

## ОБ ИСКЛЮЧЕНИИ СЖАТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОСЛЕ "СРЕЗА" ИМПУЛЬСА ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Теоретично підтверджено ефективність ідеї Г. Фюрза про запобігання коливань струму після "зрізу" замиканням індуктора накоротко для виключення обтиску внутрішньої циліндричної провідної оболонки після її магнітно-імпульсного розширення зусиллями від'ємного тиску. Показано також можливості збільшення частоти та амплітуди "зрізаючого" імпульсу, а також від'ємного тиску в порівнянні зі схемою без замикання індуктора накоротко.*

*Теоретически подтверждена эффективность идеи Г. Фюрза о закорачивании индуктора с целью предотвращения колебаний тока после "среза" для исключения сжатия внутренней цилиндрической проводящей оболочки после ее магнитно-импульсного расширения силами отрицательного давления. Показаны также возможности увеличения частоты и амплитуды "срезающего" импульса, а также отрицательных давлений по сравнению со схемой без закорачивания индуктора.*

### ВВЕДЕНИЕ

В 1965 г. Г. Фюрз получил патент на устройства для магнитно-импульсной обработки металлических заготовок силами притяжения к индуктору, принцип действия которых основан на прерывании ("срезе") медленно нарастающего исходного импульса разрядного тока [1]. При помощи рис. 1 и 2 напомним один из способов "среза", который анализируется в этой статье. Исходный импульс тока  $i_1$  создается разрядом основного емкостного накопителя  $C_1$ , предварительно заряженного до напряжения  $U_{01}$ , через управляемый коммутатор  $K_1$  на индуктор 1 с расположенной внутри него цилиндрической проводящей оболочкой (заготовкой) 2. На этой стадии процесса заготовка 2 не деформируется. Дополнительный емкостный накопитель  $C_2$  предварительно заряжен до напряжения  $U_{02}$  так, что полярность его обкладок относительно индуктора 1 противоположна полярности  $C_1$ , причем согласно [1]  $C_2 \ll C_1$ , а  $U_{02}$  может быть намного выше  $U_{01}$ . В момент времени  $t = t_c$  включается управляемый коммутатор  $K_2$ , и дополнительный накопитель  $C_2$  создает "срезающий" импульс тока  $i_2$ , имеющего противоположное направление. При  $t > t_c$  результирующий ток  $i$  ("срезанный" импульс тока), протекающий через индуктор 1, быстро уменьшается, в результате чего вихревые токи в заготовке 2 изменяют направление и возникают большие электродинамические усилия (ЭДУ), деформирующие заготовку 2 силами притяжения к индуктору 1.

В работе [2] мы показали, что увеличения скорости "среза", а следовательно, и ЭДУ, расширяющих заготовку при помощи внешнего индуктора, можно добиться увеличением частоты, амплитуды и коэффициента затухания колебательного "срезающего" импульса. Однако значительное увеличение частоты приводит к появлению больших ЭДУ, сжимающих оболочку после ее расширения [2]. Одним из способов, предотвращающих это нежелательное явление, может быть закорачивание индуктора 1 при помощи управляемого коммутатора  $K_3$  в момент времени  $t = t_0$ , в который ток  $i = 0$  [1] (см. рис. 1, 2).

В известных нам работах воздействие на цилиндрическую проводящую оболочку "срезанных" импульсов осевого внешнего магнитного поля, получае-

мых "встречным" разрядом двух емкостных накопителей и закорачиванием внешнего индуктора при переходе результирующего тока  $i$  через нулевое значение для исключения сжимающих ЭДУ после "среза", теоретически не исследовали.

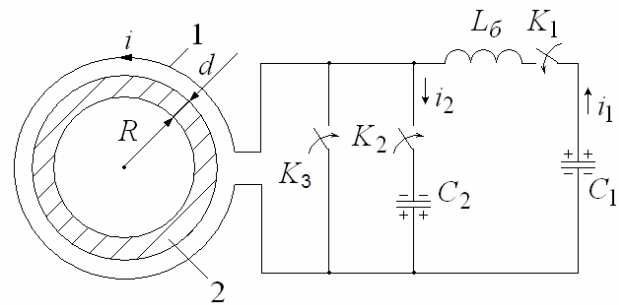


Рис. 1. Схема устройства с прерыванием тока при помощи дополнительного емкостного накопителя и закорачивания индуктора

