,1} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{n,n-1}(z) \frac{di_{n-1}}{dt} + \dots \quad (4)$$

$$+ i_1(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = 0,$$

где 1 – индекс индуктора; 2, ..., n – индексы элементарных контуров якоря, который движется со скоростью  $V(t)$ ;  $R_p(T_p)$ ,  $L_p$ ,  $i_p$ ,  $T_p$  – соответственно сопротивление, индуктивность, ток и температура  $p$ -го элементарного контура якоря;  $M_{nk}$  – взаимдуктивность между  $n$ -ым и  $k$ -ым контурами;  $t_p$  – длительность разрядного импульса;  $U_0$  – начальное напряжение ЕНЭ;  $C$  – емкость ЕНЭ.

Уравнение (1) описывает ток индуктора при разряде на него ЕНЭ. Уравнение (2) описывает ток индуктора при протекании тока через обратный диод с сопротивлением  $R_q$ . Уравнения (3), (4) описывают токи в элементарных контурах якоря.

Результирующая сила, действующая на ускоряемый якорь вдоль оси  $z$ , равна

$$f_{\Sigma}(t, z) = f_z(i, z) - f_{pr}(z) - f_a(V) \pm f_g, \quad (5)$$

где  $f_z(i, z)$  – электродинамические силы со стороны индуктора:

$$f_z(i, z) = i_1(t) \cdot \sum_{p=2}^n i_p(t) \frac{dM_{1p}}{dz}(z), \quad (6)$$

$f_{pr}(z)$  – сила упругости возвратных пружин:  

$$f_{pr}(z) = K_p \Delta Z(t), \quad (7)$$

$f_a(V)$  – сила аэродинамического сопротивления:  

$$f_a(V) = 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t), \quad (8)$$

$f_g$  – сила тяжести:  

$$f_g = m_{ank} g, \quad (9)$$

$K_p$  – коэффициент упругости пружины;  $\Delta Z(t)$  – перемещение якоря;  $\gamma_a$  – плотность рабочей среды (воздуха);  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{ex2}$  – внешний диаметр якоря;  $m_{ank}$  – общая ускоряемая масса, включающая якорь и боек;  $g$  – ускорение свободного падения.

Под действием результирующей силы  $f_{\Sigma}$  якорь перемещается вдоль оси  $z$  со скоростью  $V(t)$ , которую можно представить рекуррентным соотношением:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + (t_{n+1} - t_n) f_{\Sigma} / m_{ank}, \quad (10)$$

Из-за технических сложностей и конструктивно-схемных разнообразий не существует отработанных экспериментальных методик для исследования основных процессов и параметров УЭПИТ, работающих в быстропротекающих импульсных режимах [12].

Целью работы является разработка методики экспериментальных исследований электромеханических процессов, подтверждение описанной выше математической модели и установление основных особенностей УЭПИТ при экспериментальных и теоретических исследованиях.

#### КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УЭПИТ

Экспериментальный УЭПИТ включает следующие основные элементы (рис. 1):

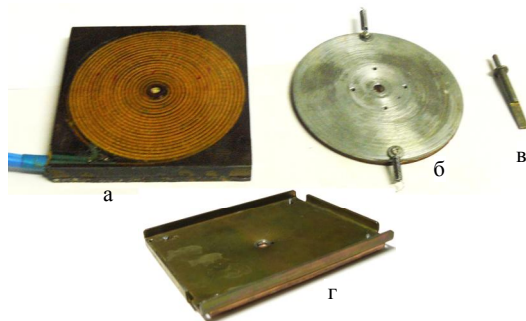


Рис. 1. Элементы УЭПИТ: а – индуктор; б – круглый якорь; в – боек; г – прямоугольный якорь

- неподвижный индуктор, состоящий из двухслойной плотно намотанной круглой обмотки, замоноличенной эпоксидной смолой в стеклотекстолитовом прямоугольном корпусе;
- подвижный якорь;
- боек с расширенной частью, взаимодействующей с силовым диском якоря, и заостренным наконечником, воздействующим на объект.

Для экспериментов использовались две конструкции якоря. Круглый якорь состоит из соединенных между собой электропроводящего (медного) и профильного силового (стального) дисков с двумя возвратными пружинами (рис. 1,б). Прямоугольный якорь состоит из соединенных между собой электропроводящей и силовой пластин с отогнутыми направ-

ляющими краями у последней и четырьмя возвратными пружинами (на рис. 1, в пружины отсутствуют).

Индуктор жестко крепится к опорной изоляционной (текстолитовой) пластине. К индуктору плотно прижат якорь, который упруго соединен возвратными пружинами, соединенными с растяжками, прикрепленными к изоляционной пластине (рис. 2). Боек располагается в центральных отверстиях индуктора и якоря, обеспечивая аксиальное перемещение якоря относительно индуктора.



Рис. 2. УЭПИТ в сборе

При исследованиях переменное напряжение сети через автотрансформатор, повышающий трансформатор и выпрямитель заряжает ЕНЭ – батарею электролитических конденсаторов. Управляемый тиристор обеспечивает разряд ЕНЭ на индуктор. Поскольку цепь индуктора шунтирована обратным диодом, то после достижения напряжения ЕНЭ нулевого значения ток в цепи индуктора уменьшается по экспоненциальному закону. Экспериментальные исследования электромеханических характеристик УЭПИТ, параметры которого представлены в табл. 1, проводились на двух различных установках с использованием тензо- и пьезодатчиков, закрепленных на объекте воздействия – стальной плите.

