

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ – ИНСТРУМЕНТЕ РИХТОВКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ

Из залученням розрахункових залежностей для щільності індукованих струмів і розподіленої сили тяжіння проведено аналіз процесів в експериментальних моделях індукторної системи з притягуючим екраном і зовнішнім додатковим витком. Дана чисельна оцінка впливу додаткових витків на просторово-часові розподіли основних характеристик електромагнітних процесів. Бібл. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електромагнітний процес, індуктор, притягуючий екран, додатковий виток, сили тяжіння.

С привлечением расчетных зависимостей для плотности индуцированных токов и распределенной силы притяжения проведен анализ процессов в экспериментальных моделях индукторной системы с притягивающим экраном и внешним дополнительным витком. Дана численная оценка влияния дополнительных витков на пространственно-временные распределения основных характеристик электромагнитных процессов. Библ. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: электромагнитный процесс, индуктор, притягивающий экран, дополнительный виток, силы притяжения.

Введение. Постановка проблемы. Одним из перспективных направлений магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) является бесконтактная магнитно-импульсная рихтовка автомобильных кузовов [1, 2]. От конструкции и принципа действия инструмента, которым производится рихтовка, зависит эффективность и качество производимых операций. В современной технике МИОМ используется достаточно большое количество инструментов – индукторных систем (ИС) различной конфигурации. Большинство из них обладают неравномерным силовым воздействием на обрабатываемый объект, что в свою очередь не удовлетворяет потребностям эффективного процесса рихтовки [1, 3, 4]. Поэтому возникает необходимость создания ИС с высокой однородностью возбуждаемого поля и высокой концентрацией сил притяжения в рабочей зоне инструмента.

Анализ основных достижений и публикаций. Наиболее эффективными ИС являются индукторные системы с притягивающим экраном (ИСПЭ) [5]. Одним из важных моментов при выборе определенной конструкции ИСПЭ является исследование электродинамических процессов с определением возбуждаемых усилий. Характер и протекание электродинамических процессов в соответствии с конструктивными особенностями – определяют эффективность и работоспособность ИСПЭ, как универсального инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов [6]. Ранее, в работе [7] были получены расчётные аналитические зависимости для ИСПЭ с внешним дополнительным витком, а именно, плотность токов, индуцированных в металле листовой заготовки и притягивающем экране, а также формулы для распределенной силы притяжения. Результаты, полученные авторами [7], позволят проанализировать характер процессов протекающих в рабочей зоне инструмента.

Цель работы – провести численный анализ возбуждаемых полей и токов в экспериментальных моделях индукционной ИСПЭ и дополнительным витком.

Численные оценки, основные результаты. В идеализации «предельно низких» частот действующих

полей, исходя из полученных расчётных зависимостей для плотности индуцированных токов и распределенной силы притяжения в ИСПЭ и внешним дополнительным витком, в условиях расчётной модели в цилиндрической системе координат (рис. 1) и принятых допущений полученные выражения приведём к виду, удобному в вычислениях.

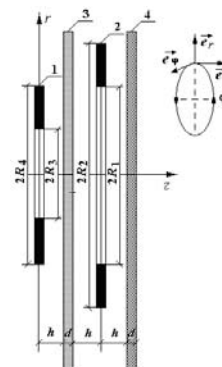


Рис. 1. Расчётная модель в цилиндрической системе координат: 1 – дополнительный виток индуктора; 2 – основной виток индуктора; 3 – экран; 4 – заготовка; R_1, R_3 и R_2, R_4 – внутренние и внешние радиусы соответственно; d и h – расстояние от основного витка индуктора до экрана и заготовки и от дополнительного витка до экрана; $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$ – направляющие орты

При решении примем следующие допущения.

- Плоские витки индуктора имеют цилиндрическую форму, их толщина пренебрежимо мала, так что они не оказывают никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.
- Экран и заготовка есть одинаковые листовые металлы с довольно большими поперечными размерами, достаточно малой толщиной – d , электропроводностью – γ и абсолютной магнитной проницаемостью – $\mu = \mu_r \mu_0$ (μ_r – относительная магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума), они расположены на одинаковом расстоянии от основного витка индуктора – h , расстояние от дополнительного витка до вспомогательного экрана также равно h .
- Аксиальная симметрия имеет место ($\partial/\partial\phi = 0$, ϕ – азимутальный угол).