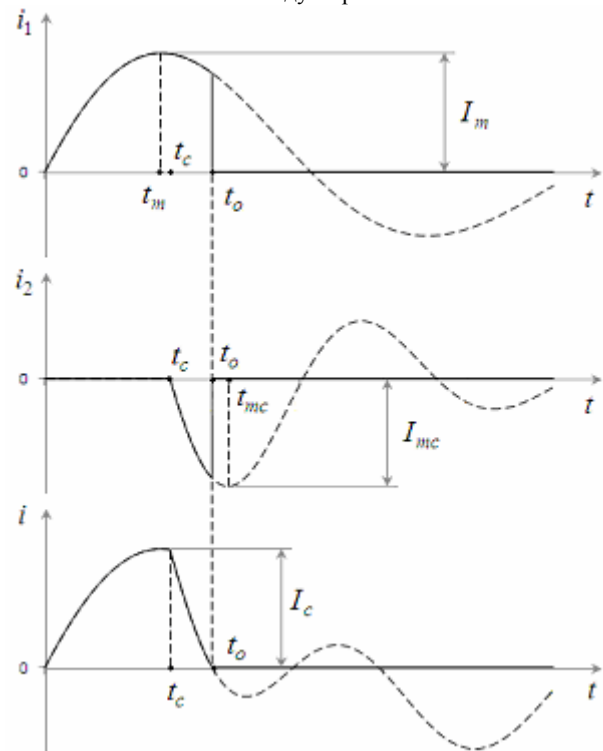


Рис. 2. Исходный ( $i_1$ ), "срезающий" ( $i_2$ ) и "срезанный" ( $i$ ) импульсы тока в схеме с закорачиванием индуктора

## ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ УСТРОЙСТВА

Пусть длинная цилиндрическая проводящая оболочка неподвижна, имеет постоянные электрофизические характеристики, а ее толщина  $d$  много меньше внутреннего радиуса  $R$  (см. рис. 1). Полагаем также, что соблюдаются условия квазистационарности, а вектор напряженности магнитного поля имеет только осевую проекцию, причем магнитное поле снаружи и внутри оболочки однородно.

Представляем "срезанный" импульс тока, протекающего через индуктор, в таком виде:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t), \quad (1)$$

где

$$i_1(t) = [1 - 1(t - t_0)] I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t; \quad (2)$$

$$i_2(t) = -1(t - t_c) [1 - 1(t - t_0)] I_{01} e^{-\alpha_1 t} \sin \omega_1 t; \quad (3)$$

$1(t - t_0)$ ,  $1(t - t_c)$  – единичные функции;

$$1(t - t_0) = \begin{cases} 1, & t \geq t_0; \\ 0, & t < t_0; \end{cases}$$

$$1(t - t_c) = \begin{cases} 1, & t \geq t_c; \\ 0, & t < t_c; \end{cases}$$

$I_0$ ,  $I_{01}$  – постоянные;  $\alpha$ ,  $\alpha_1$  – коэффициенты затухания;  $\omega$ ,  $\omega_1$  – круговые (угловые) частоты.

Формулы (2), (3) отличаются от приведенных в работе [2] дополнительным множителем  $[1 - 1(t - t_0)]$ , при помощи которого учитывается закорачивание индуктора.

Согласно (1) – (3) напряженность магнитного поля на внешней поверхности оболочки равна

$$H(0, t) = H^{(1)}(0, t) + H^{(2)}(0, t), \quad (4)$$

а на внутренней поверхности –

$$H(d, t) = H^{(1)}(d, t) + H^{(2)}(d, t), \quad (5)$$

где  $H^{(1),(2)}(0, t) = i_{1,2} w / b$ ,  $w$  и  $b$  – число витков и длина индуктора, причем  $b \gg R$ .

В формулах (4), (5) функции  $H^{(1)}(0, t)$  и  $H^{(1)}(d, t)$  соответствуют току  $i_1(t)$ , а функции  $H^{(2)}(0, t)$  и  $H^{(2)}(d, t)$  – току  $i_2(t)$ . Каждую из функций  $H^{(1)}(d, t)$  и  $H^{(2)}(d, t)$  представляем в виде суммы двух слагаемых:

$$H^{(1)}(d, t) = H_1^{(1)}(d, t) + H_2^{(1)}(d, t); \quad (7)$$

$$H^{(2)}(d, t) = H_1^{(2)}(d, t) + H_2^{(2)}(d, t). \quad (8)$$

Первые слагаемые в формулах (7) и (8) соответствуют "срезу" исходного затухающего колебательного импульса тока  $i_1$  подобным, но с другими параметрами "срезающим" импульсом  $i_2$  [2], а вторые слагаемые – идеальному (мгновенному) "срезу" [3] тех же импульсов в момент времени  $t = t_0$ , в который  $i_2(t_0) = -i_1(t_0)$  (см. рис. 2).