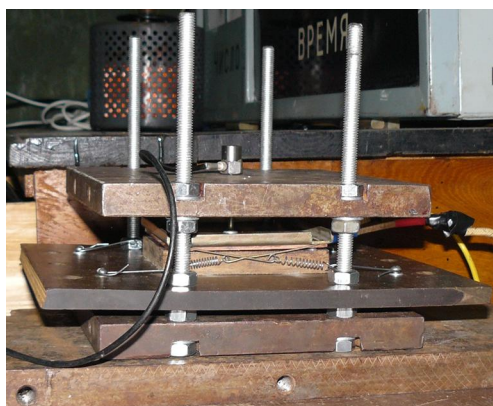
Таблица 1  
Основные параметры базового варианта УЭМП

Параметр	Значение
Внешний диаметр индуктора, мм	100,0
Внутренний диаметр индуктора, мм	10,0
Высота индуктора, мм	10,0
Высота якоря, мм	2,25
Начальное расстояние между индуктором и якорем $\Delta Z_0$ , мм	0,5
Расстояние до упора $Z_{end}$ , мм	0...25
Число витков в индукторе, шт.	46
Сечение витка индуктора (медная шина), мм <sup>2</sup>	1,8×4,8
Коэффициент упругости возвратной пружины $K_p$ , кН/м	7,5
Масса круглого якоря с бойком $m_{ank}$ , кг	0,43
Масса прямоугольного якоря с бойком $m_{ank}$ , кг	0,52
Емкость ЕНЭ $C$ , мФ	1,4...7,0
Начальное напряжение ЕНЭ $U_0$ , В	0...400

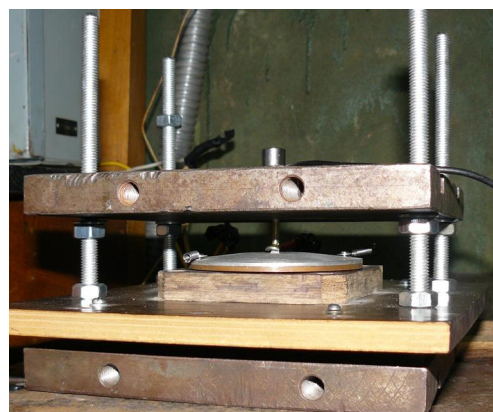
#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ УЭПИТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗОДАТЧИКОВ

Рассматриваемая методика исследований основана на одновременном измерении параметров тока индуктора и механических параметров, возникающих в объекте воздействия при ударе бойком, разгоняемым якорем.

Опорная пластина с УЭПИТ крепится между двумя массивными горизонтально установленными стальными плитами бойком вверх (рис. 3). Расстояние между верхней подвижной и нижней неподвижной плитами регулируется с помощью вертикальных опорных штырей. Таким образом изменяется расстояние  $Z_{end}$ , которое пройдет якорь с бойком до столкновения с объектом воздействия – верхней плитой, на которой установлен пьезоэлектрический преобразователь ДН-4-М1. Этот преобразователь подключен к измерителю шума и вибрации ВШВ-003, который усиливает, регистрирует, обрабатывает и выдает электрический сигнал в величинах виброускорения  $a_{vib}$  и виброскорости  $v_{vib}$  объекта воздействия.



а



б

Рис. 3. Экспериментальная установка с пьезодатчиком для исследования УЭПИТ с прямоугольным (а) и круглым (б) якорями

Обработанный сигнал поступает на двухканальный осциллограф RIGOL DS 522M, который одновременно регистрирует и ток в индукторе. Расстояния между якорем и индуктором  $\Delta Z = \Delta Z_0$ .

Виброускорение  $a_{vib}$  пропорционально мгновенной силе  $f_{\Sigma}$ , действующей на верхнюю стальную плиту со стороны якоря, виброскорость  $v_{vib}$  – импульсу силы  $FI$  при ударе:

$$v_{vib}(t) \sim \int_0^t a_{vib}(t) dt; \quad a_{vib}(t) \sim f_{\Sigma}(t); \quad (11)$$

$$FI = \int_0^t f_{\Sigma}(t) dt \sim \int_0^t a_{vib}(t) dt \sim v_{vib}. \quad (12)$$

Методика измерений одновременно и тока в индукторе (электрические процессы) и виброскорости или виброускорения (механические процессы), позволяет определять следующие параметры УЭПИТ:

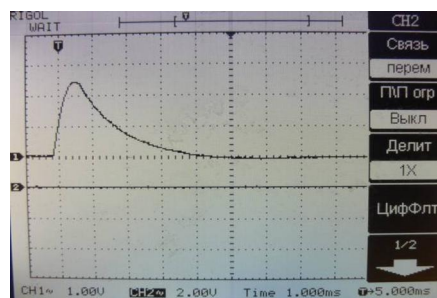
- показатели тока в индукторе: амплитудное значение  $I_m$ , длительность импульса  $t_{имп}$  и его фронта  $t_{фр}$ ;
- время задержки механических (деформационных) процессов по отношению к электрическим при отсутствии  $t_{зад0}$  и наличии  $t_{зад}$  хода якоря;
- среднюю скорость якоря при движении на расстояние  $Z_{end}$ :

$$V_{cp} = Z_{end} / (t_{зад} - t_{зад0}); \quad (13)$$

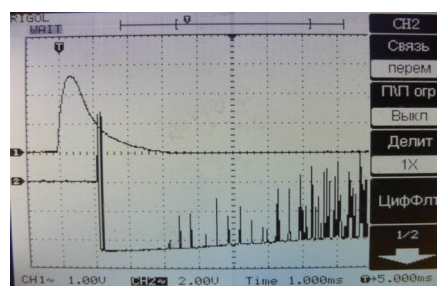
- величину мгновенной силы удара  $f_{\Sigma}$ ;
- величину импульса силы при ударе  $FI$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЭПИТ

При отсутствии якоря ток в индукторе имеет аperiодический характер с резким фронтом и плавным затуханием (рис. 4,а). При введении якоря в УЭПИТ ток в индукторе меняется: увеличивается амплитуда  $I_m$ , уменьшается длительность как фронта  $t_{фр}$ , так и всего импульса  $t_{имп}$  (рис. 4,б).



а



б

Рис. 4. Осциллограммы тока индуктора (канал 1), снятые при  $U_0 = 300$  В,  $C = 3000$  мкФ;  $Z_{end} = 0$  мм: а – без якоря; б – с прямоугольным якорем

Как показывают исследования, введение якоря в УЭПИТ приводит к увеличению амплитуды тока индуктора  $I_m$ , уменьшению длительности импульса  $t_{имп}$  и его фронта  $t_{фр}$  при различных значениях  $U_0$  и  $C$  ЕНЭ. Особенно существенно на эффективность силового воздействия оказывает длительность токового импульса индуктора [13].

На рис. 5 приведены результаты, отражающие влияние начального напряжения  $U_0$  ЕНЭ на максимальный ток в индукторе  $I_m$  при  $C = 3000$  мкФ. Как экспериментальные (жирные линии), так и расчетные (тонкие линии) зависимости практически линейно возрастают при увеличении напряжения  $U_0$ , причем значения  $I_m$  выше в индукторе при наличии якоря.



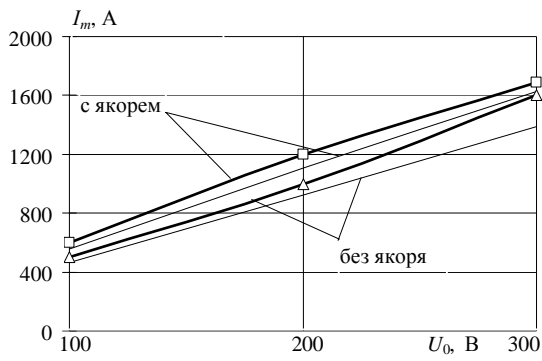
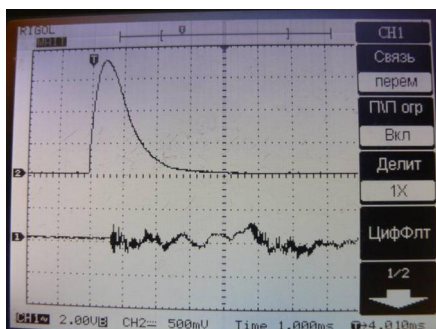


Рис. 5. Зависимость максимальных значений токов индуктора от начального напряжения ЕНЭ

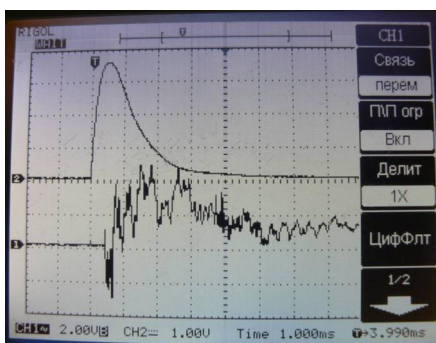
Рассмотрим влияние формы якоря, параметров ЕНЭ, хода бойка  $Z_{end}$ , начального зазора  $\Delta Z$  между якорем и индуктором и ускоряемой массы на параметры УЭПИТ.

При использовании круглого якоря вместо прямоугольного электрохимические процессы изменяются следующим образом: максимальная величина действующей на якорь силы  $f_{\Sigma}$  возрастает на 25 %, амплитуда тока индуктора  $I_m$  возрастает на 5 %, а длительность импульса  $t_{имп}$  и время задержки  $t_{зад}$  уменьшаются на 10%. Это свидетельствует о большей эффективности круглого якоря по сравнению с прямоугольным.

С увеличением напряжения ЕНЭ в 2 раза амплитуда тока индуктора возрастает более чем в 2 раза, и практически в 5 раз повышается амплитуда виброускорений  $a_{vib}$ , а значит и величина мгновенной силы  $f_{\Sigma}$  при ударе (рис. 6). Кроме того, при этом уменьшается время задержки  $t_{зад}$  с 0,7 до 0,5 мс, что свидетельствует об увеличении скорости ударных процессов.