В несобственных интегралах зависимостей для токов индуцированных в экране и заготовке введём новую переменную интегрирования $x = \lambda \cdot d$, $x \in [0; \infty)$. Кроме того, положим, что токи в витках индуктора имеют разные амплитуды, но изменяются во времени одинаково по закону экспоненциально затухающей синусоиды [2, 8]:

$$\bullet j_1(t) = j_{1m} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) = j_{1m} \cdot e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi),$$

где j_{1m} – амплитуда, $\psi = \omega t$ – фаза, δ и δ_0 – абсолютный и относительный декременты затухания;

$$\bullet j_2(t) = j_{2m} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) = j_{2m} \cdot e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi).$$

В терминах новой переменной формулы полученные авторами в [7] с учётом принятых допущений по токам в витках индуктора принимают следующий вид:

$$J_{\varphi}^{(3)}(\varphi, r) = -J_m \times \int_0^{\infty} \left(\left(\frac{j_{1m}}{J_m} \right) f_1(x) + \left(\frac{j_{2m}}{J_m} \right) f_2(x) \right) e^{-x \frac{h}{d} (1-e^{-x})} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx, \quad (1)$$

где $J_m = j_m \cdot \frac{\omega \tau}{2} \cdot \frac{dg(\psi)}{d\psi}$ – «условная» амплитуда

сигнала, $g(\psi) = e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi)$,

$$f_1(x) = \frac{1}{x^2} \int_{x \frac{R_3}{d}}^{x \frac{R_4}{d}} y \cdot J_1(y) dy, \quad f_2(x) = \frac{1}{x^2} \int_{x \frac{R_1}{d}}^{x \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) dy,$$

$$J_{\varphi}^{(3)}(\varphi, r) = -J_m \times \int_0^{\infty} \left(\left(\frac{j_{1m}}{J_m} \right) f_1(x) e^{-x \left(\frac{3h}{d} + 1 \right)} + \left(\frac{j_{2m}}{J_m} \right) f_2(x) e^{-x \frac{h}{d}} \right) \times \frac{(1-e^{-x})}{x} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx. \quad (2)$$

Вычисление распределённой силы притяжения проводим по формуле:

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

где $J_{\varphi}^{(3)}(t, r)$, $J_{\varphi}^{(3)}(t, r)$ – определены зависимостями (1) и (2), соответственно.

Полученные результаты проиллюстрируем численными оценками для экспериментальных моделей индукционных индукторных систем.

- Геометрия индукторных систем:

Зазоры одинаковы для всех конструкций: $h = 0,0005$ м.

Вариант №1 – ИСПЭ без дополнительного внешнего витка (первая конструкция [2, 9]): $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м, индуктивность ~ 30 нГн.

Вариант №2 – ИСПЭ с дополнительным «внешним» витком:

а) $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м, $R_3 = 0,02$ м, $R_4 = 0,025$ м, индуктивность «внешнего» витка ~ 30 нГн, «внутреннего» $\sim 22,7$ нГн, индуктивность системы $\sim 12,9$ нГн, амплитуды токов в витках индуктора распределены соответственно их индуктивностям;

б) $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м, $R_3 = 0,015$ м, $R_4 = 0,02$ м, индуктивность «внешнего» витка ~ 30 нГн, «внутреннего» $\sim 15,9$ нГн, суммарная индуктивность при параллельном соединении $\sim 10,4$ нГн, амплитуды токов в витках распределены соответственно их индуктивностям.

Вариант №3 – ИСПЭ, возбуждаемая «внешним» витком (внутренний виток отсутствует), $R_3 = 0,025$ м, $R_4 = 0,03$ м, индуктивность ~ 30 нГн.

Индуктивности вычислены по формулам для плоских цилиндрических витков. При наличии двух витков рассматривается их параллельное соединение [10].

