

УДК 621.318.4

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В МАССИВНЫХ ПРОВОДНИКАХ ПОЛЕМ ВИТКА С РАЗРЕЗОМ – СИЛОВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ИНСТРУМЕНТА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

А.В. Гнатов, проф. д.т.н., Щ.В. Аргун, ст. преподаватель, к.т.н.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Представлены экспериментальные исследования распределения вихревых токов, возбуждаемых полем плоского кругового витка с разрезом в индукторных системах с немагнитными идеально проводящими металлами. Получены зависимости радиального распределения индуцированного тока. Проведено сопоставление с расчетными данными.

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная рихтовка, индукторная система, напряжённость магнитного поля, электромагнитные процессы, индуцированный ток, вихревые токи.

## ЗБУДЖЕННЯ ВИХРОВИХ СТРУМІВ У МАСИВНИХ ПРОВІДНИКАХ ПОЛЕМ ВИТКА З РОЗРІЗОМ – СИЛОВИМ ЕЛЕМЕНТОМ ІНСТРУМЕНТУ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ

А.В. Гнатов, проф., д.т.н., Щ.В. Аргун, ст. викладач, к.т.н.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Подано експериментальні дослідження розподілу вихрових струмів, що збуджуються полем плоского кругового витка з розрізом в індукторних системах із немагнітними металами, які є ідеальними провідниками. Отримано залежності радіального розподілу індукованого струму. Проведено зіставлення з розрахунковими даними.

*Ключові слова:* магнітно-імпульсне рихтування, індукторна система, напруженість магнітного поля, електромагнітні процеси, індукований струм, вихрові струми.

## EXCITING OF THE VORTICAL CURRENTS IN THE MASSIVE CONDUCTORS ARE BY THE FIELD OF A COIL WITH THE SLIT – THE POWER ELEMENT OF THE TOOL OF THE MAGNETIC-PULSE STRAIGHTENING

A. Hnatov, Prof., Ph. D. (Eng.), Sch. Argun, Ph. D. (Eng.), senior teacher,  
Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* This article contains the description of experimental researches of spatial distribution of vortical currents induced by the field of flat circular coil in inductor systems with nonmagnetic metal objects having perfect conductivity. The experimental dependences of the induced current have been obtained. These dependences are compared with the calculation data.

*Key words:* magnetic pulse straightening, inductor system, intensity of a magnetic field, the electromagnetic processes, the induced current, the vortical currents.

### Введение

С каждым годом в мире огромными темпами растет количество автомобилей. Но, вместе с этим, растет и количество ДТП, в которых в

той или иной степени повреждаются панели кузовных элементов автомобилей. Также появление вмятин на кузовах автотранспортных средств может быть вызвано и рядом других причин, например, градом, неудачной

парковкой, камнями из-под колёс впереди идущих машин. Поэтому операции, связанные с ремонтом и реставрацией кузовных панелей автомобилей, являются весьма актуальными и пользуются все большим спросом [1, 2].

Магнитно-импульсные комплексы (системы) для рихтовки и восстановления корпусных и кузовных элементов транспортных средств состоят из двух основных частей: источника мощности – магнитно-импульсной установки и инструмента – индукторной системы. Источник мощности обеспечивает генерацию необходимого токового импульса в инструмент, который, в свою очередь, выполняет необходимую ремонтную операцию [2–5].

### Анализ публикаций

Широко распространённые инструменты магнитно-импульсной рихтовки (магнитно-импульсной обработки металлов) – это плоские одновитковые соленоиды. В известных публикациях по электродинамическим расчётам последние представляются замкнутыми круговыми контурами, что позволяет ввести условие аксиальной симметрии и существенно упростить решение задачи о поле изолированного витка на поверхности металлического объекта (это может быть и проводящее полупространство, и тонкая пластина) [6].

