

УДК 621.318

А. Гнатов, канд. техн. наук

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

БЕЗКОНТАКТНЕ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНЕ РИХТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КУЗОВІВ

Резюме. Проведено аналіз існуючих рішень щодо безконтактного магнітно-імпульсного рихтування пошкоджених елементів корпусів автомобілів і літаків. Представлено експериментальні досягнення Харківського національного автомобільно-дорожнього університету у напрямку магнітно-імпульсної обробки металів. Сформульовано конструктивну пропозицію конкретного пристрою для безконтактного магнітно-імпульсного рихтування. Експериментальна апробація запропонованого технічного вирішення рихтування пошкоджених елементів автомобільних кузовів показала його практичну дієздатність.

Ключові слова: магнітно-імпульсне рихтування, індукторна система, магнітно-імпульсна установка, ферромагнетик.

A. Gnatov

THE CAR BODY MAGNETIC PULSE NON-CONTACT FLATTENING

The summary. Within the framework of the article the analysis of the existent decisions for the magnetic pulse non-contact flattening the damaged elements of the car and airplane bodies, what are presented in modern scientific periodic, is conducted. The experimental achievements of the HNADU electromagnetic technologies laboratory in direction of magnetic pulse metal working are presented. The constructive suggestion of the concrete device for the non-contact magnetic pulse flattening are formulated. Experimental test of the offered technical solution for flattening the damaged elements of motor-car bodies has shown its practical workability.

Key words: magnetic pulse non-contact flattening, inductor system, magnetic pulse installation, ferromagnetic.

Постановка проблеми. Принципова сутність безконтактного магнітно-імпульсного рихтування кузовних елементів автомобіля полягає в притяганні заданих ділянок із вм'ятинами на поверхні листових металів. Фізична основа такого рихтування базується на використанні енергії імпульсних магнітних полів [1-4].

Магнітно-імпульсне притягання – це не еквівалент або аналог відомого електромагнітного притягання. Останнє, як відомо, засновано на використанні статичних ефектів, пов'язаних з ферромагнітними властивостями металів. Для притягання тонкостінних листових об'єктів електромагніти неприйнятні. Їхня дієвість проявляється тільки для масивних ферромагнетиків у досить сильних полях. У випадку тонких об'єктів обробки має місце їхнє насичення, що спричиняє втрату магнітних властивостей уже при амплітудах напруженостей, явно не достатніх для ефективного силового впливу.

Слід зазначити, що крім магнітно-імпульсного рихтування в авто- і авіапромисловості існують й інші методи, засновані на інших фізичних представленнях. До них відносяться механічні підходи з різними важільними пристосуваннями, вакуумні системи, пристрої, що припускають нагрівання з наступним швидким охолодженням ділянок із вм'ятинами і т.д [4, 5].

Відмінною і привабливою рисою саме магнітно-імпульсного притягання є можливість усунення вм'ятин із зовнішнього боку відновлюваного об'єкта, причому без порушення існуючого захисного (електролізного або лако-фарбного) покриття. Останній фактор здобуває особливу значущість, якщо вм'ятина не глибока і покриття не було ушкоджено.

Аналіз основних досягнень і публікацій. Історично методи безконтактного магнітно-імпульсного рихтування одержали свій початок і розвиток в авіапромисловості. У цій області протягом останніх 35÷40 років передові позиції займають фірми США «Boeing», «Electroimpact», «Fluxtronic» (рис. 1). Фахівці фірм освоїли випуск так званих магнітно-імпульсних комплексів для зовнішнього рихтування корпусів літаків [4–7].

Принцип дії – суперпозиція магнітних полів з різними робочими частотами.

Технічна реалізація – двочастотна магнітно-імпульсна система.

Недоліки – два джерела потужності, складна високочотна електроніка, висока ціна.

На сьогодні методи магнітно-імпульсного рихтування почали поширюватися і в Європі. Перші зразки комплексів безконтактного магнітно-імпульсного рихтування створили спільно фірми «Beulentechnik AG» (штаб-квартира в Швейцарії, Цюріх) і «Tesla» (Чехія, Прага), рис. 2, але в основу їх дієвості були покладені результати розробок 2002–2004 рр., виконані у НТУ «ХПІ».