- Вспомогательный экран и листовая заготовка – нержавеющая сталь с толщиной $d = 0,001$ м и удельной электропроводностью $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

- На вход индуктора подаётся токовый импульс с рабочей частотой – $\omega = 2\pi \cdot 1500$ Гц; относительным декрементом затухания – $\delta_0 = 0,2$; амплитудой – $I_m = 50$ кА.

При одинаковой ширине витков – $\Delta R = R_2 - R_1 = R_4 - R_3 = 0,005$ м принятая амплитуда тока может соответствовать максимальной величине линейной плотности $\sim j_{max} = 10^7$ А/м.

Временные характеристики токового импульса и параметры листовой заготовки соответствуют требуемому уровню её «прозрачности» для действующих полей, а именно,

$$\omega \cdot \tau = (2\pi \cdot 1500) \cdot \tau = \left\| \tau = \mu_0 \gamma d^2 = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ с} \right\| = 0,015 \ll 1.$$

Результаты вычислений для каждого из вариантов ИСПЭ приведены на рис. 2, 3.

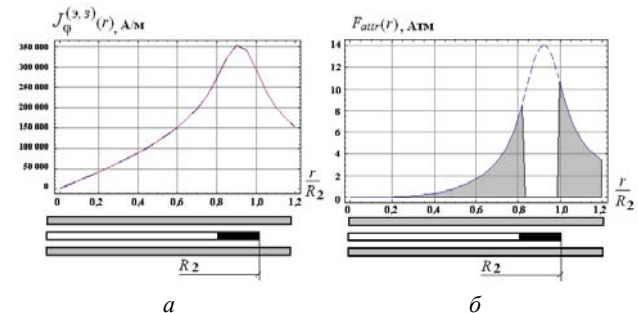


Рис. 2. Вариант №1. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране и листовой заготовке – $J_{\varphi}^{(3)}(r)$, б – распределённая сила притяжения заготовки

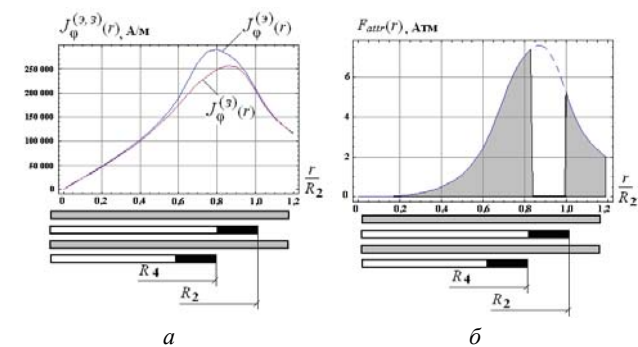


Рис. 3. Вариант №2, а. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране – $J_{\varphi}^{(3)}(r)$ и заготовке – $J_{\varphi}^{(3)}(r)$, б – распределённая сила притяжения заготовки

При подаче тока на вход с амплитудой ~ 75 кА (вариант № 2,б) и распределении по виткам в отношении 3/2 (внутренний/внешний), суммарная величина силы составляет уже $\sim 106,25$ кГ при среднем значении распределённой силы $\sim 2,6$ кГ/см² (рис. 4).

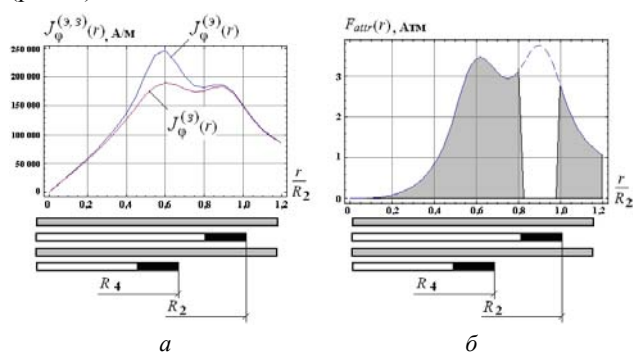


Рис. 4. Вариант №2,б. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране – $J_\phi^{(3)}(r)$ и заготовке – $J_\phi^{(3,3)}(r)$,