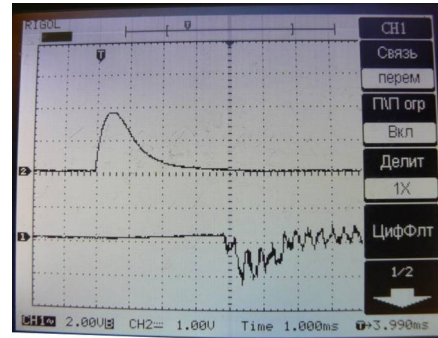
а



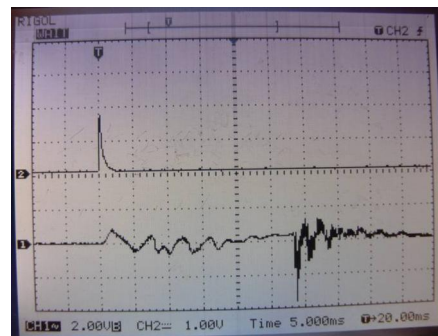
б

Рис. 6. Осциллограммы тока индуктора (канал 2) и виброускорения (канал 1) прямоугольного якоря при  $C = 6270$  мкФ;  $Z_{end} = 0$  мм: а –  $U_0 = 200$  В, б –  $U_0 = 400$  В

С увеличением хода бойка  $Z_{end}$  возрастает время задержки  $t_{зад}$  механических процессов по отношению к электрическим, приводя к уменьшению амплитуды ударной силы  $f_{\Sigma}$  (рис. 7). Такое увеличение времени задержки обусловлено перемещением якоря с бойком до взаимодействия с верхней плитой. Вибрация верхней плиты, возникающая до удара по ней бойка, обусловлена отдачей индуктора, передаваемой через опорные стойки.



а



б

Рис. 7. Осциллограммы тока индуктора (канал 2) и виброускорения (канал 1) прямоугольного якоря при  $C = 6270$  мкФ,  $U_0 = 200$  В: а –  $Z_{end} = 5$  мм; б –  $Z_{end} = 25$  мм

На рис. 8 приведены экспериментальные (жирные линии) и расчетные (тонкие линии) средние скорости якоря  $V_{ср}$ , с которыми он проходит расстояние  $Z_{end}$  при емкости  $C = 7000$  мкФ, но различных 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 и наличием отдачи индуктора.

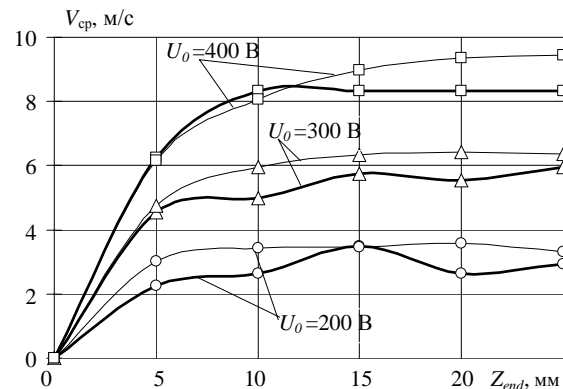
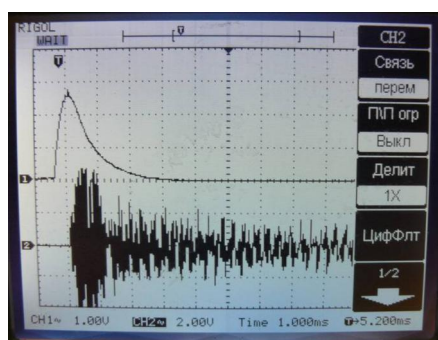


Рис. 8. Зависимость средней скорости от перемещения якоря

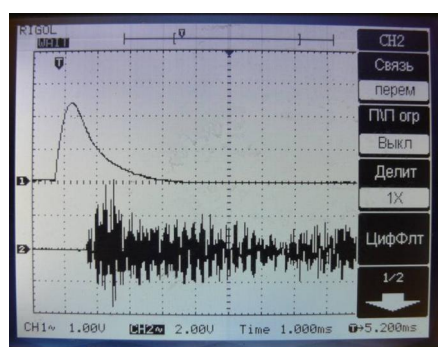
С уменьшением емкости ЕНЭ  $C$  в 2,2 раза (от 6270 до 2859 мкФ) характер электрических процессов изменяется следующим образом: амплитуда тока индуктора  $I_m$  уменьшается на 28 %, длительность импульса  $t_{имп}$  – на 71 %, фронт импульса  $t_{фр}$  – на 43 %.

Вследствие этого время задержки  $t_{зад}$  уменьшается на 14 %, а величина импульса силы  $FI$  – в 3,12 раза.

Интерес представляет влияние начального зазора  $\Delta Z$  между якорем и индуктором на электромеханические характеристики УЭПИТ. С увеличением зазора с 2,5 до 5,0 мм амплитуда тока индуктора  $I_m$  уменьшается на 8 %, длительность импульса  $t_{имп}$  увеличивается на 6 %, а фронт импульса  $t_{фр}$  – на 8 % (рис. 9). Вследствие этого величина виброускорения  $a_{vib.}$ , а значит сила удара  $f_{\Sigma}$  уменьшается на 25 % при увеличении времени задержки  $t_{зад}$  почти в 2 раза. Это объясняется уменьшением взаимоиндуктивности между якорем и индуктором, а следовательно, и уменьшением коэффициента магнитной связи. При увеличении начального зазора  $\Delta Z$  параметры тока индуктора начинают приближаться к варианту УЭПИТ без якоря, стремясь к ней при  $\Delta Z \rightarrow \infty$ . Это свидетельствует о чувствительности УЭПИТ к величине зазора  $\Delta Z$  между якорем и индуктором, которую необходимо выбирать минимально допустимой.