В реальности виток не является замкнутым круговым контуром, т.к. он последовательно включается в цепь источника мощности. Т.е. в качестве инструмента магнитно-импульсного метода используется виток с разрезом или разомкнутый виток. Очевидно, что нарушение аксиальной симметрии формы источника поля (индуктора) ведёт к искажению силового воздействия на обрабатываемый объект. Это может объяснить многие неудачи при применении электромагнитных полей для решения насущных технологических задач.

Теоретическому анализу электромагнитных процессов в индукторной системе с разомкнутым витком, расположенным над поверхностью идеально проводящего металла, посвящены работы [7, 8]. Здесь выполнено аналитическое решение соответствующей электродинамической задачи классическим методом, проведены численные оценки, построены наглядные графические зависимо-

сти, иллюстрирующие влияние разреза в витке на распределение возбуждаемых полей и токов.

Однако любые теоретические исследования должны экспериментально апробироваться на предмет адекватности описываемым процессам. Степень достоверности полученных результатов устанавливается измерениями основных характеристик исследуемых явлений.

Расчётная модель рассматриваемой системы с идеально проводящим металлом (массивным проводником), в соответствии с работами [7, 8], и её физическая реализация представлены на рис. 1, где  $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$  – направляющие орты координат в выбранной цилиндрической системе координат. Аналогичные вопросы рассматривались авторами [9], где на основе сформулированной краевой задачи расчета магнитного поля представлено решение в виде поля исходного контура с током и его зеркального отражения относительно границы раздела сред.

### Цель и постановка задачи

Целью работы являются экспериментальные исследования пространственного распределения вихревых токов, возбуждаемых полем плоского разомкнутого кругового витка в индукторных системах – инструментах магнитно-импульсной рихтовки с немагнитными идеально проводящими металлами.

### Виток с разрезом – инструмент магнитно-импульсной рихтовки

Схема эксперимента представлена на рис. 2, где а – виток индуктора без разреза; б – виток индуктора с разрезом  $90^\circ$ . Токопроводы подключения электрических выводов генератора токовых импульсов к виткам перпендикулярны к их плоскости. На схеме показаны выделенные линии, вдоль которых с помощью датчиков индукционного типа проводились измерения тангенциальной и азимутальной составляющих напряжённости магнитного поля (взаимно перпендикулярные оси – ХХ и УУ) [2, 10, 11]. Датчики данного типа традиционно используются в измерениях импульсных полей и токов. Их конструктивные особенности, обоснование достоверности и практическая апробация подробно описаны авторами научных изданий [12, 13].

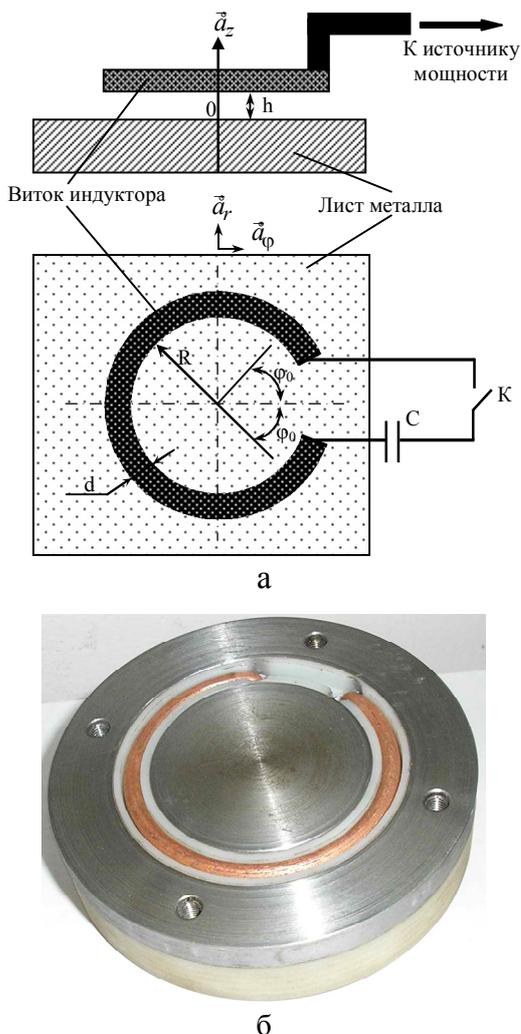


Рис. 1. Плоский незамкнутый виток над массивным металлическим листом: а – расчетная модель; б – физическая модель