б – распределённая сила притяжения заготовки

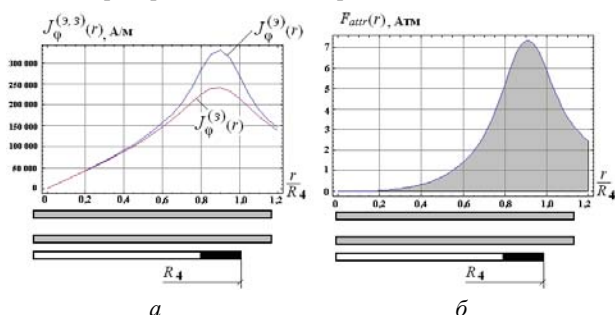


Рис. 5. Вариант №3. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране – $J_\phi^{(3)}(r)$ и заготовке – $J_\phi^{(3,3)}(r)$,

б – распределённая сила притяжения заготовки

«Незатемнённые» участки на графиках – участки, где отсутствуют силы, обусловленные наличием витка между экраном и заготовкой.

Силы притяжения найдены интегрированием распределённых сил притяжения по площадям соответствующих участков $\{r \leq 1,2 \cdot R_2 = 0,036$ м, $\phi \in [0; 2\pi]\}$.

Графики на (рис. 2 – 5) можно дополнить расчётными данными, сведенными в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследований

№ п/п	Вариант конструкции в расчётах	L системы, нГн	Сила притяжения, кГ	Среднее значение распределённой силы притяжения, кГ/см ²
1	Вариант №1	30	91,87 (166)	2,25 (4,1)
2	Вариант №2,а	12,9	72,43 (114)	1,77 (2,88)
3	Вариант №2,б	10,4	47 (68,8)	1,34 (1,7)
4	Вариант №3	30	140,25	3,4

В скобках (табл. 1) даны величины, вычисленные в предположении, что наличие витка не влияет на радиальное распределение сил притяжения, площадь рассматриваемого участка 40,72 см².

Как видно из результатов исследования введение дополнительного витка, размещённого поверх вспомогательного экрана позволяет сконцентрировать силы притяжения в центральной части рабочей зоны индукторной системы. Для большей концентрации сил в центре рабочей зоны при сохранении или даже увеличении амплитуд возбуждаемых сил притяжения следует применять соответствующую схему питания индукторной системы, позволяющую регулировать амплитуды и распределение токов по виткам.

Выводы.

1. Проведен численный анализ полей и токов в экспериментальных моделях индукторных систем с притягивающим экраном (ИСПЭ) и дополнительным витком, предназначенных для выравнивания металлических покрытий автотранспорта.

2. Показано, что введение в ИСПЭ дополнительного витка, размещенного поверх вспомогательного экрана, существенно повышает амплитуды возбуждаемых сил притяжения.

3. Показано, что параллельное соединение основного и дополнительного витков в ИСПЭ позволяет сконцентрировать силы притяжения в центре рабочей зоны инструмента рихтовки автомобильных кузовов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гнатов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
- 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. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
- Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2007. – № 11/47. – С. 109-117.
- Пат. 70734 Україна, МПК В 21 Д 26/14 Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Щіголева С.О., Чаплигін Є.О., Гопко А.В., Дробинін О.М.; заявник та патенто власник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2011 14018; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
- Пат. 77579 Україна, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих заготовок одновитковим круговим індуктором, розташованим над допоміжним екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Чаплигін Є.О., Трунова І.С., Гопко А.В., Сабокар О.С.; заявник та патенто власник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 07542 заявл. 22.06.2012; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.
- Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Аргун Ш.В., Еремина Е.Ф. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 4. – С. 50-53.
- Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Расчет полей и токов в индукторной системе с притягивающим экраном и дополнительным витком как инструмента рихтовки // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 1. – С. 57-62.

8. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Х.: Вища школа, 1977. – 189 с.

9. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хавін В.Л.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». – № 2004 010542 ; заявл. 26.01.2004; опубл. 15.02.2006, Бюл. № 2.

10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. В 2-х томах. Том 2. – Л.: Энергия, 1967. – 340 с.

