

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

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С НЕМАГНИТНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

svetlana11177@rambler.ru

Проведен анализ электродинамических процессов в индукционной индукторной системе, состоящей из идентичных листовых немагнитных металлов, с определением основных компонент возбуждаемых сил Лоренца и сил притяжения – Ампера. Определены аналитические выражения для расчета возбуждаемых усилий. Полученные результаты проиллюстрированы численными оценками для реальных ситуаций в практике МИОМ (магнитно-импульсной обработки металлов).

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная рихтовка, индукторная система, силы Ампера, электромагнитные процессы, индуктор, силы притяжения, немагнитные металлы.

**Постановка проблемы.** В настоящее время все больший интерес вызывают магнитно-импульсные технологии. Наиболее ярким подтверждением этому – внешняя бесконтактная магнитно-импульсная рихтовка корпусов самолётов и автомобильных кузовов. Данная производственная операция привлекательна тем, что позволяет производить устранение вмятин с помощью силового воздействия извне без разборки корпуса или кузова и нарушения существующего защитного покрытия [1–4]. Однако при магнитно-импульсной рихтовке возбуждаются как притягивающие, так и отталкивающие усилия, что объясняется их различной физической природой: отталкивание – силы Лоренца; притяжение – силы, обусловленные законом Ампера и силы, обусловленные магнитными свойствами обрабатываемого металла [1, 2].

Возникает необходимость в анализе и оценке всех возбуждаемых усилий, что позволит задаться необходимыми как электродинамическими, так и конструктивными параметрами инструмента, которые позволят провести эффективно операцию рихтовки.

Технологическое оборудование, в которое входят и инструменты внешней рихтовки, а также технологическая оснастка достаточно подробно описана в работах [3–7]. Особый интерес представляют инструменты, позволяющие производить рихтовку, как ферромагнитных, так и неферромагнитных листовых металлов. К таким инструментам относятся различные конструкции индукционных индукторных систем (ИИС).

**Анализ основных достижений и публикаций.** Название «индукционная индукторная система» было предложено авторами этого изобретения [8–11]. Оно, по их мнению, отражает принцип действия, в основе которого лежат индукционные эффекты (закон электромагнитной индукции) и явление силового взаимодействия индуцированных токов (закон Ампера).

Принцип действия ИИС основан на законе Ампера, по которому проводники с коллинеарными одинаково направленными токами притягиваются друг к другу. В отличие от индукторных систем, основанных на естественном притяжении ферромагнетиков при понижении рабочих частот действующих полей, ИИС представляют собой техническое решение. Здесь, помимо собственно индуктора-источника магнитного поля и листовой заготовки, вводится дополнительный конструктивный элемент. Это, так называемый, дополнительный или вспомогательный экран. Он располагается параллельно и симметрично относительно плоскости индуктора и обрабатываемого листового металла [1, 2, 8–13].

**Цель работы** – исследование электродинамических процессов в индукционной индукторной системе, состоящей из идентичных листовых немагнитных металлов, с определением основных компонент возбуждаемых сил Лоренца и сил притяжения – Ампера.

### РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Расчётную модель в цилиндрической системе координат ИИС представлена на (рис. 1), где  $\vec{e}_r$ ,  $\vec{e}_\varphi$ ,  $\vec{e}_z$  – направляющие орты [12–14].

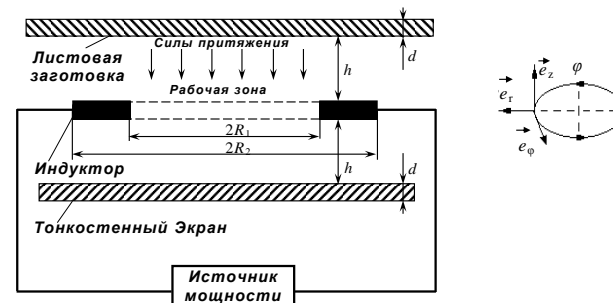


Рис. 1. Расчётная модель индукционной индукторной системы

Не останавливаясь на математических операциях по решению уравнений Максвелла, составленных для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ( $E_\varphi \neq 0$ ,  $H_{r,z} \neq 0$ ),

перепишем из авторской работы [14] полученные аналитические выражения для нормальной

и тангенциальной компоненты силы Лоренца, возбуждаемой в данной ИИС.