Для нахождения каждой из четырех неизвестных функций в правых частях формул (7), (8) необходимо решить соответствующие задачи проникновения импульсного магнитного поля внутрь цилиндрической проводящей оболочки. Подобные решения для рассматриваемых граничных условий на внешней поверхности оболочки известны [2, 3]. Используем переходную функцию напряженности магнитного поля

на внутренней поверхности оболочки первого приближения [4, 5]

$$H_1(d, t) = 1 - e^{-t/\tau},$$

где  $\tau$  – постоянная времени первого приближения,

$$\tau = \mu_0 \gamma R d / 2;$$

$\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\gamma$  – удельная электропроводность оболочки.

Опуская преобразования, связанные с применением интеграла Дюамеля, получаем:

$$H_1^{(1)}(d, t) = H_0 f(\alpha \tau, \omega \tau) \times \left[ e^{-\alpha t} \sin(\omega t - \psi_2^{(1)}) + e^{-t/\tau} \sin \psi_2^{(1)} \right]; \quad (9)$$

$$H_2^{(1)}(d, t) = -H_0 f(\alpha \tau, \omega \tau) e^{-\alpha t_0} \times \left\{ e^{-\alpha t'} \sin[\omega(t' + t_0) - \psi_2^{(1)}] + e^{-t'/\tau} \sin(\psi_2^{(1)} - \omega t_0) \right\}; \quad t > t_0; \quad (10)$$

$$H_1^{(2)}(d, t) = -H_{01} f(\alpha_1 \tau, \omega_1 \tau) \times \left[ e^{-\alpha_1 t''} \sin(\omega_1 t'' - \psi_2^{(2)}) + e^{-t''/\tau} \sin \psi_2^{(2)} \right]; \quad t \geq t_c; \quad (11)$$

$$H_2^{(2)}(d, t) = H_{01} f(\alpha_1 \tau, \omega_1 \tau) e^{-\alpha_1(t_0 - t_c)} \times \left\{ e^{-\alpha_1 t'} \sin[\omega_1(t' + t_0 - t_c) - \psi_2^{(2)}] + e^{-t'/\tau} \sin[\psi_2^{(2)} - \omega_1(t_0 - t_c)] \right\}; \quad t > t_0, \quad (12)$$

где  $t' = t - t_0$ ,  $t'' = t - t_c$ ;  $H_{0,01} = I_{0,01} w / b$ ;

$$f(\alpha \tau, \omega \tau) = \left[ \sqrt{(1 - \alpha \tau)^2 + (\omega \tau)^2} \right]^{-1}; \quad (13)$$

$$\psi_2^{(1)} = \begin{cases} \arctg \frac{\omega \tau}{1 - \alpha \tau}, & \text{если } \alpha \tau < 1; \\ \pi/2, & \text{если } \alpha \tau = 1; \\ \pi + \arctg \frac{\omega \tau}{1 - \alpha \tau}, & \text{если } \alpha \tau > 1. \end{cases} \quad (14)$$

Величины  $f(\alpha_1 \tau, \omega_1 \tau)$  и  $\psi_2^{(2)}$  определяются по формулам (13) и (14) после замены в них  $\alpha$  и  $\omega$  соответственно на  $\alpha_1$  и  $\omega_1$ .

Формулы (1) – (12) составляют математическую модель первого приближения импульсного магнитного поля устройства для расширения цилиндрической оболочки при помощи внешнего индуктора согласно схеме с закорачиванием индуктора, представленной на рис. 1.

### КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОБОЛОЧКУ

Полагаем абсолютную магнитную проницаемость оболочки  $\mu = \mu_0$ . ЭДУ, действующие на оболочку, будем характеризовать величиной

$$p(t) = \frac{\mu_0}{2} \left[ (H(0, t))^2 - (H(d, t))^2 \right], \quad (15)$$

условно называемой давлением магнитного поля. Согласно (15) положительные давления стремятся сжать оболочку, а отрицательные давления – расширить ее силами притяжения к внешнему индуктору (см. рис. 1). Эффективность рассматриваемого устройства будем характеризовать отношением  $p_{m2}/p_{m1}$  (кратностью амплитуды отрицательного давления), в котором  $p_{m1}$  и  $p_{m2}$

– амплитуды соответственно первой (положительной) и второй (отрицательной) полуволны давления магнитного поля. Очевидно, что значения  $p_{m2}/p_{m1}$  отрицательны, однако под увеличением кратности амплитуды отрицательного давления будем понимать увеличение модуля этого отношения.