Рисунок 1 – Магнітно-імпульсні комплекси для зовнішнього рихтування корпусів літаків: а, б – фірми «Fluxtronic»; в – фірми «Electroimpact»



Рисунок 2 – Магнітно-імпульсна установка фірми «Tesla»: а – загальний вигляд; б – установка в роботі

Концерн «Beulentechnik AG»: Швейцарія, Німеччина, Швеція, Чехія (спеціалізація – авторемонт і розроблення відповідних пристроїв).

Принцип дії – природне притягання феромагнітних металів при зниженні робочої частоти діючого поля. (Цей ефект виявили і зафіксували у НТУ «ХПІ» проф. Батигінім Ю.В., Лавінським В.І., Хіменко Л.Т. – 2004р.)

Технічна реалізація – магнітно-імпульсна система фірми «Tesla» (Чехія).

Недоліки – закладено застарілі результати робіт 2002-2004рр., мала ефективність і обмежена область застосування (зокрема, тільки сталь).

Мета роботи. Експериментальні дослідження та практична апробація теоретично обґрунтованих пропозицій в області безконтактного магнітно-імпульсного рихтування пошкоджених елементів автомобільних кузовів.

ЛАБОРАТОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Проблемою безконтактного магнітно-імпульсного рихтування займаються й у лабораторії електромагнітних технологій ХНАДУ [4, 8].

Завдання, які вирішують у лабораторії:

1. Створення малогабаритних джерел потужності, що працюють від мережі ~ 220 В у режимі багаторазового повторення імпульсів силової дії (до 5-10 Гц).
2. Створення інструментів, що трансформують природне магнітно-імпульсне відштовхування в притягання листових металів.
3. Практична спрямованість робіт – створення магнітно-імпульсних систем для зовнішнього рихтування корпусних елементів автомобілів і літаків без порушення їх захисного покриття.

Шляхи вирішення, фізичне обґрунтування (авторські пропозиції):

1. Створення джерел потужності.

Застосування схем електронного управління зарядно-розрядними процесами дозволяють здійснювати безперервне накопичення енергії ємнісними батареями і їх розряд у колі індуктора-інструмента. Як показують оцінки й експеримент, реальна потужність мережі (до 5-7 кВт) дозволяє отримати частоту повторення імпульсів силової дії \sim до 5 Гц.

2. Створення інструментів.

– Застосування закону Ампера – притягання провідників з однаково направленими струмами. ІНДУКЦІЙНІ ІНДУКТОРНІ СИСТЕМИ. Робота з алюмінієм і його сплавами.

– Застосування ефекту притягання феромагнетика при зниженні робочої частоти діючого поля. КОНІЧНІ СИСТЕМИ. Робота з різними сталями.

– Комбінація закону Ампера й ефекту притягання феромагнетика. КОМБІНОВАНІ СИСТЕМИ. Робота з будь-якими металами.

Практична реалізація.

1. Комплекс для моделювання електромагнітних процесів, рис. 3а.
2. Магнітно-імпульсна установка МІУС-2 з циліндричним погоджуючим пристроєм – імпульсним трансформатором, рис. 3б.
3. Інструменти – індуктори для магнітно-імпульсного притягання, рис. 3в.

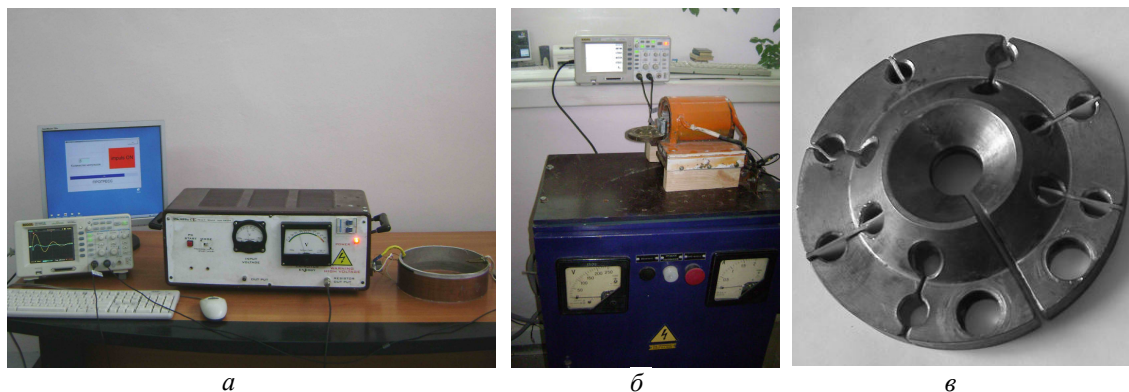


Рисунок 3 – Практична реалізація в лабораторії електромагнітних технологій: а – комплекс для моделювання електромагнітних процесів; б – МІУС-2; в – циліндричний індуктор кінцевого профілю

За допомогою комплексу для моделювання електромагнітних процесів (рис. 3а) можна провести модельні експерименти, які дозволяють експериментально дослідити протікання електромагнітних процесів у розроблених інструментах магнітно-імпульсної дії.