а



б

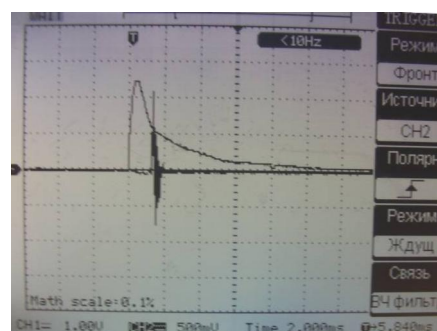
Рис. 9. Осциллограммы тока индуктора (канал 1) и виброускорения (канал 2) прямоугольного якоря при  $C = 3000 \mu\text{кФ}$ ,  $U_0 = 300 \text{ В}$ ,  $Z_{\text{end}} = 0 \text{ мм}$ : а –  $\Delta Z = 2,5 \text{ мм}$ ; б –  $\Delta Z = 5 \text{ мм}$

Рассмотрим характеристики УЭПИТ при ускорении круглого "легкого" ( $m_{\text{ank}} = 0,43 \text{ кг}$ ) и "тяжелого" ( $m_{\text{ank}} = 5,43 \text{ кг}$ ) якорей (рис. 10).

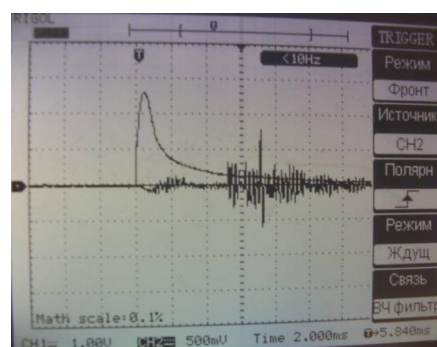
Увеличение ускоряемой массы на 5 кг незначительно увеличивает амплитуду тока индуктора  $I_m$  и "заостряет" его кривую, время  $t_{\text{зад}}$  увеличивается, а значит скорость "тяжелого" якоря  $V$  уменьшается.

Подобный характер влияния массы якоря на ток

в индукторе показывают и расчетные данные с использованием описанной математической модели (рис. 11). Средние скорости якорей  $V_{\text{ср}}$  УЭПИТ при перемещении разной массы, определенные экспериментально, с точностью до 8 % согласуются с расчетными зависимостями (рис. 12).



а



б

Рис. 10. Осциллограммы тока индуктора и виброускорения при  $U_0 = 405 \text{ В}$ ,  $C = 6600 \mu\text{кФ}$ ,  $Z_{\text{end}} = 10 \text{ мм}$ : а –  $m_{\text{ank}} = 0,43 \text{ кг}$ ; б –  $m_{\text{ank}} = 5,43 \text{ кг}$

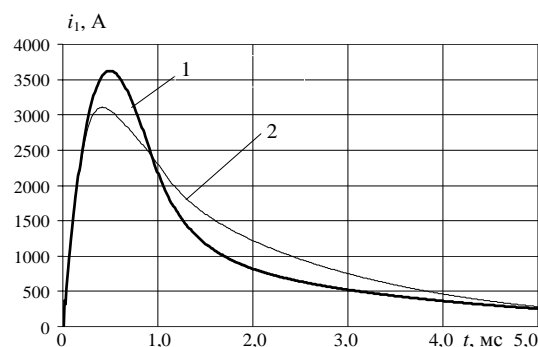


Рис. 11. Расчетные значения токов индуктора для  $m_{\text{ank}}$ : 1 – 0,43 кг; 2 – 5,43 кг

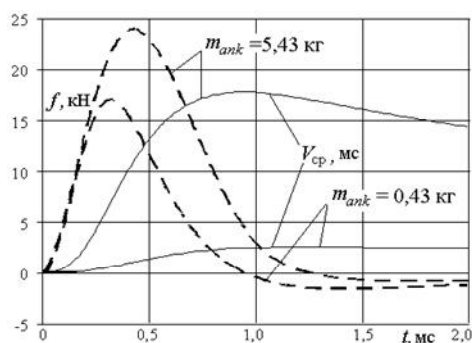


Рис. 12. Силы, действующие на "легкий" и "тяжелый" якоря, и их скорости



Как следует из рис. 12, величина силы, действующая на "тяжелый" якорь, примерно в полтора раза больше, чем действующая на "легкий" якорь. Это объясняется меньшим изменением расстояния между индуктором и "тяжелым" якорем из-за его большей инерционности. Благодаря этому коэффициент магнитной связи между индуктором и таким якорем уменьшается в меньшей степени, что обуславливает более сильные электродинамические силы. Однако, КПД УЭПИТ, определяемый как отношение кинетической энергии к энергии ЕНЭ [11], показывает значительное преимущество "легкого" якоря.

