

*Батыгин Ю. В., д-р техн. наук, проф.,  
Гнатов А. В., канд. техн. наук, доц.,  
Трунова И. С., аспирант*

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СОГЛАСУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ «ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО» ТИПА

**batygin48@mail.ru**

*Проведен анализ электродинамических процессов в цилиндрическом согласующем устройстве с двойным вторичным разомкнутым витком. Раскрыто решение краевой электродинамической задачи для рассматриваемого согласующего устройства и получены аналитические выражения для индуцированных токов в цилиндрах вторичного витка.*

**Ключевые слова:** *магнитно-импульсная обработка металлов, согласующее устройство, импульсный трансформатор тока, индуцированные токи.*

### ВВЕДЕНИЕ

В наше время представляются актуальными и перспективными разработки с использованием энергии электромагнитных полей в практике реставрации поврежденных кузовных покрытий автомобилей и корпусов самолетов. В автомобильной промышленности, согласно статистике 50% из небольших и средних повреждений приходится на вмятины, которые возможно устранить с помощью рихтовки и тогда исчезает потребность обязательной замены всего элемента. Большинство этих повреждений приходится на участки с частичным или полностью закрытым доступом с внутренней стороны элемента, который подлежит рихтовке. Это разные корпусные части автомобилей: двери, крыши, капоты, задние части автомобилей, пороги, арки и другие. Этот факт подтверждает актуальность и потребность в осуществлении разработок различных технических систем и устройств, которые позволяют производить внешнюю рихтовку без разборки корпуса или кузова автомобиля и без нарушения существующего защитного покрытия [1]. К таким устройствам в полной мере можно отнести импульсные трансформаторы тока – согласующие устройства [2]. Данные устройства применяют в практике магнитно-импульсной обработки металлов для повышения уровня энергии, передаваемой от мощных импульсных электрофизических установок в малоиндуктивные нагрузки.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Согласующие устройства можно поделить по конструктивному исполнению на дисковые плоские, цилиндрические коаксиальные и др. (специальные конструкции) [1, 2]. В [3, 4] описываются конструктивные особенности плоских дисковых импульсных трансформаторов тока. Причем, в [4] приводится анализ существующих

конструкций импульсных трансформаторов, предназначенных для получения больших токов – порядка единиц и десятков мегампер.

Конструкция согласующего устройства с первичной обмоткой в виде цилиндрической спирали и вторичной обмоткой, представляющей собой полый металлический цилиндр с продольным разрезом (рис.1.а), описана, например, в известной монографии [5]. К достоинствам таких согласующих устройств можно отнести более высокий уровень индуктивной связи между первичной и вторичной обмотками по сравнению с плоскими вариантами устройств аналогичного назначения. Тем не менее, и в отмеченной конструкции согласующего трансформатора значительная часть электромагнитной энергии всё же будет рассеиваться в пространстве вне первичной обмотки. Из физических соображений, очевидно, что понизить уровень рассеиваемой энергии можно, если вторичный виток выполнить в виде двух коаксиальных полых цилиндров, а первичную многovitkovую обмотку разместить между ними (рис.1.б). На выходе к нагрузке (индукторной системе) по краям продольных разрезов цилиндры соединены электрически так, чтобы суммировались токи, индуцированные в каждом из них. В дальнейшем, эту конструкцию вторичного витка будем называть двойным вторичным витком.

Авторским коллективом лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета разработан целый ряд согласующих устройств, использование которых позволило выполнять ранее трудно реализуемые, а порой и невозможные технологические операции по восстановлению (удалению вмятин, прогибов, деформаций) тонкостенных листовых металлов [6].

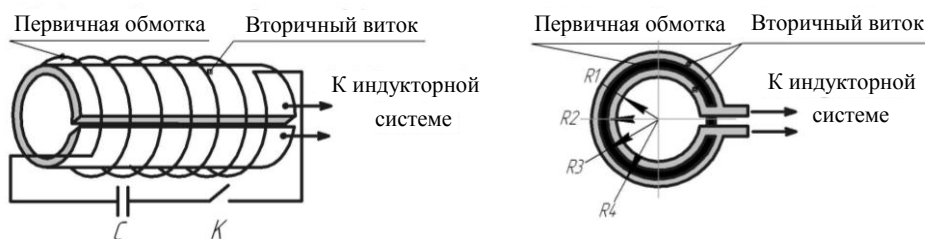


Рис. 1. Цилиндрический согласующий трансформатор: а) вторичный виток – полый цилиндр с продольным разрезом внутри первичной многовитковой обмотки; б) вторичный виток – два коаксиальных полых цилиндра, между которыми размещается первичная многовитковая обмотка (поперечное сечение)

**ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Цель настоящей работы – теоретическое обоснование работоспособности и возможностей цилиндрического согласующего трансформатора с двойным вторичным витком в качестве промежуточного преобразователя между источником мощности и инструментом-индуктором в магнитно-импульсной обработке металлов.