Длительность (продолжительность) и амплитуда "среза" равны (см. рис. 2):

$$T_c = t_0 - t_c; I_c = i(t_c).$$

Для представления и анализа результатов расчета используем безразмерные величины  $i^* = i/I_0$ ,  $H^* = H/H_0$ ,  $\eta^* = \eta/H_0$ ,  $p^* = p/p_0$ ,  $T_c^* = \omega T_c$ ,  $I_c^* = I_c/I_0$ ,  $t_0^* = \omega t_0$  и критерии подобия [2]  $\alpha^* = \alpha/\omega$ ,  $\alpha_1^* = \alpha_1/\omega_1$ ,  $\omega_1^* = \omega_1/\omega$ ,  $I_{01}^* = I_{01}/I_0$ ,  $\tau^* = \omega \tau$ ,  $t^* = \omega t$ ,  $t_c^* = \omega t_c$ , где  $p_0 = \mu_0 H_0^2/2$ ,  $\eta$  – линейная плотность вихревых токов в оболочке [6].

В работе [2] показано, что в случае затухающего колебательного "срезающего" импульса отрицательные давления возрастают при увеличении значений критериев  $\omega_1^* = \omega_1/\omega$ ,  $\alpha_1^* = \alpha_1/\omega_1$  и  $I_{01}^* = I_{01}/I_0$ . Очевидно, что наиболее удобными на практике средствами увеличения отрицательных давлений являются уменьшение  $C_2$  (при этом увеличиваются  $\omega_1$  и  $\omega_1^*$ ) и увеличение  $U_{02}$  (при этом увеличиваются  $I_{01}$  и  $I_{01}^*$ ), однако их возможности в схеме без закорачивания индуктора ограничены большими положительными давлениями после "среза".

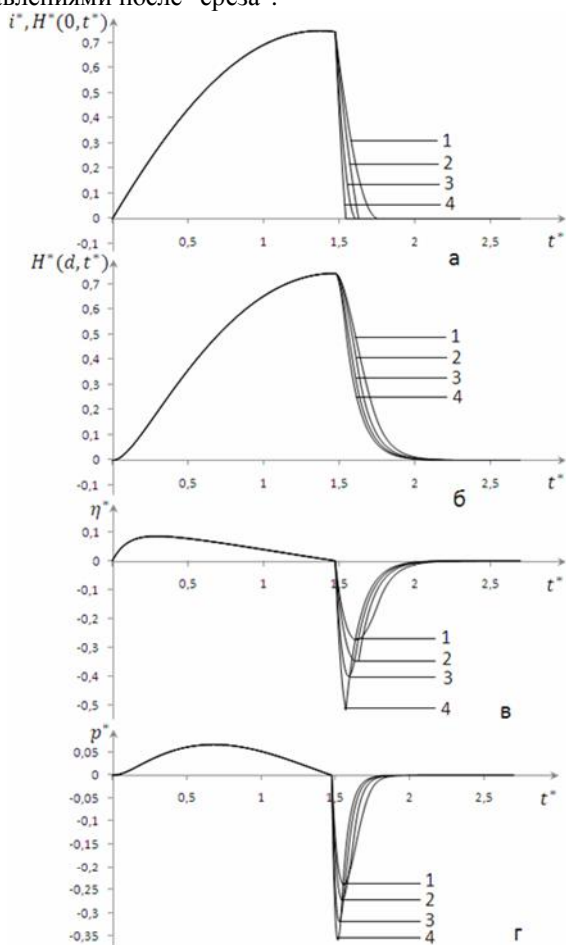


Рис. 3. Влияние амплитуды и частоты "срезающего" импульса на импульсное магнитное поле и ЭДУ, действующие на оболочку при  $\alpha_1^* = 0,2$ : для кривых 1, 2 –  $\omega_1^* = 5$ ; 3, 4 – 10; для кривой 1  $I_{mc}/I_m = 0,928$ ; 2 – 1,2; 3 – 0,9711; 4 – 1,3

В расчетах, результаты которых показаны на рис. 3 и в табл., принято  $\alpha^* = 0,2$ ,  $\tau^* = 0,1$  (такое значение  $\tau^*$  соответствует хорошему проникновению магнитного поля внутрь оболочки [5]),  $t_c^* = \omega t_{mi} = 1,47508$  ( $t_{mi}$  – момент времени, в который напряженность магнитного поля  $H(d, t)$  принимает максимальное значение). При этом амплитуда среза  $I_c^* = 0,741$ .

