

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.

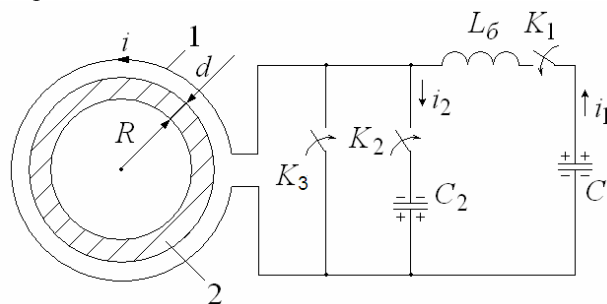


Рис. 1. Схема устройства с прерыванием тока при помощи дополнительного емкостного накопителя и закорачивания индуктора

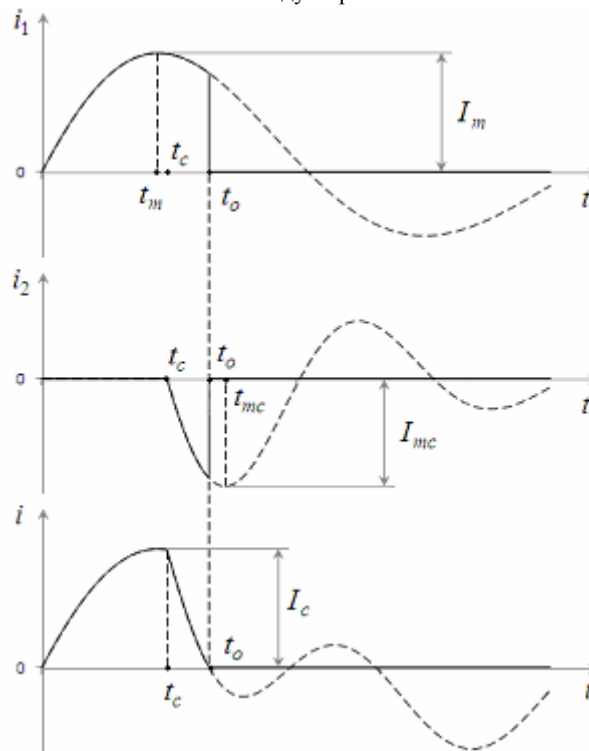


Рис. 2. Исходный (i_1), "срезающий" (i_2) и "срезанный" (i) импульсы тока в схеме с закорачиванием индуктора

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; α , α_1 – коэффициенты затухания; ω , ω_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 τ – постоянная времени первого приближения,

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

μ_0 – магнитная постоянная; γ – 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 α и ω соответственно на α_1 и ω_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 $p_0 = \mu_0 H_0^2/2$, η – 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 ω_1 и ω_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".

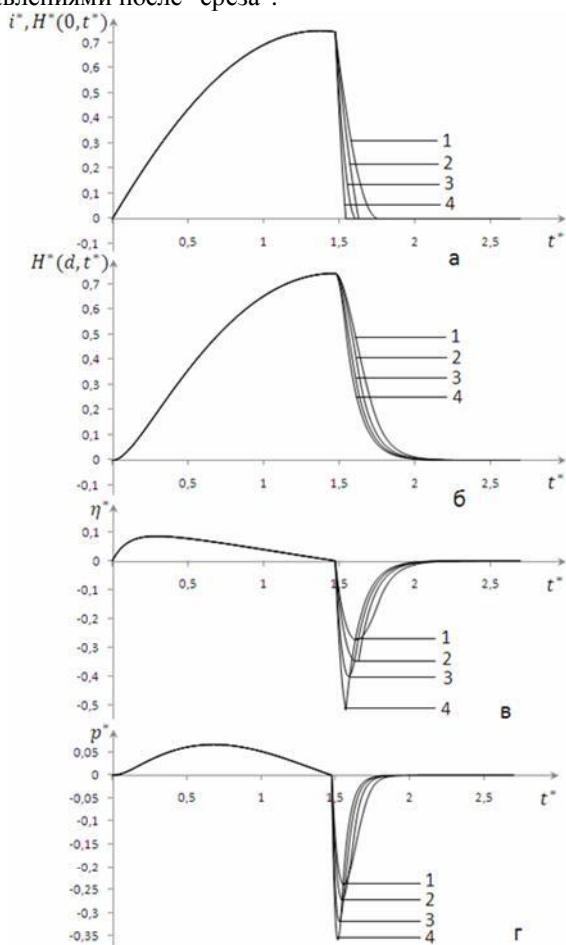


Рис. 3. Влияние амплитуды и частоты "срезающего" импульса на импульсное магнитное поле и ЭДУ, действующие на оболочку при $\alpha_1^* = 0,2$: для кривых 1, 2 – $\omega_1^* = 5$; 3, 4 – 10; для кривой 1 $I_{mc}/I_m = 0,928$; 2 – 1,2; 3 – 0,9711; 4 – 1,3

В расчетах, результаты которых показаны на рис. 3 и в табл., принято $\alpha^* = 0,2$, $\tau^* = 0,1$ (такое значение τ^* 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 ω_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 α_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

ω_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' випуск "Problemi suchasnoї elektrotehniki". - 2008. - Ч. 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.