Представлений модельний комплекс працює в слабкострумовому режимі багатократного повторення розрядних імпульсів, які настають з частотою, кратною робочій частоті напруги живлячої промислової мережі (50 Гц, 25 Гц і т.д.). Картинка розряду, що періодично повторюється, формується в стійке стаціонарне зображення на екрані осцилографа (аналогія зі стробоскопічним ефектом). Схема модельного комплексу зображена на рис. 4.

Як бачимо зі схеми, запропонована модельна магнітно-імпульсна система складається з трьох складових:

- енергетичний блок – фактично магнітно-імпульсна установка;
- погоджувальний пристрій, який є імпульсним трансформатором;
- інструмент – індукторна система (власне індуктор плюс оброблюваний об'єкт).

Власні параметри енергетичного блоку:

- ємність конденсаторної батареї $C_c = 29$ мкФ;
- напруга заряду батареї конденсаторів $U_c = 250 \dots 500$ В;
- власна індуктивність $L_c = 300$ нГн;
- власна частота $f_c = 50$ кГц при відносному декременті загасання $\beta = 0,14$;
- власний активний опір (включаючи опір вимірювального шунта) $R_c = 0,027$ Ом;
- максимальне значення розрядного струму $I_m = 3,3$ кА (вихід закорочено).

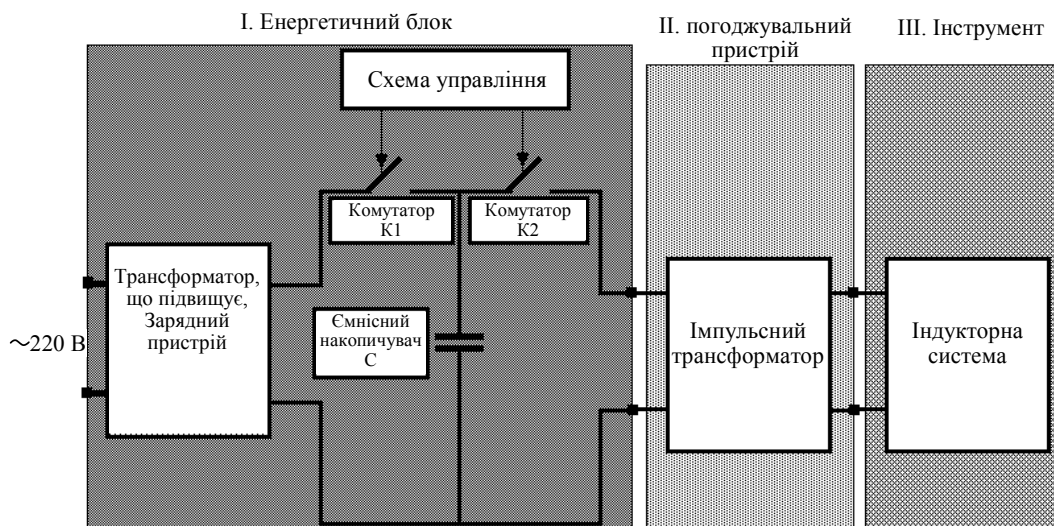


Рисунок 4 – Схема модельного комплексу для дослідження імпульсних магнітних процесів

Для моделювання електромагнітних процесів у широкому частотному діапазоні при малоіндуктивному навантаженні (наприклад, одновиткові соленоїди різної геометрії) до електричного виходу енергетичного блоку підключають погоджувальний пристрій. Це доповнення істотно відрізняє запропоновану розробку від відомих аналогів, де регулювання частоти розрядного струму здійснювалося включенням різного числа конденсаторів ємнісного накопичувача енергії [2, 4, 9].

У практиці магнітно-імпульсної обробки металів зміна робочої частоти за рахунок варіації ємності накопичувача енергії, як правило, не застосовується. Це рішення є дуже складним у реалізації та призводить до відомих негативних наслідків (зниження електричної міцності ізоляції, терміну служби конденсаторів тощо).