На рис. 3 изображены типичные зависимости напряженностей импульсного магнитного поля (а, б), линейной плотности вихревых токов в оболочке (в) и давления магнитного поля от времени (г), полученные при помощи описанной выше математической модели и вполне адекватные физическим процессам в рассматриваемом устройстве. Видим, что закорачивание индуктора действительно исключает третью, положительную полуволну давления, которая может вызвать нежелательное сжатие оболочки. Это открывает возможность увеличения круговой частоты "срезающего" импульса и его амплитуды для увеличения отрицательных давлений по сравнению со схемой без закорачивания индуктора. Сказанное иллюстрируется данными табл. (для сравнения см. [2, с. 56, 57, табл. 1, 2]), в которой приведены также значения отношения амплитуд "срезающего" и исходного импульсов тока  $I_{mc}/I_m$  (см. рис. 2) и производной результирующего тока (в безразмерной форме). Последняя величина характеризует скорость "среза". Каждому значению критерия  $\omega_1^*$  соответствуют три значения отношения  $I_{mc}/I_m$ , из которых первое подобрано так, чтобы производная тока  $i$  при  $t^* = t_0 - 0$  была близка к нулю, а для двух остальных  $I_{mc}/I_m > 1$ . Кратности амплитуд отрицательных давлений значительно ближе к случаю идеального "среза", чем при использовании импульсов относительно низкой частоты [2, табл. 1-3].

Как мы уже отмечали [2], при увеличении коэффициента затухания "срезающего" импульса и соответственно значения критерия  $\alpha_1^*$  возрастает скорость "среза", а следовательно, и кратность амплитуды отрицательного давления. Однако при  $\alpha_1^* = 0,8$  для достижения определенной величины  $p_{m2}/p_{m1}$  требуется значительно большее значение критерия  $I_{01}^*$  и соответственно напряжения  $U_{02}$ , поскольку  $I_{01} \sim U_{02}$ , чем при  $\alpha_1^* = 0,2$  (см. табл.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Математическая модель магнитно-импульсного расширения цилиндрической проводящей оболочки при помощи "встречного" разряда двух емкостных накопителей на внешний индуктор и закорачивания последнего при переходе результирующего тока через нулевое значение в момент времени  $t = t_0$  может быть представлена суперпозицией магнитных полей, создаваемых идеально "срезанными" при  $t = t_0$  исходным и "срезающим" импульсами тока.

2. При закорачивании индуктора возможно использование "срезающих" импульсов с очень высокой скоростью изменения, для которых форма "среза" и кратность амплитуды отрицательного давления приближаются к идеальному. При этом "срезающие" импульсы могут иметь большую амплитуду, меньший коэффициент затухания и высокую частоту, для которой  $\omega_1^* > 5$  (рис.3,а, кривая 4; табл.,  $\omega_1^* = 10, 20$ ).

Основные характеристики "срезанного" импульса тока и давления магнитного поля в схеме с закорачиванием индуктора

$\omega_1^*$	$\alpha_1^* = 0,8$							$\alpha_1^* = 0,2$					
	$I_{01}^*$	$I_{mc}/I_m$	$T_c^*$	$t_0^*$	$di^*/dt^*$		$p_{m2}/p_{m1}$	$I_{mc}/I_m = I_{01}^*$	$T_c^*$	$t_0^*$	$di^*/dt^*$		$p_{m2}/p_{m1}$
					$t^* = t_c + 0$	$t^* = t_0 - 0$					$t^* = t_c + 0$	$t^* = t_0 - 0$	
5	1,875	0,960	0,185	1,660	-9,454	-0,043	-4,52	0,928	0,290	1,765	-4,717	-0,004	-3,59
	2,2	1,126	0,106	1,581	-11,077	-3,457	-4,86	1,2	0,155	1,630	-6,077	-3,141	-4,09
	2,4	1,228	0,090	1,565	-12,077	-4,773	-5,05	1,4	0,125	1,600	-7,077	-4,455	-4,38
10	1,918	0,981	0,091	1,566	-19,254	0,013	-5,58	0,971	0,139	1,614	-9,787	-0,057	-4,77
	2,2	1,126	0,054	1,529	-22,077	-6,510	-5,87	1,2	0,079	1,554	-12,077	-5,898	-5,20
	2,4	1,228	0,045	1,526	-24,077	-7,830	-6,04	1,4	0,063	1,538	-14,077	-8,650	-5,50
20	1,933	0,989	0,045	1,520	-38,737	-0,053	-6,46	0,985	0,069	1,544	-19,777	-0,051	-5,82
	2,2	1,126	0,027	1,502	-44,077	-12,919	-6,70	1,228	0,038	1,513	-24,641	-12,524	-6,24
	2,4	1,228	0,023	1,498	-48,077	-18,148	-6,84	1,4	0,032	1,507	-28,077	-16,954	-6,45

