

# Расчет электродинамических процессов в импульсном трансформаторе тока — согласующем устройстве «дискового» типа

БАТЫГИН Ю.В., ГНАТОВ А.В., ТРУНОВА И.С.

*Проведен расчет электродинамических процессов в импульсном трансформаторе тока, который используется как согласующее устройство «дискового» типа. Вычислен коэффициент трансформации по току — основная электродинамическая характеристика согласующего устройства. Определены временные и амплитудные характеристики индуцированного тока. Полученные результаты проиллюстрированы численными оценками для реальных ситуаций в практике магнитно-импульсной обработки металлов.*

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка металлов, импульсный трансформатор тока, согласующее устройство, электродинамические процессы, индуктор, индуцированный ток

В настоящее время в промышленности (например автомобильной и авиационной) все больше внедряются новые технологические операции, направленные на деформирование металлических заготовок для придания им соответствующей формы, а также связанные с реставрацией деформированных металлических элементов (рихтовка). Выполнение таких операций известными техническими методами в ряде случаев уже не представляется возможным. В связи с этим все большее внимание уделяется новым прогрессивным методам магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) [1 — 3]. Реализация такого воздействия магнитно-импульсного поля на объект обработки выполняется с помощью индукторных систем. Достижение эффективности МИОМ возможно лишь при определенных (для данной операции) параметрах тока в индукторе. Поэтому достижение необходимых параметров разрядного импульса тока в индукторных системах является достаточно актуальной задачей. Один из способов ее решения — включение в индукторные системы различных согласующих устройств — импульсных трансформаторов [2, 4]. Такое устройство представляет собой импульсный воздушный трансформатор, первичная обмотка которого выполнена в виде многовитковой спирали, а вторичная — представляет собой виток с разрезом. Этот виток может быть плоским, а может иметь форму цилиндра (дисковая и цилиндрическая конструкции) [5, 6].

В [2] представлены некоторые конструкции согласующих устройств без расчета их электротехни-

*The electrodynamic processes arising in an impulse current transformer used as a disk-type matching device are calculated. The current transformation ratio, which is the matching device's main electrodynamic characteristic, is calculated. The time and amplitude characteristics of the induced current are determined. The obtained results are illustrated by numerical estimates for situations really encountered in the practice of magnetic-impulse processing of metals.*

**Key words:** magnetic-impulse processing of metals, impulse current transformer, matching device, electrodynamic processes, inductor, induced current

ческих параметров. Опыт использования магнитно-импульсных систем для удаления вмятин на изделиях европейских производителей выявил, что сам инструмент (индуктор) играет роль согласующего устройства [1, 2, 7]. Недостатком такого конструктивного решения является ограниченность его применения. Конструкции же, в которых индуктор и согласующее устройство выполнены в виде отдельных элементов, имеют существенное преимущество, так как появляется возможность изменять инструмент (индуктор), а следовательно, и его форму, размеры, да и саму конструкцию индуктора. В этом случае значительно возрастают его прочностные показатели, что существенно расширяет область применения методов МИОМ в обрабатывающей промышленности. В связи с этим возникает потребность в разработке различных конструкций согласующих устройств, позволяющих получить необходимые параметры разрядного тока в индукторе для осуществления заданной технологической операции.

В настоящей статье изложен расчет электродинамических процессов в согласующем устройстве «дискового» типа, определяется его основная характеристика — коэффициент трансформации тока.

**Расчет электродинамических процессов.** Поставленную задачу решим аналогично тому, как это было сделано нами ранее [1, 2, 8]. Для анализа электромагнитных процессов рассмотрим расчетную модель в цилиндрической системе координат, показанную на рис. 1, где  $\vec{e}_r$ ,  $\vec{e}_j$ ,  $\vec{e}_z$  — направляющие орты.