Поставленная цель требует решения краевой электродинамической задачи для модели на рис.1.б, принимаемой в качестве расчётной и соответствующей геометрии поперечного сечения предлагаемой конструкции. Решение проводится в цилиндрической системе координат с осью OZ по нормали к плоскости чертежа, радиальные переменные – по радиусу цилиндров.

Следует отметить, что подобная задача рассматривалась в работе [7], но её результаты не позволяют ответить на возникающие вопросы и могут служить лишь контрольными ориентирами в настоящем рассмотрении.

Сформулируем принимаемые допущения:

– цилиндры двойного вторичного витка выполнены из одинаковых металлов с удельной электропроводностью –  $\gamma$ ;

– продольный –  $\ell$  и радиальные размеры –  $R_{1,2,3,4}$  рассматриваемой системы достаточно велики, так что  $\frac{d_1}{R_{1,4}} \ll 1, \frac{d_2}{R_{1,4}} \ll 1, \frac{h}{R_{1,4}} \ll 1,$

где  $d_{1,2}$  – толщина внутреннего и внешнего цилиндров двойного вторичного витка, соответственно, а  $h$  – расстояние между ними, полностью заполненное металлом первичной обмотки с числом витков –  $w$ ;

– наличием продольных разрезов в коаксиальных цилиндрах пренебрегаем и полагаем, что система аксиально симметрична, так что  $\partial/\partial\varphi \approx 0$  ( $\varphi$  – азимутальный угол);

– имеет место лишь азимутальная составляющая плотности тока в индукторе,  $J(t) = J_m \cdot j(t), J_m$  – амплитуда,  $j(t)$  – временная зависимость;

– электромагнитные процессы удовлетворяют условию квазистационарности,  $\omega/c \cdot \ell \ll 1$ , где  $\omega$  – характерная циклическая частота,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\ell$  – наибольший характерный геометрический размер в системе.

При решении поставленной задачи согласно расчётной модели на рис.1.б выделим следующие области.

1. Внутренняя полость,  $r \in [0, R_1]$ .
2. Металл внутреннего цилиндра,  $r \in [R_1, R_2]$ .
3. Полость между цилиндрами, заполненная металлом первичной многовитковой обмотки,  $r \in [R_2, R_3]$ .
4. Металл внешнего цилиндра,  $r \in [R_3, R_4]$ .
5. Свободное пространство вне системы,  $r \in [R_4, \infty)$ .

Электромагнитные процессы в рассматриваемой системе описываются уравнениями Максвелла для ненулевых компонент вектора напряжённости электрического и магнитного полей  $E_\varphi(r, t) \neq 0, H_z(r, t) \neq 0$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r)) &= -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r); & (1) \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} &= p \cdot \varepsilon_0 \cdot E_\varphi(p, r); & (2) \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} &= \gamma \cdot E_\varphi(p, r); & (3) \end{aligned} \right.$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $\mu_0, \varepsilon_0$  – магнитная и диэлектрическая проницаемости свободного пространства;  $E_\varphi(p, r) = L\{E_\varphi(t, r)\}; H_z(p, r) = L\{H_z(t, r)\}.$

Дифференциальная система дополняется условиями связи для компонент векторов поля на границах выделенных областей.

$$r = R_1 : E_\varphi^{(1)}(r = R_1, t) = E_\varphi^{(2)}(r = R_1, t);$$

$$H_z^{(1)}(r = R_1, t) = H_z^{(2)}(r = R_1, t). \quad (4)$$

$$r = R_{2,3} : E_\varphi^{(2)}(r = R_2, t) \approx -E_\varphi^{(3)}(r = R_3, t);$$

$$H_z^{(2)}(r = R_2, t) + H_z^{(3)}(r = R_3, t) \approx \left( \frac{J(p)w}{\ell} \right). \quad (5)$$

$$r = R_4 : E_\varphi^{(3)}(r = R_4, t) = E_\varphi^{(4)}(r = R_4, t). \quad (6)$$