Импульсы тока от генератора подводились через токопроводы (медная шина, сечением  $2 \text{ мм}^2$ ), расположенные под углом  $90^\circ$  к плоскости витка индуктора. Токопроводы соединялись с витком индуктора в области разреза, т.е. параметры разрядного контура состояли из собственных параметров генератора и индуктора с разрезом с подсоединенными к нему токопроводами.

В качестве идеально проводящего объекта была взята медная пластина толщиной  $d \approx 0,01 \text{ м}$ . Расстояние от витка до её плоскости составляло  $h \approx 0,0025 \text{ м}$ . При рабочей частоте  $f \approx 30 \text{ кГц}$  эффективная глубина проникновения поля будет равна  $\Delta \approx 0,000375 \text{ м}$ . Если учесть эту величину в качестве поправки к расстоянию между витком и пластиной  $(h + \Delta) \approx 0,002875 \text{ м}$ , то металл последней можно считать идеально проводящим.

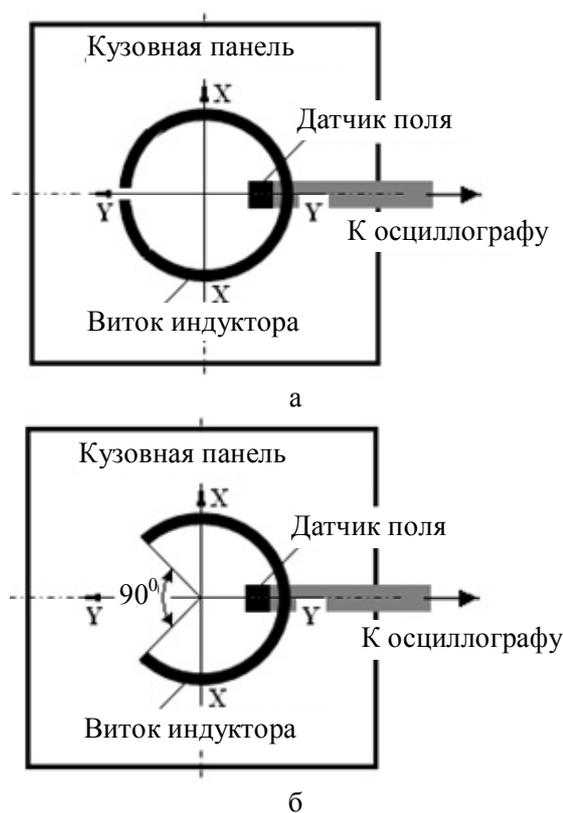


Рис. 2. Схема эксперимента, токопроводы подключения витков к генератору токовых импульсов перпендикулярны к их плоскости: а – виток индуктора без разреза; б – виток индуктора с разрезом ( $90^\circ$ )



Рис. 3. Внешний вид комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов

В этом случае на поверхности объекта исследования (медной пластины) тангенциальная составляющая модуля вектора напряжённости магнитного поля будет равна модулю вектора плотности азимутальной компоненты индуцированного тока. А модуль азимутальной составляющей вектора напряжённости будет равен радиальной компоненте вектора плотности возбуждаемого

тока. В полярной системе координат, привязанной в исследуемой индукторной системе, это означает, что  $H_r \approx j_\varphi$  и  $H_\varphi \approx j_r$ .

Типичная осциллограмма тока измеряемого сигнала, индуцированного в металле медной пластины, показана на рис. 4.