Нормальная компонента силы:

$$F_{L\perp}(\varphi, r) = F_{Lm}(\varphi) \cdot \int_0^d I_1(r, \zeta) \cdot I_2(r, \zeta) d\zeta, \quad (1)$$

где  $F_{Lm}(\varphi) = \left(\frac{\omega\tau}{2d}\right) \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot j_m^2 \cdot \left(j(\varphi) \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi}\right)$ ,

$$I_1(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_1(x) \cdot \left( sh\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} ch\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) \right) \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx,$$

$$\Phi_1(x) = \frac{F(x)}{x^2 \cdot \left( sh(x) \left[ sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)},$$

$$I_2(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_2(x) \cdot \left( ch\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} sh\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) \right) \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx,$$

$$\Phi_2(x) = \frac{F(x)}{x \cdot \left( sh(x) \left[ sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)}.$$

Тангенциальная компонента силы:

$$F_{L\parallel}(\varphi, r) = F_{Lm}(\varphi) \cdot \int_0^d I_1(r, \zeta) \cdot I_3(r, \zeta) d\zeta, \quad (2)$$

где

$$I_3(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_2(x) \cdot \left( sh\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} ch\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) \right) \cdot J_0\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx$$

Силы притяжения в рассматриваемой ИИС – это сила притяжения листовой заготовки, обусловленная действием вспомогательного экрана (взаимное притяжение проводников с индуцированными токами), и сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами металла собственно заготовки.

Дальнейшее рассмотрение проведем только для первой силы – силы притяжения Ампера. Анализ силы притяжения, обусловленной магнитными свойствами металла заготовки, будут рассмотрены в следующих публикациях.

Силы притяжения листовых металлов с индуцированными токами в соответствии с зако-

ном Ампера описываются зависимостью [13, 15]:

$$F_A(t, r) = \frac{\mu_0}{2} \cdot J_\varphi^2(t, r) \cdot \frac{r}{h}. \quad (3)$$

С помощью аналитических выражений, найденных в [14], приведём зависимость (3) к виду, удобному для вычислений.

После необходимых преобразований записываем, что

$$F_A(\varphi, r) = F_{Am}(\varphi) \cdot \left( \int_0^\infty \Phi_3(x) \cdot J_1\left(x \frac{r}{d}\right) \cdot dx \right)^2, \quad (4)$$

где  $F_{Am}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{r}{h} \cdot \left( j_m \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{(\omega \cdot \tau)}{2} \right)^2$ ,

$$\Phi_3(x) = \frac{F(x) \cdot \left( (1 - ch(x)) - \frac{1}{\mu_r} \cdot sh(x) \right)}{x^3 \cdot \left( sh(x) \cdot \left[ sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \frac{h}{d}} \cdot ch(x) \right)}$$

### ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Проведем вычисления сил для немагнитных металлов, (рис. 2 – 7).

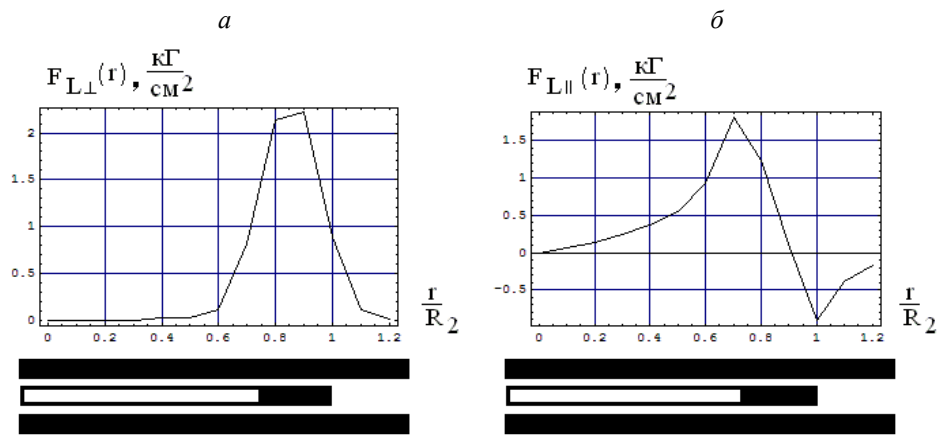


Рис. 2. Радиальные распределения компонент сил Лоренца в собственном временном максимуме для немагнитных металлов,  $\mu_r=1$ , а – нормальная z-составляющая, б – тангенциальная  $\gamma$ -составляющая

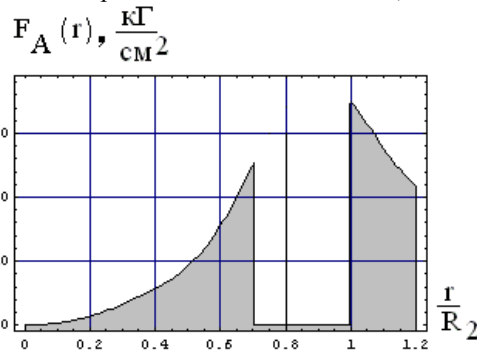


Рис. 3. Радиальное распределение силы притяжения – Ампера в собственном временном максимуме для немагнитных металлов,  $\mu_r=1$

Вычисления для немагнитного экрана и листовой заготовки показали, что:

- возбуждаемые силы любой природы (силы Лоренца и силы Ампера) концентрируются в зоне под витком индуктора;

- под центром витка направление тангенциальных сил Лоренца изменяется на противоположное;
- силы притяжения Ампера знакопостоянны в течение всего импульса силы, их действие во времени имеет кумулятивный характер;

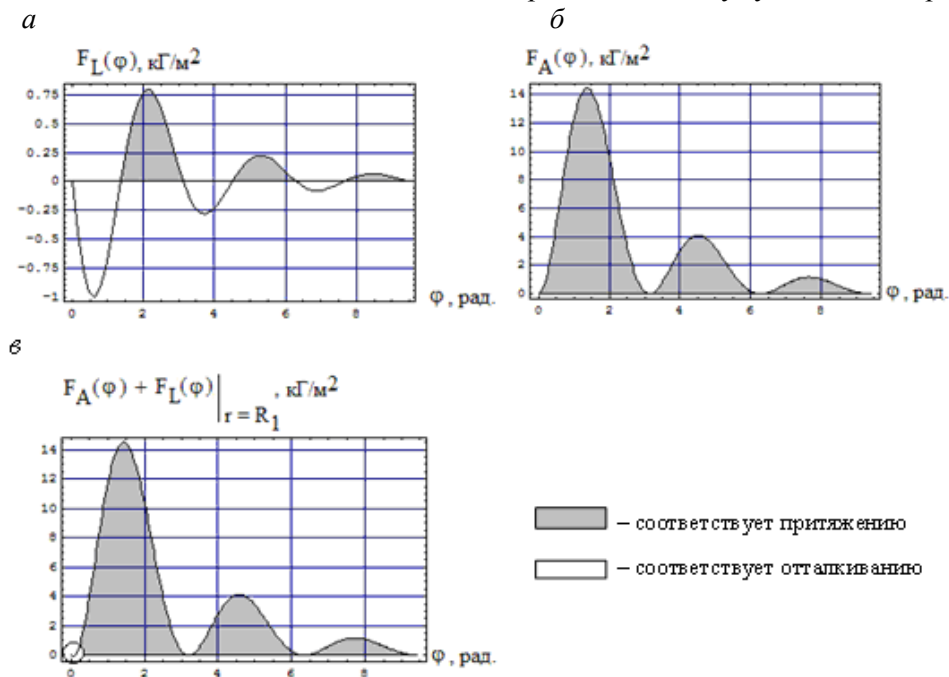


Рис. 4. Фазовые зависимости возбуждаемых сил в абсолютных единицах для  $r = R_1$ : а – нормальная компонента силы Лоренца; б – сила притяжения – Ампера; в – сумма действующих сил