Система (1÷3) в разных средах приводится к соответствующим дифференциальным уравнениям для напряжённости электрического поля

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r)) \right) - k_{1,2}^2(p) \cdot E_\varphi(p, r) = 0, \quad (7)$$

где  $k_1(p)$  – волновое число в металле,

$$k_1(p) = \sqrt{p\mu_0\gamma}; \quad k_2(p) – \text{волновое число в ва-}$$

$$E_\varphi^{(3)}(p, r) = C_2(p) \cdot I_1(k_1(p) \cdot r) + D_2(p) \cdot K_1(k_1(p) \cdot r), \quad (9)$$

где  $C_2(p)$ ,  $D_2(p)$  – произвольные постоянные интегрирования.

В вакууме волновое число для реальных рабочих частот магнитно-импульсной обработки металлов (до 50÷70 кГц) [9] таково, что

$$\left| k_2^2(p) = \left( \frac{p}{c} \right)^2 \right| \rightarrow 0. \text{ В пренебрежении слагае-}$$

мыми, содержащими данный множитель, уравнение (7) преобразуется к виду

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r)) \right) \approx 0. \quad (10)$$

Фундаментальная система решений уравнения (10) есть линейная комбинация степенных функций вида [8]

$$E_\varphi(p, r) = \frac{A_1(p)}{2} \cdot r + A_2(p) \cdot \frac{1}{r}, \quad (11)$$

где  $A_{1,2}(p)$  – произвольные постоянные интегрирования.

$$H_z^{(2)}(p, r) = -\sqrt{\frac{\gamma}{p \cdot \mu_0}} \cdot (C_1(p) \cdot I_0(k_1(p) \cdot r) - D_1(p) \cdot K_0(k_1(p) \cdot r)), \quad (14)$$

где  $I_0(z)$ ,  $K_0(z)$  – модифицированные функции Бесселя первого порядка.

$$H_z^{(3)}(p, r) = -\sqrt{\frac{\gamma}{p \cdot \mu_0}} \cdot (C_2(p) \cdot I_0(k_1(p) \cdot r) - D_2(p) \cdot K_0(k_1(p) \cdot r)). \quad (15)$$

Для  $r \in [0, R_1]$ ,

$$H_z^{(1)}(p, r) = -\frac{A_1(p)}{p \cdot \mu_0}. \quad (16)$$

Независимость напряжённости магнитного поля от радиальной координаты во внутренней полости (16) согласуется с аналогичным результатом, полученным ранее авторами [7], и объяс-

няется в вакууме,  $k_2(p) = p/c$ ,  $c$  – скорость света в вакууме.

Общий интеграл уравнения (7) для напряжённости электрического поля в металле внутреннего цилиндра вторичного витка, область  $r \in [R_1, R_2]$ , запишется в виде [8]

$$E_\varphi^{(2)}(p, r) = C_1(p) \cdot I_1(k_1(p) \cdot r) + D_1(p) \cdot K_1(k_1(p) \cdot r), \quad (8)$$

где  $I_1(z)$ ,  $K_1(z)$  – модифицированные функции Бесселя первого порядка,  $C_1(p)$ ,  $D_1(p)$  – произвольные постоянные интегрирования.

Аналогично, для металла внешнего цилиндра – область  $r \in [R_3, R_4]$

Учитывая ограниченность напряжённости электрического поля во внутренней полости вторичного витка и вне его, записываем выражения для  $E_\varphi(p, r)$  в каждой из указанных областей.

Так, для  $r \in [0, R_1]$

$$E_\varphi^{(1)}(p, r) = \frac{A_1(p)}{2} \cdot r. \quad (12)$$

Для  $r \in [R_4, \infty)$

$$E_\varphi^{(4)}(p, r) = A_2(p) \cdot \frac{1}{r}. \quad (13)$$

С помощью уравнения (1) и выражений (8, 9, 12, 13) найдём Лапласовы изображения напряжённости магнитного поля в каждой из выделенных областей.

В металле внутреннего цилиндра вторичного витка, область  $r \in [R_1, R_2]$

Аналогично, для металла внешнего цилиндра – область  $r \in [R_3, R_4]$

няется принятыми физическими условиями работы рассматриваемой электродинамической системы (10).