Таким образом, для создания ударного силового импульса при малом перемещении рекомендуется применять "тяжелый" якорь, а для обеспечения значительной кинетической энергии целесообразно использовать "легкий" якорь.

### ИССЛЕДОВАНИЯ УЭПИТ ПРИ ПОМОЩИ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

Для проведения экспериментальных исследований с использованием тензодатчиков использовалась установка, состоящая из тензорезисторов, блока преобразования сигналов в цифровой вид и персонального компьютера [14]. УЭПИТ обеспечивал перемещение круглого якоря с бойком вертикально вниз до соударения с объектом воздействия – специальной стальной пластиной, к обратной стороне которой прикреплены тензодатчики (рис. 13).

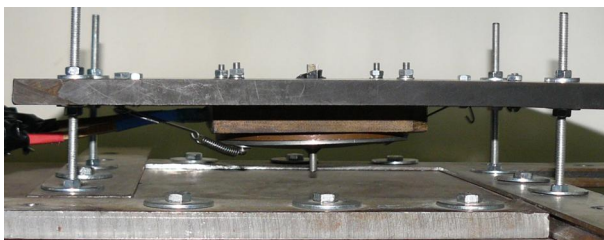


Рис. 13. Экспериментальная установка с тензодатчиками для исследования УЭПИТ

Эти датчики образуют три группы, упорядочено расположенные относительно точки удара. Для исследований использовался ЕНЭ емкостью  $C = 2850$  мкФ, а в качестве варьируемых параметров выступали начальное напряжение ЕНЭ  $U_0$  и расстояние  $Z_{end}$ , определяющее величину хода якоря.

Всплески на сигналах, снятых с тензодатчиков, соответствуют деформационным процессам в объекте воздействия во время удара. Усредненное максимальное значение этих всплесков соответствует максимальной силе  $f_{\Sigma}$ , действующей на пластину (1 мВ сигнала эквивалентен нагрузке 8,936 Н). Продолжительность ударного импульса  $t_{уд}$  определяется длительностью первого всплеска.

Считая форму всплеска синусоидальной и используя понятие средней величины силы  $f = 2f_m/\pi$ , получим экспериментально определенный ударный импульс

$$FI_{exp} \approx 0,636 \cdot f_m \cdot t_{уд} \quad (14)$$

Количество движения якоря с бойком пропорционально ударному импульсу силы

$$m_{ank} V = \int_0^{t_{уд}} f(t) dt = FI, \quad (15)$$

отражающему лишь деформационные процессы в объекте воздействия. Для оценки реального ударного импульса якоря введем эмпирический коэффициент  $K_{imp}$ :

$$FI_{exp}^{tot} \approx K_{imp} \cdot FI_{exp} \approx K_{imp} \cdot 0,636 \cdot f_m \cdot t_{уд} \quad (16)$$

При работе УЭПИТ возбуждается интенсивное магнитное поле (рис. 14), которое генерирует сигналы, пропорциональные аксиальной составляющей поля в месте установки датчиков. Это поле формирует фоновые сигналы датчиков при отсутствии деформационных процессов (рис. 15).

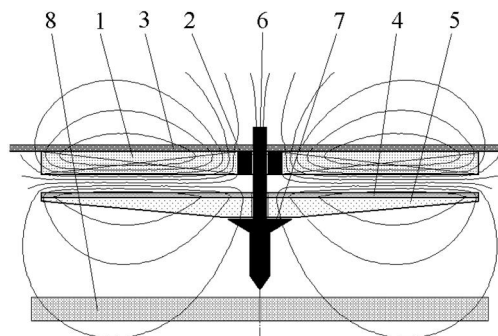


Рис. 14. Схема и магнитное поле УЭПИТ в момент максимальных электродинамических сил: 1 – индуктор; 2 – направляющая втулка; 3 – опорная пластина; 4 – якорь; 5 – ударная пластина; 6 – боек; 7 – опорная часть бойка; 8 – объект воздействия

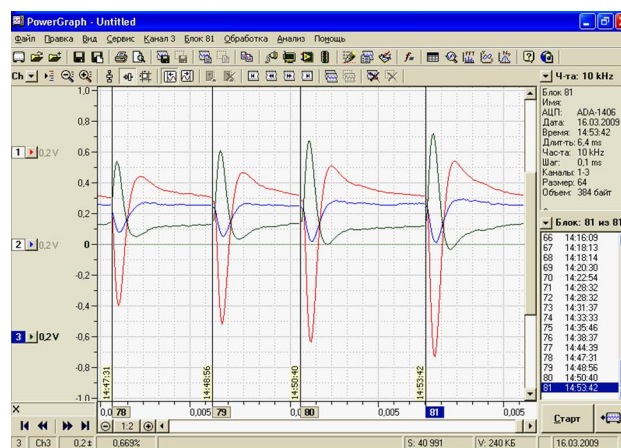
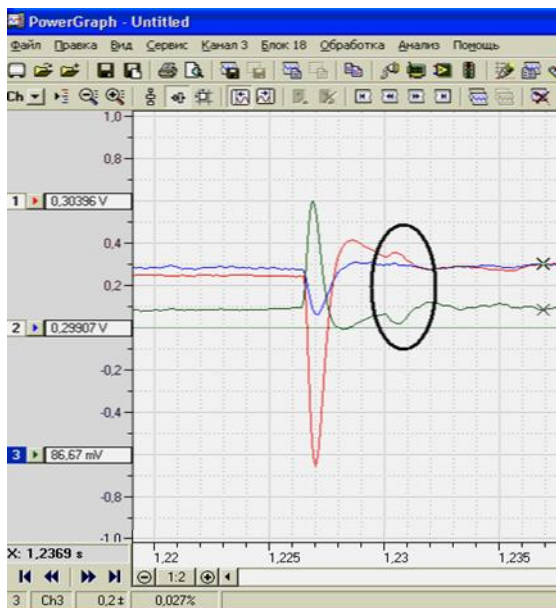