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furth H.P. Devices for metal-forming by magnetic tension. – United States Patent. – №3.196.649. – Cl.72-56. – 1965.
2. Живанков К.И., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Электродинамические усилия, деформирующие цилиндрическую оболочку при "срезе" внешнего магнитного поля колебательным импульсом // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 53-59.
3. Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Влияние формы импульса внешнего магнитного поля на электродинамические усилия, деформирующие цилиндрическую оболочку // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 6. – С. 15-19.
4. Витков М.Г. Проникновение импульсного магнитного поля внутрь цилиндрического экрана // Журнал технической физики. – 1965. – № 3. – С. 410-413.
5. Бондина Н.Н., Крамчанин Е.Г., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Электродинамические усилия, действующие на цилиндрическую оболочку при колебательном разряде магнитно-импульсной установки // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 5. – С. 66-70.
6. Борцов А.В., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Физическое моделирование проникновения "срезанных" импульсов магнитного поля в цилиндрическую проводящую оболочку // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 5. – С. 90-95.

**Bibliography (transliterated):** 1. Furth H.P. Devices for metal-forming by magnetic tension. - United States Patent. - №3.196.649. - Cl.72-56. - 1965. 2. Jivankov K.I., Ljutenko L.A., Miha'lov V.M. Elektrodinamicheckie ucilija, deformirujuschie tsilindricheckuju obolochku pri "creze" vneshego magnitnogo polja kolebateln'im impulcom // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 6. - С. 53-59. 3. Ljutenko L.A., Miha'lov V.M. Vlijanie form'i impulsa vneshego magnitnogo polja na elektrodinamicheckie ucilija, deformirujuschie tsilindricheckuju obolochku // Tehnichna elektrodinamika. - 2007. - № 6. - С. 15-19.

4. Vitkov M.G. Pronikновение impulsnogo magnitnogo polja vnutr tsilindricheckogo ekrana // Jurnal tehnichecko' fiziki. - 1965. - № 3. - С. 410-413. 5. Bondina N.N., Kramchanin E.G., Ljutenko L.A., Miha'lov V.M. Elektrodinamicheckie ucilija, de'ctvujuschie na tsilindricheckuju obolochku pri kolebatelnom razrjade magnitno-impulcno' ustanovki // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2007. - № 5. - С. 66-70. 6. Bortsov A.V., Ljutenko L.A., Miha'lov V.M. Fizicheckoe modelirovanie proniknovenija "crezann'ih" impulcov magnitnogo polja v tsilindricheckuju provodjaschuju obolochku // Tehnichna elektrodinamika. Tematichni' vipusk "Problemi suchasno' elektrotehniki". - 2008. - CH. 5. - С. 90-95.

Поступила 11.12.2010

*Живанков Кирилл Игоревич,  
Михайлов Валерий Михайлович, д.т.н, проф.*  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
кафедра инженерной электрофизики  
61002, Харьков, ул.Фрунзе, 21  
тел. (057) 707-60-52

*Zhivankov K.I., Mikhailov V.M.*

**About avoidance of cylindrical shell compression after external magnetic field pulse shaving.**

Furth's idea of inductor shorting to prevent current oscillations after pulse shaving for avoidance of internal cylindrical conducting shell compression after the shell magnetic-impulse extension by negative pressure forces is theoretically verified. Feasibility of the shaving impulse frequency and magnitude increase along with negative pressure gain is also shown as compared with a scheme without inductor shorting.

**Key words – pulsed magnetic field pressure, cylindrical conducting shell compression, external field interruption, coil shorting.**