Для  $r \in [R_4, \infty)$

$$H_z^{(4)}(p, r) \approx 0. \quad (17)$$

Достоверность (17) подтверждается выводами работ [1, 5 – 8], в соответствии с которыми

касательная составляющая напряжённости магнитного поля плоской волны практически не проникает сквозь металл в свободное полупространство. Возвращаясь к реальным условиям работы индукторных систем, последующие вычисления можно существенно упростить. Как было указано, рабочие частоты магнитно-импульсной обработки металлов не превышают  $\sim 50 \div 70$  кГц. Для наименьшего значения  $f \sim 1$  кГц и реально возможных радиальных размеров рассматриваемой системы  $R_1 \approx 0.025 \div 0.25$  м справедлива оценка

$$\sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot R_1} \gg 1 \text{ и } |k_1(p) \cdot R_{1,2,3,4}| \gg 1. \quad (18)$$

С использованием асимптотических разложений модифицированных функций Бесселя согласно (18), получаем следующие зависимости

$$H_z^{(2)}(p, r) \approx -\frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{p \cdot \mu_0}} \cdot (C_1(p) \cdot e^{k_1(p)r} - D_1(p) \cdot e^{-k_1(p)r}). \quad (22)$$

в)  $r \in [R_3, R_4]$

$$E_\phi^{(3)}(p, r) \approx \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot (C_2(p) \cdot e^{k_1(p)r} + D_2(p) \cdot e^{-k_1(p)r}), \quad (23)$$

$$H_z^{(3)}(p, r) \approx -\frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{p \cdot \mu_0}} \cdot (C_2(p) \cdot e^{k_1(p)r} - D_2(p) \cdot e^{-k_1(p)r}). \quad (24)$$

г)  $r \in [R_4, \infty)$

$$E_\phi^{(4)}(p, r) = A_2(p) \cdot \frac{1}{r}, \quad (25)$$

$$H_z^{(4)}(p, r) \approx 0. \quad (26)$$

В конечном итоге нас интересует возбуждение индуцированных токов в цилиндрах вторичного витка. Поэтому ограничимся отысканием лишь неизвестных произвольных постоянных интегрирования в выражениях для напряжённости электромагнитных полей в каждом из них – (21) и (23).

$$\frac{1}{\sqrt{R_1}} \cdot (C_1(p) \cdot e^{k_1(p)R_1} + D_1(p) \cdot e^{-k_1(p)R_1}) = \frac{A_1(p) \cdot R_1}{2}; \quad (28)$$

$$\frac{1}{k_1(p) \cdot \sqrt{R_1}} \cdot (C_1(p) \cdot e^{k_1(p)R_1} - D_1(p) \cdot e^{-k_1(p)R_1}) = \frac{A_1(p)}{p \cdot \mu_0}. \quad (29)$$

Из (27) находим, что

$$C_2(p) = D_2(p) \cdot e^{-2k_1(p)R_4}. \quad (30)$$

Из (28), (29) определяем, что

$$C_1(p) = D_1(p) \cdot e^{-2k_1(p)R_1}. \quad (31)$$

$$E_\phi^{(2)}(p, r) = D_1(p) \cdot \frac{2}{\sqrt{r}} \cdot e^{-k_1(p)R_1} \cdot \text{ch}(k_1(p) \cdot (r - R_1)); \quad (32)$$

$$H_z^{(2)}(p, r) = -D_1(p) \cdot \frac{2}{\sqrt{r}} \cdot \frac{\gamma}{k_1(p)} \cdot e^{-k_1(p)R_1} \cdot \text{sh}(k_1(p) \cdot (r - R_1)); \quad (33)$$

сти для компонент напряжённости электрического и магнитного полей в выделенных областях (постоянные величины, появляющиеся в процессе преобразований, включаем в константы интегрирования) [8]

а)  $r \in [0, R_1]$

$$E_\phi^{(1)}(p, r) = \frac{A_1(p)}{2} \cdot r, \quad (19)$$

$$H_z^{(1)}(p, r) = -\frac{A_1(p)}{p \cdot \mu_0}. \quad (20)$$

б)  $r \in [R_1, R_2]$

$$E_\phi^{(2)}(p, r) \approx \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot (C_1(p) \cdot e^{k_1(p)r} + D_1(p) \cdot e^{-k_1(p)r}), \quad (21)$$