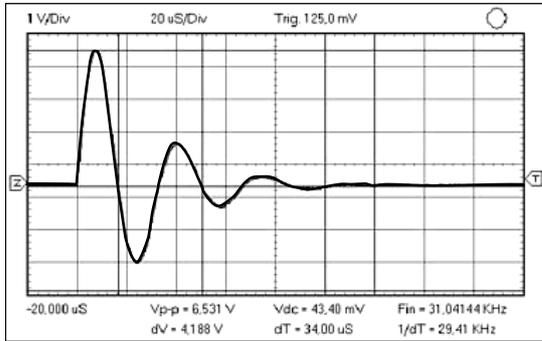
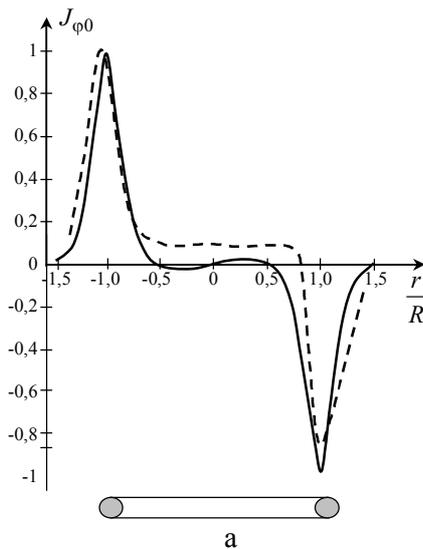


Рис. 4. Осциллограмма измеряемого сигнала тока

Для обработки результатов измерений выпишем из работы [2] необходимые зависимости для компонент вектора плотности индуцированного тока:

а) азимутальная составляющая, нормированная на максимум

$$j_{\varphi\text{-отн}}\left(\frac{r}{R}, \varphi\right) = \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\varphi_0) \cos(n\varphi) \times$$



а

$$\times \left[ \int_0^{\infty} f_n(x) \left( J_{n-1}\left(x \frac{r}{R}\right) - J_{n+1}\left(x \frac{r}{R}\right) \right) e^{-x \frac{h}{R}} dx \right]; \quad (1)$$

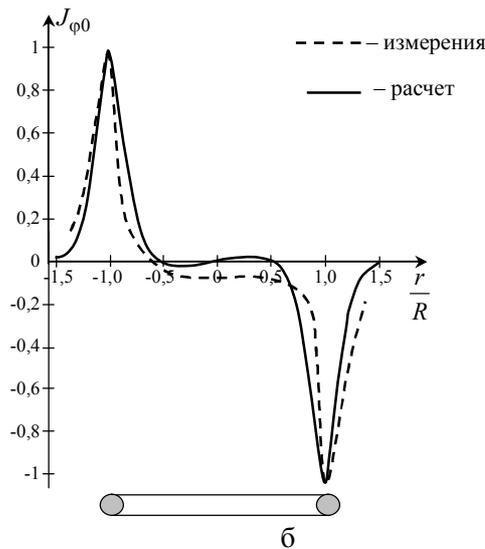
б) радиальная составляющая, нормированная на максимум

$$j_{r\text{-отн}}\left(\frac{r}{R}, \varphi\right) = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot F_n(\varphi_0) \cdot \sin(n\varphi) \times \left[ \int_0^{\infty} f_n(x) \cdot \frac{J_n\left(x \frac{r}{R}\right)}{\left(\frac{r}{R}\right)} \cdot \frac{e^{-x \frac{h}{R}}}{x} dx \right], \quad (2)$$

$$\text{где } F_n(\varphi_0) = \begin{cases} \left( -\frac{2 \cdot \sin(n \cdot \varphi_0)}{\pi \cdot n} \right), & n \neq 0, \\ \left( 1 - \frac{\varphi_0}{\pi} \right), & n = 0, \end{cases}$$

$$f_n(x) = \frac{x}{4} \cdot [J_{n-1}(x) - J_{n+1}(x)].$$

Результаты измерений и расчётные данные, вычисленные с помощью формул (1) и (2), оформленные в виде графических зависимостей в относительных единицах с нормировкой на соответствующие максимумы, представлены на рис. 5–7.