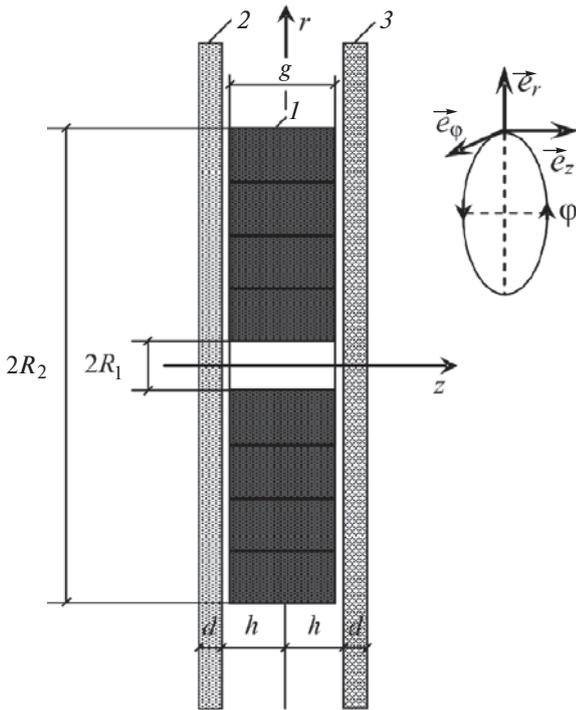


Рис. 1. Расчётная модель: 1 – первичная обмотка (плоский многovitковый соленоид); 2, 3 – вторичная обмотка (проводящие диски)

При решении задачи примем следующие допущения:

распределение плотности тока в катушке первичной обмотки  $I$  (число витков  $w$ , внутренний радиус  $R_1$ , внешний  $R_2$ , толщина  $g$ ) принимаем равномерным;

конструктивное исполнение первичной обмотки таково, что она «прозрачна» для действующих полей ( $g \ll \lambda$ ) и не влияет на протекающие электромагнитные процессы;

наличием радиальных разрезов в дисках согласно известной практике МИОМ [1, 5] можно пренебречь и считать, что имеет место аксиальная симметрия ( $\partial/\partial\varphi = 0$ ,  $\varphi$  – азимутальный угол) и симметрия системы относительно плоскости первичной обмотки  $z=0$ ;

диски 2 и 3 одинаковы, выполнены из немагнитных металлических листов толщиной  $d$ , электропроводностью  $g$  с достаточно большими поперечными размерами и расположены на одинаковом расстоянии от витка индуктора  $h$ ;

амплитудно-временные параметры тока в первичной обмотке  $I(t)$  таковы, что справедливо квазистационарное приближение по Ландау:  $\frac{w}{c}l < 1$ ,  $w$  – радиальная частота;  $c$  – скорость света в вакууме;  $l$  – характерный размер системы.

*Примечание.* Как следует из [3, 4], характерные рабочие частоты и размеры элементов технологической оснастки при МИОМ составляют

$f < 100$  кГц и  $l < 1,0$  м соответственно. Численная оценка для максимально возможных значений указанных характеристик подтверждает справедливость принятого в расчётах квазистационарного приближения по Ландау, так как действительно

$$\frac{w}{c}l \gg \frac{2\pi 100000}{3 \times 10^8} \ll 1, 0,002 < < 1.$$

Прежде чем перейти к расчету электродинамических процессов в согласующем устройстве, следует отметить, что в практике МИОМ функция времени плотности тока индуктора, как правило, имеет вид экспоненциально затухающей синусоиды, т.е.  $j(t) = j_m e^{-d_0 t} \sin j$ , где  $j_m = \frac{I_m w}{(R_2 - R_1)}$  – ам-

плитуда плотности тока;  $I_m$  – амплитуда тока;  $d_0$  – относительный декремент затухания;  $j = \omega t$  – фаза;  $w$  – циклическая (радиальная) частота возбуждающего тока [1–3].

Уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ( $E_j \neq 0, H_{r,z} \neq 0$ ), преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид:

$$\frac{\partial H_r(p,r,z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p,r,z)}{\partial r} = j_j(p,r,z); \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r E_j(p,r,z)) = -\mu_0 p H_z(p,r,z); \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_j(p,r,z)}{\partial z} = -\mu_0 p H_r(p,r,z); \quad (3)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $E_j(p,r,z) = L\{E_j(t,r,z)\}$ ;  $H_{r,z}(p,r,z) = L\{H_{r,z}(t,r,z)\}$ ;  $j_j(p,r,z) = L\{j_j(t,r,z)\}$ ;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

В общем случае плотность тока в правой части уравнения (1) записывается в виде

$$j_j(p,r,z) = (p\epsilon_0 + g)E_j(p,r,z) + j_{ji}(p,r,z), \quad (4)$$

где  $j_{ji}(p,r,z)$  – плотность стороннего тока в первичной обмотке:  $j_{ji}(p,r,z) = \frac{j(p)}{g} f(r) h(0,5g - |z|)$

$j(p) = \frac{I(p)w}{(R_2 - R_1)}$ ;  $\delta(z)$  – дельта-функция Дирака;  $f(r)$

– функция однородного радиального распределения тока в первичной обмотке:  $f(r) = h(r - R_1) - h(r - R_2)$ ;  $h(z)$  – ступенчатая функция Хевисайда;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Решая полученные уравнения известными математическими методами [9], во избежание громозд-

кости в изложении, опустим промежуточные выкладки и запишем окончательное выражение для индуцированного тока в диске «условного радиуса» R:

$$I_j(R,t) = - \frac{\partial}{\partial t} \frac{I_m w d}{R_2 - R_1} \frac{\partial}{\partial x} \frac{F_1(b_k, x)}{F_2(b_k, x, h)} \cdot \int_0^R f(x) J_0 \left( \frac{x}{d} \right) f_k(x, j) dx, \quad (5)$$

где  $x = (l d)$  – переменная интегрирования;  $l$  – параметр интегрального преобразования Фурье–Бесселя;

$$F_1(b_k, x) = 1 - \cos(b_k) - \frac{b_k}{x} \sin(b_k)$$

$$F_2(b_k, x, h) = \cos(b_k) \operatorname{sh} \left( \frac{h}{d} x \right) + \frac{b_k}{x} \operatorname{ch} \left( \frac{h}{d} x \right)$$

$$f(x) = \frac{p}{2x^2} \left[ H_0 \left( \frac{R_2}{d} x \right) - H_0 \left( \frac{R_1}{d} x \right) \right] + \frac{h}{x} \left[ H_1 \left( \frac{R_2}{d} x \right) - H_1 \left( \frac{R_1}{d} x \right) \right]$$

$$f_k(x, j) = \frac{R_2}{d} J_0 \left( \frac{x}{d} \right) - \frac{R_1}{d} J_0 \left( \frac{x}{d} \right) + \frac{h}{d} \left[ J_1 \left( \frac{x}{d} \right) - J_1 \left( \frac{x}{d} \right) \right]$$

$$f_k(x, j) = \frac{R_2}{d} J_0 \left( \frac{x}{d} \right) - \frac{R_1}{d} J_0 \left( \frac{x}{d} \right) + \frac{h}{d} \left[ J_1 \left( \frac{x}{d} \right) - J_1 \left( \frac{x}{d} \right) \right]$$

$$f_k(x, j) = \frac{R_2}{d} J_0 \left( \frac{x}{d} \right) - \frac{R_1}{d} J_0 \left( \frac{x}{d} \right) + \frac{h}{d} \left[ J_1 \left( \frac{x}{d} \right) - J_1 \left( \frac{x}{d} \right) \right]$$

$$f_k(x, j) = e^{-d_0 j} \operatorname{sinj} - \frac{b_k^2 + x^2}{1 + \frac{b_k^2 + x^2}{wt}} d_0 \operatorname{sinj} - \cosj + e^{-\frac{b_k^2 + x^2}{wt}} j$$

$$f_k(x, j) = e^{-d_0 j} \operatorname{sinj} - \frac{b_k^2 + x^2}{1 + \frac{b_k^2 + x^2}{wt}} d_0 \operatorname{sinj} - \cosj + e^{-\frac{b_k^2 + x^2}{wt}} j$$