Необходимые зависимости из (19)–(26) подставим в граничные условия (4), (6). Получим алгебраическую систему уравнений относительно искомого  $C_{1,2}(p), D_{1,2}(p)$ . Уравнения расположим в порядке, удобном для определения неизвестных констант.

$$(C_2(p) \cdot e^{k_1(p)R_4} - D_2(p) \cdot e^{-k_1(p)R_4}) \approx 0; \quad (27)$$

Соотношения (30) и (31) подставим в формулы (21)–(24). После тождественных преобразований получим следующие зависимости.

$$E_{\phi}^{(3)}(p, r) = D_2(p) \cdot \frac{2}{\sqrt{r}} \cdot e^{-k_1(p)R_4} \cdot \text{ch}(k_1(p) \cdot (R_4 - r)); \quad (34)$$

$$H_z^{(3)}(p, r) = D_2(p) \cdot \frac{2}{\sqrt{r}} \cdot \frac{\gamma}{k_1(p)} \cdot e^{-k_1(p)R_4} \cdot \text{sh}(k_1(p) \cdot (R_4 - r)). \quad (35)$$

Выражения (33)–(35) подставим в условие (5). Получаем систему алгебраических уравнений относительно  $D_{1,2}(p)$ .

$$\begin{cases} D_1(p) \frac{1}{\sqrt{R_2}} e^{-k_1(p)R_1} \text{ch}(k_1(p)d_1) = -D_2(p) \frac{1}{\sqrt{R_3}} e^{-k_1(p)R_1} \text{ch}(k_1(p)d_2); \\ \frac{2\gamma}{k_1(p)} \left( D_1(p) \frac{1}{\sqrt{R_2}} e^{-k_1(p)R_1} \text{sh}(k_1(p)d_1) + D_2(p) \frac{1}{\sqrt{R_3}} e^{-k_1(p)R_1} \text{sh}(k_1(p)d_2) \right) = \left( \frac{J(p)w}{\ell} \right). \end{cases} \quad (36)$$

Из системы (36) определяем искомые величины.

$$D_1(p) = - \left( \frac{J(p)w}{\ell} \cdot \frac{\sqrt{R_2}}{2\gamma} \right) \cdot k_1(p) e^{k_1(p)R_1} \cdot \frac{\text{ch}(k_1(p)d_2)}{\text{sh}(k_1(p)(d_1 + d_2))}; \quad (37)$$

$$D_2(p) = - \left( \frac{J(p)w}{\ell} \cdot \frac{\sqrt{R_3}}{2\gamma} \right) \cdot k_1(p) e^{k_1(p)R_1} \cdot \frac{\text{ch}(k_1(p)d_1)}{\text{sh}(k_1(p)(d_1 + d_2))}. \quad (38)$$

L-изображение тока, индуцированного в металле внутреннего цилиндра двойного вто-

ричного витка, можно найти с помощью закона полного тока.

$$J_1(p) \approx \left( H_z^{(2)}(p, r = R_1) + H_z^{(2)}(p, r = R_2) \right) \cdot \ell = - (J(p) \cdot w) \cdot \frac{\text{ch}(k_1(p)d_2) \cdot \text{sh}(k_1(p)d_1)}{\text{sh}(k_1(p)(d_1 + d_2))}. \quad (39)$$

Аналогично, можно определить ток в металле внешнего цилиндра.

$$J_2(p) \approx \left( H_z^{(3)}(p, r = R_3) + H_z^{(3)}(p, r = R_4) \right) \cdot \ell = - (J(p) \cdot w) \cdot \frac{\text{ch}(k_1(p)d_1) \cdot \text{sh}(k_1(p)d_2)}{\text{sh}(k_1(p)(d_1 + d_2))}. \quad (40)$$

Алгебраическая сумма выражений (39) и (40) даёт полный ток на выходе двойного вторичного витка при соединении должным образом внутреннего и внешнего цилиндров по краям продольных разрезов.

$$J_s = J_1 + J_2 = - (J(p) \cdot w). \quad (41)$$

Полученный результат говорит о том, что при выполнении определённых условий, связывающих геометрию цилиндрического импульсного трансформатора с двойным вторичным витком и частотный диапазон преобразуемых сигналов, электромагнитные потери в предложенном устройстве должны отсутствовать. Энергия тока первичной многовитковой обмотки должна без потерь трансформироваться в энергию тока, возбуждаемого в металле вторичного витка. Справедливость и достоверность полученного результата (41) легко обосновывается, исходя из простых физических соображений.