• силы Лоренца имеют осциллирующий характер, их интегральное действие во времени стремится к нулю,

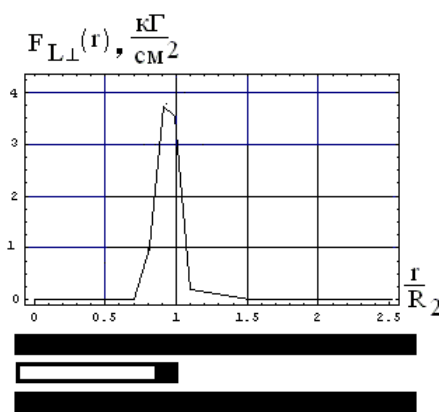
$$\int_0^{\infty} F(\varphi) d\varphi \Rightarrow \int_0^{\infty} j(\varphi) \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} d\varphi = \frac{j^2(\varphi)}{2} \Big|_0^{\infty} = 0;$$

• амплитуды сил притяжения Ампера значительно выше амплитуд сил Лоренца (как нормальных, так и тангенциальных компонент), последние не могут оказать существенного влияния на пространственные (радиальные) распределения усилий, действующих на металл заготовки;

• искажение фазовой зависимости сил притяжения за счёт влияния сил Лоренца весьма незначительно и проявляется лишь в начальной стадии процесса (рис. 4, в отмечено кружком).

Анализ радиального распределения сил притяжения Ампера позволяет выделить на по-

а



верхности листовой заготовки область, где их действие будет наиболее эффективным.

Как следует из (рис. 3) зависимость от радиуса имеет нарастающий характер для  $r \in [0, R_1]$ , для  $r \in [R_1, R_2]$ , провал, обусловленный экранированием металлом витка токов, индуцированных в экране и заготовке, и, наконец, для  $r \geq R_2$  радиальное распределение ниспадает, но достаточно медленно. Как показывают оценки, в интервале  $r \in [R_2, 2.5 \cdot R_2]$  амплитуда сил притяжения снижается до 25% от максимума. Это означает, что рабочей зоной рассматриваемой индукторной системы может быть область  $r \in [0, 2.5 \cdot R_2]$ . Провал под индуктором можно уменьшить, если уменьшить ширину витка.

Результаты расчёта сил, возбуждаемых тонким витком, приведены ниже.

б

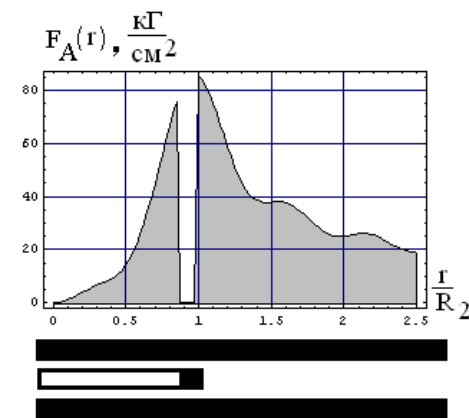


Рис. 5. Радиальные распределения временных максимумов сил, возбуждаемых в системе с тонким витком,  $R_1 = 0.03$  м,  $R_2 = 0.035$  м, а – сила Лоренца, б – сила притяжения Ампера

Из приведенных зависимостей следует, что при уменьшении ширины витка растут амплитуды возбуждаемых сил, почти в  $\sim 2,5$  раза по сравнению с прежним индуктором ( $R_1 = 0.025$  м и  $R_2 = 0.035$  м). Силы Ампера остаются преобладающими, их среднее значение на интервале  $r \in [0, 2.5 \cdot R_2]$  составляет  $\sim 29$  кГ/см<sup>2</sup>, что более чем в  $\sim 7$  раз превышает амплитудное значение сил Лоренца. Тем не менее, с силой  $F_{L\perp} \approx 4$  кГ/см<sup>2</sup> следует считаться. Результатом её действия может оказаться некоторое искажение формы притягиваемого участка листовой заготовки.