$t = m_0 g d^2$  – характерное время диффузии поля в металл листовой заготовки;

$$\operatorname{tg}(b_k) = \frac{2}{\frac{b_k}{x} - \frac{x}{b_k} + \frac{b_k}{x} + \frac{x}{b_k} - \frac{h}{d} x} \quad (6)$$

Радиальное распределение индуцированного тока

$$I_j(r, t) = - \frac{\partial}{\partial t} \frac{I_m w}{R_2 - R_1} \frac{\partial}{\partial x} \frac{F_1(b_k, x)}{F_2(b_k, x, h)} \cdot \int_0^R f(x) J_0 \left( \frac{r}{d} \right) f_k(x, j) dx. \quad (7)$$

Выражения (5) и (7) представляют собой аналитические решения поставленной электродинамической задачи о возбуждении индуцированного тока в одном диске. В рассматриваемом согласующем устройстве диски соединены параллельно. Полный ток в индукторе будет равен удвоенному значению тока, полученному по формуле (5). Это даст полное значение тока во вторичной обмотке из двух дисков рассматриваемого согласующего устройства. Зная значения тока в первичной и вторичной обмотках импульсного трансформатора тока (согласующего устройства), можно оценить и основную его характеристику – коэффициент трансформации.

Для конкретных расчётов может оказаться полезной приближённая оценка корней дисперсионного уравнения (6) для  $x \ll 1$  и  $x \gg 1$  ( $x = (l d)$ ) при достаточно малых рабочих зазорах –  $h$  ( $h \ll 1$ ). Приемлемость данных приближений определяется видом образа Фурье–Бесселя для функции радиального распределения тока в первичной обмотке рассматриваемого преобразователя (5).

Итак, для  $k=0$  и « $x, b_0 \gg \sqrt{1 - \frac{h}{d}}$ » имеем:

а) для  $x \ll 1$

$$b_k \gg \pm k p \left[ 1 - \frac{1}{x^2 \frac{h}{d}} \right] \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

б) для  $x \gg 1$

$$b_k \gg \pm k p \left[ 1 - \frac{1}{x^2 \frac{h}{d}} \right] \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Отметим, что все полученные выражения являются чётными функциями относительно решений –  $b_k$ . Данная симметрия позволяет проводить суммирование только по положительным значениям корней дисперсионного уравнения. При расчётах абсолютных значений характеристик электромагнитных процессов их амплитуды следует удваивать.

**Численные оценки.** Полученные аналитические результаты проиллюстрируем численными оценками

ми для ситуаций, реальных для практики применения МИОМ [1–4, 9]. Положим:

- а) для первичной обмотки  $w=20, h=0,0025$  м,  $R_1=0,015$  м,  $R_2=0,075$  м;

б) для вторичной обмотки металл дисков – алюминий,  $g \gg 3,75 \times 10^7$  1/Омж, сталь электротехническая,  $g \gg 0,2 \times 10^7$  1/Омж, внешний радиус дисков  $R=R_2$ ;

в) рабочая частота  $f=2$  кГц, относительный декремент затухания  $d=0,25$ .

Вначале оценим корни дисперсионного уравнения (6). Графическая иллюстрация образа интегрального преобразования Фурье–Бесселя для функции радиального распределения возбуждающего тока в первичной обмотке дана на рис. 2,а.

Результаты расчётов индуцированных токов приведены на рис. 3 и 4.

Проведенные расчёты индуцированных токов в рассматриваемой конструкции согласующего устройства имеют большое практическое значение, а именно:

дисковая конструкция импульсного трансформатора тока как согласующего устройства представляется весьма перспективной и эффективной, что иллюстрируется рис. 4;