Условия, выполнение которых обеспечивает практическую реализацию преобразования

импульсных сигналов без электромагнитных потерь, выпишем в обобщённом виде отдельно. Они следуют из условия квазистационарности в принятых допущениях и неравенства (18).

$$\begin{aligned} \omega \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0} \cdot R_{\max} &<< 1, \\ \sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma} \cdot R_{\min} &>> 1, \end{aligned} \quad (42)$$

где  $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$  – наибольший и наименьший радиальные размеры двойного вторичного витка, соответственно.

Полученный результат о трансформации токов определяет интегральное действие преобразователя. Детали процессов возбуждения индуцированных токов в металле цилиндров двойного вторичного витка следуют из выражений (39) и (40). Наиболее просто распределение токов между цилиндрами прослеживается для достаточно низких частот, когда

$\omega \ll \frac{1}{(\mu_0 \cdot \gamma \cdot d_{1,2}^2)}$ . В этом случае  $|k_1(p) \cdot d_{1,2}| \rightarrow 0$ .

Выполняя соответствующие предельные переходы в формулах (39) и (40), находим возбуждаемые вихревые токи.

$$J_1(p) \approx \lim_{|k_1(p) \cdot d_{1,2}| \rightarrow 0} \left( -(J(p) \cdot w) \cdot \frac{\text{ch}(k_1(p)d_2) \cdot \text{sh}(k_1(p)d_1)}{\text{sh}(k_1(p)(d_1 + d_2))} \right) = -(J(p) \cdot w) \cdot \frac{d_1}{(d_1 + d_2)}; \quad (43)$$

$$J_2(p) \approx \lim_{|k_1(p) \cdot d_{1,2}| \rightarrow 0} \left( -(J(p) \cdot w) \cdot \frac{\text{ch}(k_1(p)d_1) \cdot \text{sh}(k_1(p)d_2)}{\text{sh}(k_1(p)(d_1 + d_2))} \right) = -(J(p) \cdot w) \cdot \frac{d_2}{(d_1 + d_2)}. \quad (44)$$

### ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ электродинамических процессов в цилиндрическом согласующем устройстве с двойным вторичным разомкнутым витком.

2. Проведено теоретическое обоснование работоспособности рассматриваемого согласующего устройства в качестве промежуточного преобразователя между источником мощности и инструментом-индуктором.

3. В низкочастотном режиме работы цилиндрического согласующего импульсного трансформатора с двойным вторичным витком индуцированные токи распределяются пропорционально толщине цилиндров, образующих обмотку этого витка. Достоверность данного вывода очевидна из физических соображений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Туренко, А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Харьков: ХНАДУ. - 2009. – 240 с.

2. Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хищенко. - Харьков: Вища школа. – 1977. – 189 с.

3. Пат. 1464646 ФРГ, МКИ В 21 D 26/14, Н 01 F (7с 26/14, 21 D 2/49, 21 G 1/02). Vorrichtung zur Formung von Werkstückken durch Anwendung magnetischer Impulse / Broton F. D., Hayward G. V. заявитель и патентообладатель Gulf General Atomic Incorp., San Diego, California (США). – № Р 1464646.9-14 (G 39271) ; заявл. 29.11.63; опубл. 19.05.71.

4. Гончаренко, Г.М. Импульсный согласующий трансформатор / Г.М. Гончаренко, В.А. Галкин, Ю.И. Гужавин, Ю.А. Попов, И.А. Галкин // Высоковольтная импульсная техника. – 1976. – Вып.3 – С. 27 – 34.

5. Комельков, В.С. Техника больших импульсных токов и магнитных полей /

В.С. Комельков, П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц. – М. : Атомиздат, 1970. – 472 с.

6. Батыгин, Ю.В. Анализ электродинамических процессов в согласующем устройстве «дискового» типа / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, И.С. Трунова // Механика и информатика: материалы VIII Украинско-Польской конференции молодых ученых, Хмельницкий 12–14 мая 2011 г. / Хмельницкий национальный университет. – Хмельницкий, 2011. – С.19 – 21.

7. Батыгин, Ю. В. Особенности магнитно-импульсной «раздачи» тонкостенных трубчатых заготовок / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский // Электричество. – 2005. – №11. – С.62–68.

8. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Изд-во «Наука», 1973. – 832 с.

9. Батыгин, Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский. – Т.2: Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. – Харьков МОСТ–Торнадо. – 2002. – 288 с.