Проведём вычисления для практически интересного случая, когда экран и заготовка выполнены из листового алюминия и с удельной электропроводностью –  $\gamma = 3.75 \cdot 10^7$  1/Ом·м и толщиной –  $d = 0,00035$  м. При рабочей частоте  $f = 0,3$  кГц условие тонкостенности – выполняется до-

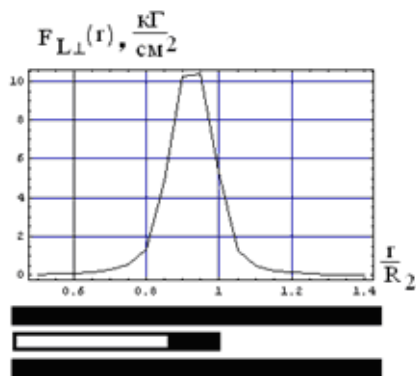
статочно строго,  $\omega \cdot \tau = 0.01 \ll 1$ . Результаты расчёта приведены ниже.

Как следует из проведенных вычислений, в случае алюминиевых экрана и заготовки амплитуды сил притяжения Ампера более чем в  $\sim 2$  раза выше, чем в случае, когда последние выполнены из немагнитной стали. Этот факт объясняется более высокой удельной электропроводностью алюминия.

Соотношение между амплитудами сил Ампера и сил Лоренца практически сохраняется таким же, как и ранее и соответствует показателю в  $\sim 20$  раз. Но абсолютную величину  $F_{L\perp} \approx 10$  кГ/см<sup>2</sup> необходимо принять во внимание. Её действие может исказить форму притягиваемого участка заготовки в области витка индуктора. Очевидно, что для снижения влияния сил Лоренца следует перейти к более малым токам в индукторе. Безусловно, это приведёт к снижению эффективности притяжения, но в то

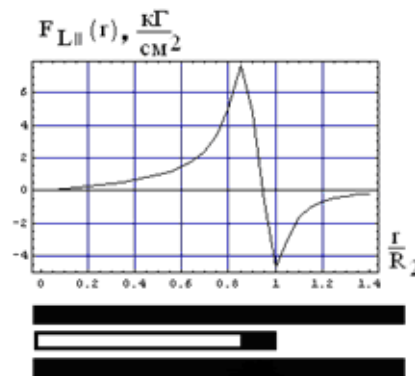
же время существенно снизит действие сил Ло-

а



ренца.

б



в

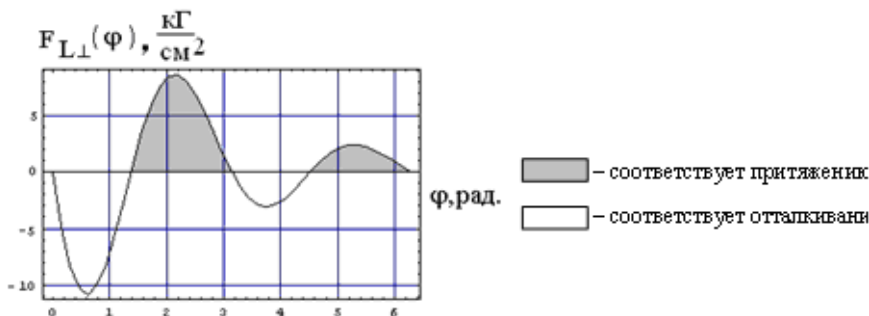


Рис. 6. Графические зависимости для сил Лоренца:

а – радиальное распределение нормальной компоненты; б – радиальное распределение тангенциальной компоненты; в – фазовая зависимость силы Лоренца для  $r = R_1$

Примечание. Пространственные зависимости даны для временного максимума силы.

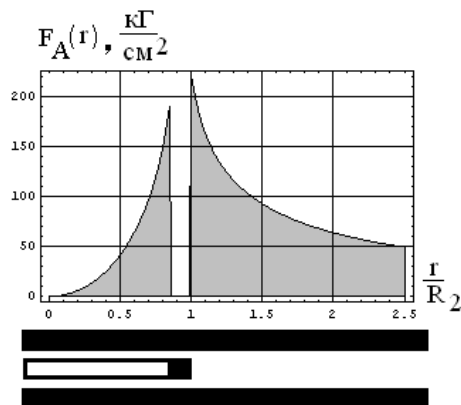


Рис. 7. Радиальное распределение силы притяжения Ампера во временном максимуме

### ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ электродинамических процессов в индукционной индукторной системе, состоящей из идентичных листовых немагнитных металлов, с определением основных компонент возбуждаемых сил Лоренца и сил притяжения – Ампера.