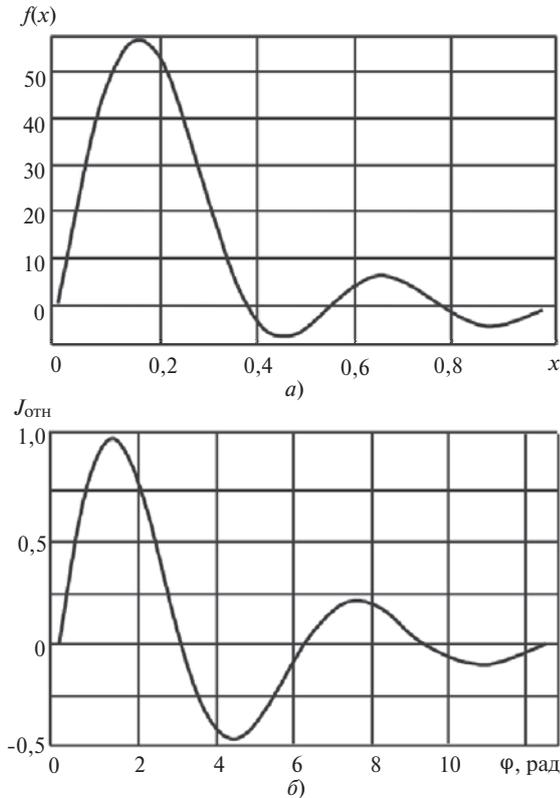


Рис. 2. Ток в первичной обмотке; а – образ интегрального преобразования Фурье–Бесселя для функции радиального распределения возбуждающего тока; б – то же график в относительных величинах относительно  $J_{1\text{отн}} = \frac{J_1(j)}{J_{1m}}$ ,  $j = w\tau$ - фаза

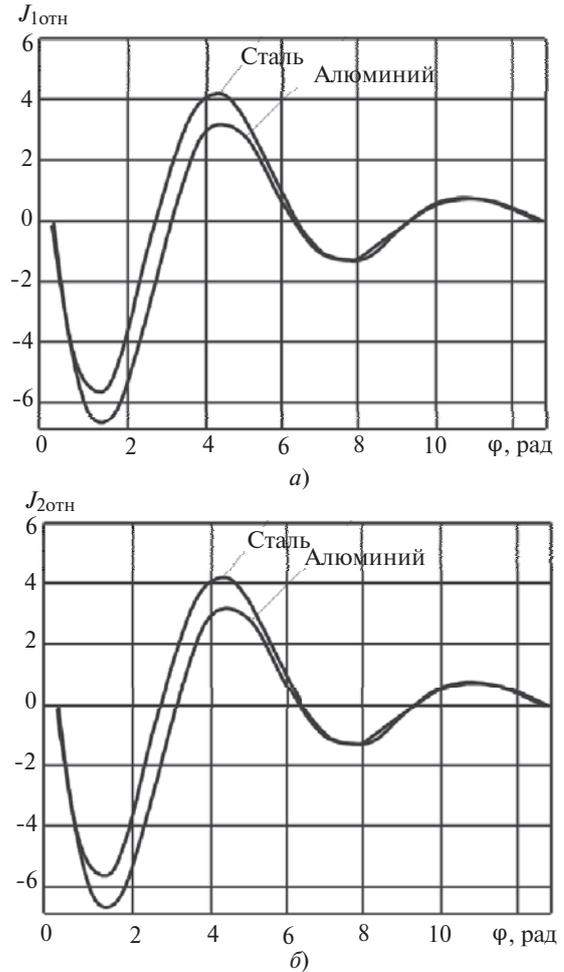


Рис. 3. График относительного тока, индуцированного в одном диске  $J_{2\text{отн}} = \frac{J_2(j)}{J_{1m}}$ ,  $j = w\tau$ - фаза; а – толщина дисков одинакова  $d = 0,005$  м; б – толщина алюминиевого диска  $d = 0,005$  м, толщина стального диска равна эффективной глубине проникновения поля  $d \gg 0,008$  м