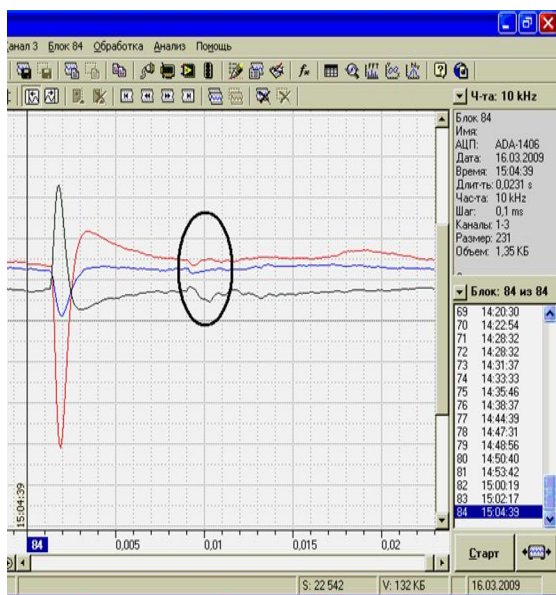
Рис. 15. Фоновые сигналы датчиков, наводимые электромагнитным импульсом при различных напряжениях  $U_0$  (слева направо  $U_0 = 250; 300; 350; 400$  В)

Вычитая из значений сигналов фоновый уровень, получаем величину деформации. Обведенные кружками всплески сигналов на осциллограммах отвечают деформационным процессам, вызванным ударными воздействиями на стальную пластину (рис. 16).

При увеличении напряжения  $U_0$  в этих экспериментах, также, как и при использовании пьезодатчика, увеличиваются амплитуды токов индуктора и якоря (фоновые сигналы магнитного поля), величина деформации объекта воздействия и уменьшается время между электрическими и деформационными процессами  $t_{зад}$  (рис. 17).



а



б

Рис. 16. Сигналы тензодатчиков при деформационных процессах в пластине при  $U_0 = 350$  В,  $C=2850$  мкФ: а –  $Z_{end} = 10$  мм; б –  $Z_{end} = 25$  мм

Установлено, что импульс силы удара  $FI$  уменьшается при увеличении расстояния  $Z_{end}$  при  $U_0 = \text{const}$  и возрастает при увеличении напряжения  $U_0$  ЕНЭ при  $Z_{end} = \text{const}$  (рис. 16). На рис. 18 представлены измеренные с использованием тензодатчиков (жирная линия) и расчетные (тонкая линия) импульсы силы  $FI$  при  $C = 2850$  мкФ и  $U_0 = 400$  В. На рис. 19 представлены аналогичные данные при  $C = 2850$  мкФ и  $Z_{end} = 15$  мм, откуда следует, что при увеличении напряжения  $U_0$  увеличивается импульс ударной силы  $FI$ .

В целом экспериментальные данные, полученные с использованием пьезо- и тензодатчиков, хорошо соотносятся между собой и подтверждают справедливость представленной математической модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика экспериментальных исследований электромеханических параметров и характеристик УЭПИТ, основанная на одновременном измерении параметров тока индуктора и механических параметров объекта воздействия при ударе на него бойка, разгоняемого якорем. Методика позволяет измерить основные показатели тока в индукторе: амплитудное значение, длительность импульса и его фронт; время задержки механических процессов по отношению к электрическим; среднюю скорость якоря на заданном интервале движения; величины мгновенной силы и импульса силы при ударе.

Экспериментальные данные, полученные с использованием пьезо- и тензодатчиков на двух установках с противоположным вертикальным перемещением якоря, хорошо соотносятся между собой.

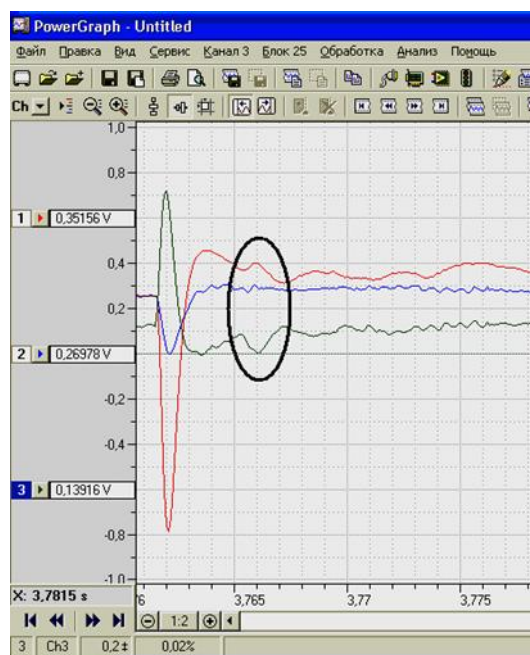


Рис. 17. Сигналы тензодатчиков при деформационных процессах в пластине при  $Z_{end} = 15$  мм,  $C=2850$  мкФ,  $U_0 = 400$  В