2. Получены аналитические выражения для возбуждаемых усилий в рассматриваемой индукционной индукторной системе.

3. Построены графические зависимости радиального распределения компонент сил Лоренца и сил притяжения Ампера.

4. Определено, что при уменьшении ширины витка растут амплитуды возбуждаемых сил, почти в 2.5 раза по сравнению с первоначальным индуктором. Силы Ампера остаются преобладающими, их среднее значение на интервале  $r \in [0, 2.5 \cdot R_2]$  составляет  $\sim 29 \text{ кГ/см}^2$ , что более чем в 7 раз превышает амплитудное значение сил Лоренца.

### 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. – Х. : ХНАДУ, 2009 – 240 с.
2. Гнатов А. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография / А. В. Гнатов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
3. Гнатов А. В. Прогрессивные магнитно-импульсные технологии на транспорте / А. В. Гнатов // Науковий вісник. – Херсон :

ХДМІ. – 2011.– № 1(4). – С. 147–156.

4. Новые технологии в рихтовке поврежденных элементов корпусов автотранспортных средств без их разборки и демонтажа : сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Том 1. [«Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2011»], (Одесса, 21-30 июня 2011 г.) / Ю. В. Батыгин А. В. Гнатов, Е. А. Чаплыгин. – Одесса : Транспорт. 2011. – 82 с. – С. 58–69.

5. Батыгин Ю. В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Электричество. – М., 2011. – № 4. – С. 55–62.

6. Бесконтактная внешняя магнитно-импульсная рихтовка автомобильных кузовов. Сборник трудов XV международной научно-технической конференция [«Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы.»], (Севастополь, 10-17 сентября 2012 г.) / А. В. Гнатов – Севастополь : Вестник СевНТУ, 2012. – В. 134. – С. 131–134.

7. Экспериментальный комплекс для бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки корпусных элементов транспортных средств. Міжнародна всеукраїнська науково-практична конференція [«Сучасні енергетичні усунування на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» СЕУТТОО – 2012]. (Херсон, Україна 10 – 12 жовтня 2012 р.) / А. В. Гнатов. – Херсон: Херсонський державний морський інститут, 2012. – 280с. – С. 14–19.

8. Чаплыгин Е. А. Разработка цилиндрических индукционных индукторных систем для магнитно-импульсного притяжения тонких металлических листов: дисс. ... кандидата техн. наук : 05.09.13 /Чаплыгин Евгений Александрович. – Харьков, 2009. – 169 с.

9. Батыгин Ю. В. Эксперименты с индукционными индукторными системами для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, Т. Т. Черногор // Электротехніка і електромеханіка. – Харків, 2008. – № 6. – С. 64–67.

10. Батыгин Ю. В. Электродинамические процессы в индукционной индукторной системе с прямоугольной формой рабочей зоны / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, Г. С. Сериков // Авиационо-космическая техника и технология. 2008. – №2 (49). – С.45–50.

11. Батыгин Ю. В. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно – импульсного притяжения листовых заготовок / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, Е. А. Чаплыгин // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2007. – № 11/47. – С. 109–117 .

12. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун [и др.] // Электротехніка і електромеханіка. – Х. : НТУ "ХП". – № 4 – С. 50–53.

13. Гнатов А. В. Анализ электродинамических процессов в цилиндрических индукторных системах – инструментах магнитно-импульсной рихтовки : монография / А. В. Гнатов. – Х. : ХНАДУ, 2013 – 292 с.

14. Батыгин Ю. В. Силы Лоренца в индукционной индукторной системе техники МИОМ / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Шиндерук // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2014. – № 2 – С. 170–175

15. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1974. – 940 с.