Включення погоджувального пристрою дозволяє уникнути вищезгаданих негативів. Більш того, при виконанні певних умов дане технічне рішення дозволяє значно збільшити струм в обмотці індуктора-інструменту магнітно-імпульсної технології. В зв'язку з цим використання погоджувальних пристроїв у модельних експериментах робить їх набагато адекватнішими умовам реального виробництва.

Погоджувальний пристрій є імпульсним повітряним трансформатором, первинна обмотка якого виконана у вигляді багатовиткової спіралі, а вторинна має вигляд розрізного витка. Цей виток може бути плоским, а може мати форму циліндра [4].

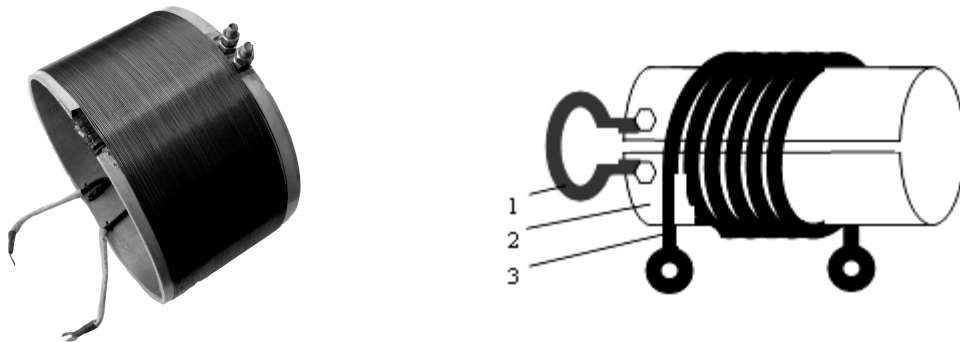
Розрахунки параметрів погоджувальних пристроїв для роботи в схемі експериментального стенда виконані згідно з методикою, описаною в роботі [4].

За результатами розрахунків виготовлено два типи пристроїв, зображені на рис.5 і 6.

Перший, з вторинним витком у вигляді циліндра з розрізом (рис.5), зовнішнім діаметром 225 мм, завдовжки 140 мм і 60-ма витками первинної обмотки дозволяє реально знизити робочу частоту розрядного струму до $\sim 1,3$ кГц.

Другий, з плоским вторинним витком (рис. 6), зовнішнім діаметром 215 мм, заввишки 30 мм і 12 витками первинної обмотки на практиці реалізує частоту ~ 10 кГц.

Слід додати, що первинні обмотки трансформаторів мають кілька відведень, що дозволяють при проведенні експериментів простим перемиканням виводів дискретно варіювати частоту й амплітуду струму в розрядному контурі.



- 1 – навантаження (досліджувана індукторна система);
- 2 – вторинна обмотка погоджувального трансформатора;
- 3 – первинна обмотка погоджувального трансформатора.

Рисунок 5 – Зовнішній вигляд і схематичне зображення погоджувального пристрою з вторинним витком у вигляді циліндра з поздовжнім розрізом



- 1 – навантаження (досліджувана індукторна система);
- 2 – вторинна обмотка погоджувального трансформатора;
- 3 – первинна обмотка погоджувального трансформатора.

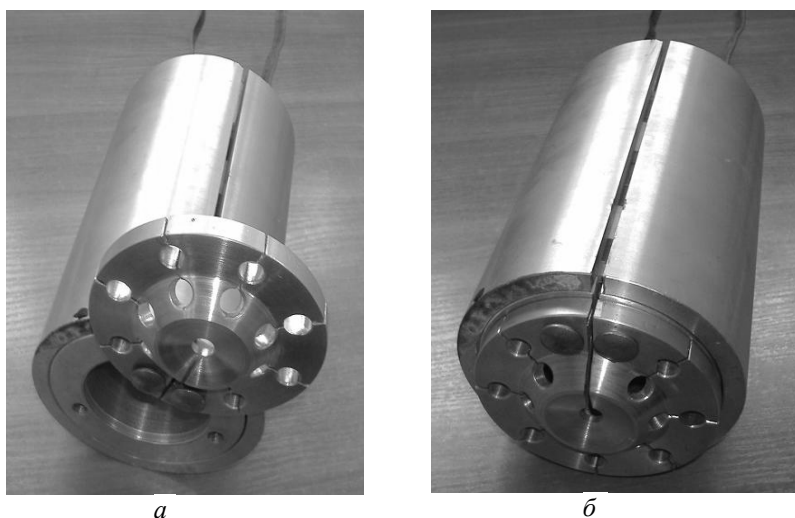
Рисунки 6 – Зовнішній вигляд і схематичне зображення погоджувального пристрою з плоским вторинним витком, що має радіальний розріз