б

Рис. 5. Радиальные распределения азимутальной составляющей тока, индуцированного в металле массивного медного образца, вдоль оси ХХ: а – виток индуктора без разреза; б – виток индуктора с разрезом 90°

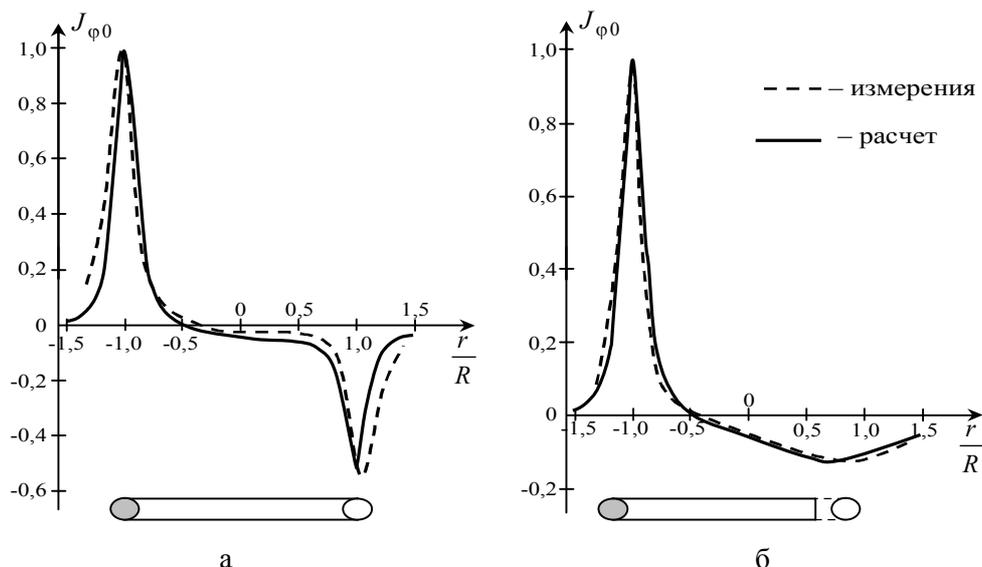


Рис. 6. Радиальные распределения азимутальной составляющей тока, индуцированного в металле массивного медного образца, вдоль оси  $Y\bar{Y}$ : а – виток индуктора без разреза; б – виток индуктора с разрезом  $90^\circ$

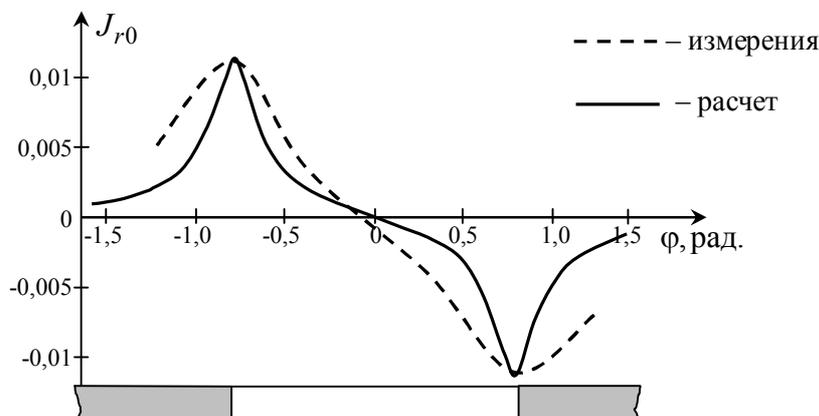


Рис. 7. Азимутальное распределение радиальной составляющей тока, индуцированного в металле массивного медного образца, витком с разрезом  $90^\circ$

Анализ полученных результатов показал:

- в зоне под разрезом в области витка наблюдаются существенное нарушение однородности пространственного распределения плотности индуцированных токов (очевидно из сравнения  $j_{\varphi 0}$  в зоне разреза и вне его) и снижение их амплитудных значений. Это делает недопустимым приближение аксиальной симметрии в расчётах одновитковых индукторных систем;
- нарушение аксиальной симметрии (виток с разрезом) есть причина появления радиальной составляющей индуцированного тока. Пространственные максимумы радиальных токов располагаются вблизи краёв разреза в витке и имеют разные знаки, что говорит об их протекании в противоположных направлениях;

– в целом, сравнение графиков различных компонент вектора плотности индуцированных токов показывает, что пространственная форма полного индуцированного тока формируется, в основном, вкладом азимутальной составляющей.