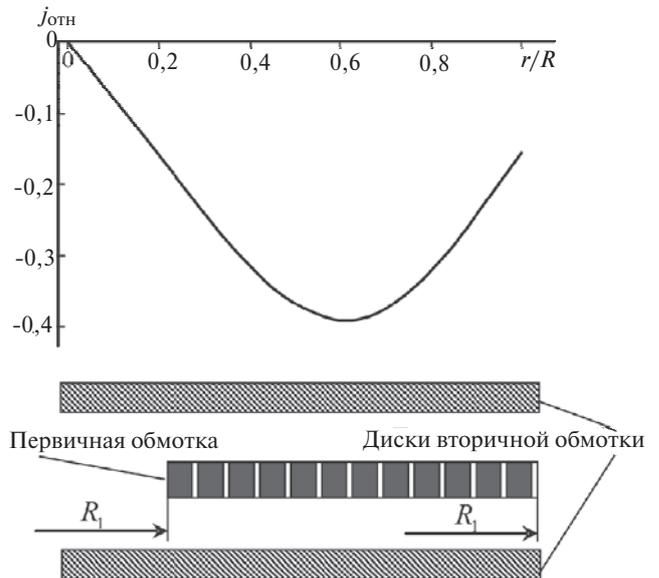


Рис. 4. Радиальное распределение относительной плотности тока, индуцированного в металлическом диске (отношение к максимуму плотности тока первичной обмотки)

полученные результаты распределения индуцированных токов во вторичной обмотке показывают наиболее эффективное место их токосъема (окружность по центру первичной обмотки);

выбирая металл для вторичной обмотки и варьируя его толщину, можно подобрать необходимые временные и амплитудные характеристики индуцированного в нем тока;

полученные результаты позволяют дать некоторые рекомендации о диапазонах выбора параметров импульсного трансформатора тока: число витков в первичной обмотке  $w = 10, 20$ ; расстояние от витка индуктора  $h = 0,0025, 0,005$  м; внутренний и внешний радиусы дисков  $R_1 = 0,015$  м,  $R_2 = 0,075$  м соответственно; электропроводность металла дисков вторичной обмотки  $g \gg (0,2, 3,75) \cdot 10^7$  1/Ом·ж.

**Выводы.** 1. Проведен расчет электродинамических процессов в согласующем устройстве «дискового» типа, вычислен коэффициент трансформации тока, максимальное значение которого может достигать 12–13.

2. В рассматриваемом согласующем устройстве диски соединены параллельно, следовательно полный ток в индукторе будет равен сумме токов в каждом диске.

3. Численные оценки показали, что при уменьшении проводимости и толщины дисков снижается значение коэффициента трансформации и искажается временная зависимость тока во вторичной обмотке.

4. В согласующем устройстве с толщиной дисков, близкой к значению скин-слоя, искажения временных и амплитудных параметров исчезают.

5. Наиболее эффективным местом токосъема со вторичной обмотки является окружность по центру первичной обмотки согласующего устройства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Шиголева С.А. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора. — Электричество, 2011, № 4.

2. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий, т. 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография. — Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2009.

3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий, т. 1. Изд. второе, переработ. и доп./Под общей ред. Ю.В. Батыгина. — Харьков: Изд-во МОСТ-Торнадо, 2003.

4. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. — Харьков: Вища школа, 1977.

5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. — М.: Мир, 1972.

6. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. — Л.: Энергия, 1971.

7. Pat. 2008/0163661 U.S. A1. Dent removing method and device/Meichtry et al. Pub. Date: 10 Jul, 2008.

8. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Цилиндрический виток индуктора с разрезом как инструмент для магнитно-импульсной обработки металлов. — Электричество, 2011, № 12.

9. Мэттьюс Дж., Уокер Р. Математические методы физики. — М.: Атомиздат, 1978.

[12.12.12]

*Авторы: Батыгин Юрий Викторович в 1972 г. окончил инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ). Докторскую диссертацию по специальности «Техника сильных электрических и магнитных полей» защитил в Национальном техническом университете «ХПИ» в 1994 г. Заведующий кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ).*

*Гнатов Андрей Викторович в 1998 г. окончил факультет энергетического и специального обеспечения Харьковского военного университета (ХВУ). Кандидатскую диссертацию по специальности «Вооружение и военная техника» защитил в ХВУ в 2004 г. Доцент кафедры физики ХНАДУ.*

*Трунова Ирина Сергеевна в 2008 г. окончила факультет электрических систем и комплексов транспортных средств ХНАДУ. Аспирант кафедры автомобильной электроники ХНАДУ.*