Для досягнення поставленої мети в експериментальних дослідженнях безконтактного магнітно-імпульсного рихтування проведено аналіз цілого ряду індукторних систем-інструментів. У ході даного аналізу [1, 4, 8] як найефективнішу і яку легко (з технічної точки зору) здійснити було вибрано та виготовлено індукторну систему з циліндричним індуктором, внутрішній отвір якого має конічний профіль, та циліндричним погоджувальним пристроєм (рис. 7), де первинна обмотка знаходиться між двома вторинними витками з'єднаними паралельно (два витки у вторинній обмотці запропоновано для посилення коефіцієнта передачі енергії).

Як джерело потужності використовували магнітно-імпульсну установку МІУС-2, розроблену й створену в лабораторії електромагнітних технологій на кафедрі автомобільної електроніки ХНАДУ. Зовнішній вигляд установки МІУС-2 зображено на рис 3б.

Магнітно-імпульсна установка МІУС-2 має наступні технічні характеристики:

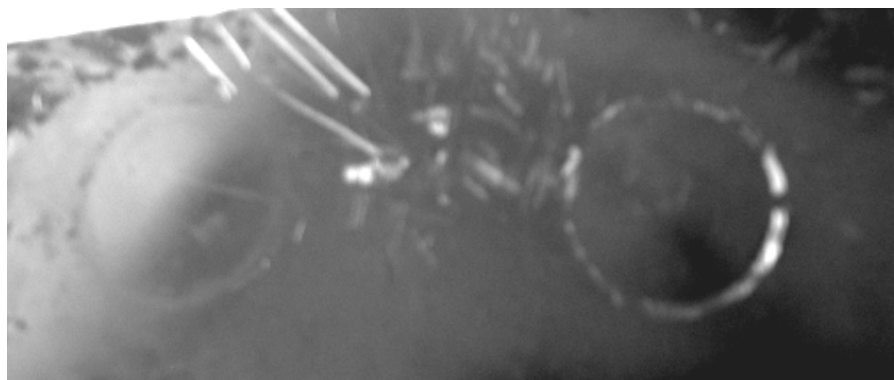
- робота від мережі ~ 220 В;
- зарядна напруга до 2 кВ;
- енергія, що накопичується, до 2 кДж;
- власна частота в імпульсі ~ 10 кГц, у комплекті з погоджувальними пристроями – $\sim 1-2$ кГц;
- частота повторення розрядних імпульсів до ~ 10 Гц.



Рисунки 7 – Циліндричний погоджувальний трансформатор з під'єднаним індуктором конічного профілю:

a – обмежений контакт індуктора; *б* – контакт по всьому периметру вторинного витка

Для проведення експериментальних досліджень було взято зразки обшивки кузова автомобіля фірми «Субару» товщиною ~ 1 мм. У ході експерименту, спочатку, за допомогою створеного магнітно-імпульсного комплексу було отримано деформації (вм'ятини) на дослідних зразках обшивки кузова автомобіля (рис. 8). Потім ці зразки перевернули так, щоб центр лунки, що утворилася, співпав з центром отвору конічного отвору індуктора, і провели втягування вже існуючої лунки в поверхню (рис. 9). На представлених рисунках видно, що форма утвореної і видаленої вм'ятини (лунки) відповідає формі та розміру конуса отвору індуктора.



Рисунки 8 – Утворення вм'ятини на зразку обшивки кузова автомобіля «Субару»

При проведенні експерименту установка МІУС-2 працювала в режимі зарядної напруги 1,8 кВ і накопичувала енергію 1,5 кДж.

Значна особливість експериментального устаткування і проведених експериментів від раніше отриманих результатів [5, 6] полягає у тому, що:

- силова дія на заготівку з боку індукторної системи носила кумулятивний характер у результаті багатократного повторення (раніше описаний в науковій періодиці результат було отримано при однократній силовій дії);
- результат отримано за допомогою циліндрового погоджувального пристрою (раніше подібний результат було отримано на дисковому погоджувальному пристрої).
- операцію здійснено при набагато менших енергетичних витратах (в 6-7 разів) і меншій напрузі (в 2,5 рази), ніж в аналогічних експериментах НТУ «ХПІ» 2004г. [5, 6]. Даний результат зумовлений багатократною силовою дією і оптимальним вибором конструкції погоджувального пристрою.