### Выводы

Проведены экспериментальные исследования пространственного распределения вихревых токов, возбуждаемых полем плоского разомкнутого кругового витка в индукторных системах – инструментах магнитно-импульсной рихтовки с немагнитными идеально проводящими металлами.

Проведенные исследования показали, что:

в зоне под разрезом в области витка наблюдается существенное нарушение однородности пространственного распределения плотности индуцированных токов, делающее недопустимым аксиальное приближение в расчётах одновитковых индукторных систем для магнитно-импульсной обработки металлов; интегральная величина вектора плотности индуцированного тока формируется, в основном, вкладом его азимутальной составляющей.

### Литература

1. Кузовные работы: пособие по самостоятельному ремонту. Цветные фотографии. – Днепропетровск: Монолит, 2011. – 164 с.
2. Гнатов А.В. Научные основы восстановления кузовных панелей автомобилей методами внешней бесконтактной рихтовки: дисс. ... доктора техн. наук : 05.22.20 / Гнатов Андрей Викторович. – Х., 2014. – 391 с.
3. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий: монография. Т. 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. Аргун Щ.В. Особенности в работе источника мощности – генератора многократных токовых импульсов / Щ.В. Аргун // *Электротехника і електромеханіка: наук.-практ. журнал.* – 2013. – № 2. – С. 48–51.
5. Аргун Щ.В. Магнітно-імпульсні установки – джерела потужності у технологіях з використанням енергії електромагнітних полів / Щ.В. Аргун // *Вісник НТУ «ХП»: зб. наук. пр.* – 2013. – № 30 (1003). – С. 100–106.
6. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 1 / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хищенко; под ред. проф. Ю.В. Батыгина. – 2-е изд. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
7. Батыгин Ю.В. Цилиндрический виток индуктора с разрезом как инструмент для магнитно-импульсной обработки металлов / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // *Электричество.* – 2011. – № 12. – С. 53–59.
8. Батыгин Ю.В. Цилиндрический виток конечной ширины с разрезом над идеально проводящим массивным проводником / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов // *Электротехника і електромеханіка: наук.-практ. журнал.* – 2011. – № 2. – С. 56–60.
9. Васецкий Ю.М. К определению магнитного поля контура с током над плоской поверхностью идеально проводящего тела / Ю.М. Васецкий, Д.И. Власов // *Технічна електродинаміка.* – 2012. – № 2. – С. 9–10.
10. Батыгин Ю.В. Экспериментальные исследования процессов возбуждения вихревых токов в массивных проводниках полем «разомкнутого» витка / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин и др. // *Авиационно-космическая техника и технологии «ХАИ».* – 2012. – № 2/89. – С. 18–22.
11. Батыгин Ю.В. Экспериментальное исследование вихревых токов, возбуждаемых в металлической пластине полем витка с разрезом / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин и др. // *Сборник научных трудов Харьковського нац. аерокосмічного ун-та «ХАИ».* – 2012. – Вып. 1 (69). – С. 112–122.
12. Батыгин Ю.В. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. Т.2. / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2002. – 284 с.
13. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 392 с.
14. Бондаренко А.Ю. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования / А.Ю. Бондаренко, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплыгин // *Электротехника і електромеханіка: наук.-практ. журнал.* – 2007. – № 6. – С. 66–69.
15. Лаборатория электромагнитных технологий [Электронный ресурс] – 2015. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com>.

Рецензент: Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2015 г.