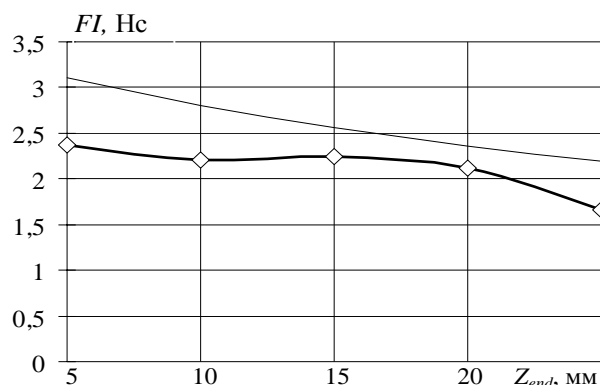


Рис. 18. Зависимость импульса силы от перемещения якоря

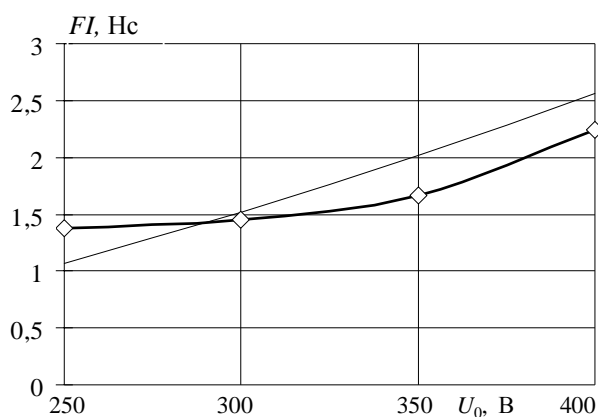


Рис. 19. Зависимость импульса силы от начального напряжения ЕНЭ

Экспериментально установлены особенности УЭПИТ, связанные с влиянием якоря, его перемещением на заданное расстояние, величиной зазора между индуктором и якорем, параметрами ЕНЭ и ускоряемой массой.

Показана достоверность математической модели, учитывающей взаимосвязанные электрические, магнитные и механические процессы, в которой массивный якорь представляется в виде совокупности коаксиальных упорядочено расположенных короткозамкнутых контуров малого поперечного сечения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тютюкин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налиплих материалов // *Электротехника*. – 2002. – № 11. – С. 24-28.
2. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2005. – № 12. – С. 52-57.
3. Engel T.G., Surls D., Nunnally W.C. Prediction and verification of electromagnetic forces in helical coil launchers // *IEEE Trans. Magnetics*. – 2003. – Vol. 39. – № 1. – P. 112-115.
4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
5. Карпунин В.Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // *Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития*. – Самара: Изд. учеб. лит. – 2007. – С. 99-103.
6. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубки-пробивки тонколистовых материалов // *Металлообработка*. – 2001. – № 2. – С. 28-32.

7. Гольдсмит В. Ударная теория и физические свойства соударяемых тел. – М., 1965. – 451 с.
8. Кейбл А., Хиккерсон Н., Геринг Дж. и др. Высокоскоростные ударные явления. – М.: Мир, 1973. – 533 с.
9. Кильчевский Н.А. Теория соударения твердых тел. – К.: Наукова думка, 1989. – 247 с.
10. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукин И.С. Синтез параметров высокоэффективного электромеханического преобразователя ударного действия // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 2. – С. 63-68.
11. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукин И.С. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 2. – С. 9-14.
12. Field J.E.. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies// *Int. J. Imp. Eng.* – Vol. 30. – 2004. – P. 725-775.
13. Болух В.Ф. Влияние длительности токов обмотки возбуждения и якоря на эффективность индукционно-динамического электродвигателя // *Электротехника*. – 2001. – № 11. – С. 27-31.
14. Бреславский Д.В., Наумов И.В., Онищенко А.В. Экспериментальное исследование процессов ударного нагружения тонких пластин // *Вісник НТУ "ХПІ"*. – 2007. – № 38. – С. 30-35.

Поступила 20.08.2010

*Болух Владимир Федорович, д.т.н., проф.*

*Шукин Игорь Сергеевич, к.т.н., доц.*

Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"

ООО Фирма "ТЭТРА Ltd",

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел. (057) 7076427

e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com

*V.F. Bolyukh, I.S. Schukin*

#### **Experimental studies of percussion electromechanical transformers using piezoelectric and strain sensors.**

The experimental research method of percussion electromechanical induction type transformers basing on simultaneous measurement of electrical parameters of the inductor and mechanical parameters at action the striker which accelerated by the armature on a struck object has been proposed. The mechanical effect is measured using piezoelectric and strain sensors on two devices when striker moves vertically upwards and downwards. Experiments discovered the features of the transformer associated with the influence of the armature, its form, movement at a prescribed distance, the size of the gap between the inductor and the armature, the parameters of the capacitive energy storage and accelerated load.

**Key words – electromechanical induction type transformers, experimental research method, piezoelectric sensor, strain sensors.**