Рисунки 9 – Видалення вм'ятини (зліва) на зразку обшивки кузова автомобіля «Субару»

Товщина кузовних елементів сучасних автомобілів, виконаних з різних сталей і алюмінієвих сплавів, як правило, не перевищує ~ 1 мм. Механічна міцність автомобільних кузовів забезпечується ребрами жорсткості з внутрішнього боку, де також розташовуються компоненти електричних і електронних сервісних систем, що затрудняє або взагалі виключає доступ до пошкодженої поверхні зсередини. Тому застосування магнітно-імпульсних технологій для зовнішнього відновлення пошкоджених елементів кузовних конструкцій автомобілів є найефективнішим, але при цьому слід врахувати деякі особливості.

Формування (рихтування) корпусних елементів із сучасних сплавів можливе виключно при направленій силовій імпульсній дії, коли метал переходить у так званий стан «гіперпластичності». Це означає, що відносні деформації оброблюваних металевих заготовок можуть сягати $\sim 200\%$ [10].

Досягти ефекту «гіперпластичності» листового металу можна або разовою силовою магнітно-імпульсною взаємодією (коли енергія одного імпульсу здатна призвести до даного явища), або серією імпульсів (коли силова магнітна взаємодія носить кумулятивний характер і енергія, необхідна для явища «гіперпластичності», накопичується від імпульсу до імпульсу).

Проведені експерименти дали позитивні результати в області притягання тонкостінних листових металів, що використовуються як обшивка сучасних автомобілів. Це свідчить про те, що за допомогою магнітно-імпульсних технологій, реалізованих відповідно до представлених конструктивних особливостей індукторних систем, можна провести **безконтактне** рихтування пошкоджених елементів кузовів автомобілів та обшивки корпусів літаків.

Висновки. З проведених модельних досліджень випливає, що:

- створений експериментальний модельний комплекс дозволяє проводити дослідження характеристик електродинамічних процесів, що протікають в індукторних системах у широкому діапазоні робочих частот розрядного струму і достатніх для якісних вимірювань сигналу, що генерується;
- застосування погоджувальних трансформаторів дозволяє достатньо просто (без яких-небудь перемикачів у схемі енергетичного блоку) регулювати частоту розрядного струму;
- режим безперервної генерації імпульсів дозволяє отримати стійкі картини сигналів, які характеризують електромагнітні процеси, на екрані осцилографа, що дозволяє дослідження індукторних систем у динаміці при варіації їх параметрів.

З проведених «силових» експериментальних досліджень випливає, що:

- істотним досягненням є практична реалізація притягання сталевих зразків при енергії, що запасасться ($W \approx 1,5 - 2$ кДж), в 6-7 разів і при напрузі ($U \approx 1,5 - 2$ кВ) в 2,5 рази нижче, ніж в аналогічних експериментах НТУ «ХП» 2004 р. [5, 6];
- запропонований варіант індукторної системи може створювати деформації в листовому металі та усувати їх;
- сформульовану й апробовану пропозицію можна розглядати як одне з можливих конструктивних рішень із виконання реального робочого інструменту для безконтактного рихтування пошкоджених кузовних елементів автомобілів.

Література

1. Батыгин Ю.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с ферромагнитным массивным экраном и листовой заготовкой / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 4. – С.56 – 59.
2. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко // Том 1. Изд. второе, переработанное и дополненное: под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: Изд. МОСТ-Торнадо, 2003. – 285 с.
3. Батыгин Ю.В. Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, А.В. Бажинов // Труды международной научно-технической конференции «Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития». – Самара: 18 – 19 сентября 2007. – С. 3 – 13.
4. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
5. Batygin Yu.V. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko. // March 31/April 1. – Dortmund: Germany. 2004. –P.157 – 160.
6. Батыгин Ю. В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – №2. – С.80 – 84.
7. 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.
8. Батыгин Ю.В. Расчет усилий в индукционной индукторной системе прямоугольной геометрии с ферромагнитным массивным экраном и заготовкой / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Г.С. Сериков // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 3. – С.61 – 64.
9. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
10. Дарков А.В. Сопrotивление материалов / А.В. Дарков., Г.С. Шпиро. – М.: Высшая школа, 1969. – 730с.

Одержано 20.04.2010 р.