REFERENCES

1. Gnatov A.V., Batygin Yu.V., Chaplygin E.A. *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tehnologiy. Magnitno-impul'snye tehnologii beskontaktnoj rihtovki kuzovnykh elementov avtomobilya: monografiya* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Magnetic pulse contactless technology straightening car body elements. Monograph]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ., 2012. 242 p. (Rus).
2. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tehnologiy. Tom 3. Teoriia i eksperiment pritiiazheniia tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi poliami* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol. 3. Theory and experiment of thin-walled metals attraction by the pulse magnetic fields]. Kharkov, KhNAHU Publ., 2009, 240 p. (Rus).
3. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu., Chaplygin E.A. Cylindrical induction inductor system for attraction of thin-walled sheet metal. *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, 2007, no.11(47), pp. 109-117. (Rus).
4. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Y.A., Gopko A.V., Shigoleva S.A., Drobinin A.M. *Sposib magnitno-impul'snogo prytyagannja metalnykh ob'ektiv dvoytkovuju induktornoju systemuju z tonkym ekranom* [The method of magnetic-pulse attraction of metal objects by double-turn circular inductor system with a thin screen]. Patent UA, no.70734, 2012. (Ukr).
5. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin E.O., Trunova I.S., Gopko A.V., Sabokar O.S. *Sposib magnitno-impul'snogo prytyagannja metalnykh zagotivok odnovitkovim krugovim induktorom, roztaшовanim nad dopomizhnim ekranom* [Method of the magnetic-pulse attraction metal workpieces single-turn circular inductor located on the auxiliary screen]. Patent UA, no.77579, 2013. (Ukr).
6. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Argun Sh.V., Yeryomina E.F. Electromagnetic processes in symmetric induction systems with identical ferromagnetic thin-walled screen and sheet blank. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.4, pp. 50-53. (Rus).
7. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 57-62. (Rus).
8. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov* [Directory of magnetic-pulse treatment of metals]. Kharkiv, Vishcha shkola Publ., 1977, 189 p. (Rus).
9. Batygin Yu.V., Lavinskij V.I., Havin V.L. *Sposib magnitno-impul'snoyi obrabotki tonkostinnih metalnykh zagotivok* [Method of the magnetic-pulse processing thin metal work pieces]. Patent UA, no.74909, 2006. (Ukr).

10. Neyman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. V 2-kh t. T. 2* [Theoretical bases of electrical engineering. In 2 vols. Vol. 2]. Leningrad, Energiya Publ., 1967, p. 340. (Rus).

Поступила (received) 10.12.2014

Батыгин Юрий Викторович¹, д.т.н., проф.,
Чаплыгин Евгений Александрович¹, к.т.н., доцент,
Шиндерук Светлана Александровна¹, аспирант,
¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
тел/phone +38 057 7073653, e-mail: batygin48@mail.ru;
chaplygin_e_a@mail.ru; svetlana11177@rambler.ru

Yu.V. Batygin¹, E.A. Chaplygin¹, S.A. Shinderuk¹
¹Kharkov National Automobile and Highway University,
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

An analysis of the electromagnetic processes in the inductor system – tool of the straightening of car bodies.

Introduction. One of the promising directions of electromagnetic forming (EMF) is a contactless magnetic-pulse straightening of the automobile bodies. The efficiency and the quality of the straightening depend on design and operating principle of the straightening tool. In the modern technique of EMF a large number of the tools - inductor systems (IS) is used in different configurations with uneven distribution forces on the treatment object that in turn does not meet the needs of the effective process of straightening. There appears the urgent necessity to create IS with high uniformity of the induced field and a high concentration of attracting forces in the working area of the tool. The most effective IS are the Inductor Systems with an Attracting Screen (ISAS). One of the most important considerations when choosing a particular design ISAS is the study of the electrodynamic processes with definition of excited loads. The nature and the course of the electrodynamic processes in accordance with design features determine the effectiveness and the efficiency of the ISAS. Therefore, in ISAS an additional coil for the concentration of the attracting forces in the working area should be entered. **Purpose.** The numerical analysis of the induced fields and the currents in the experimental models of ISAS with an additional coil was made. **Methodology.** In the idealization of the «extremely low» frequencies of existing fields, there were received rated dependences for density of the induced currents and distributed attracting force in ISAS and the external additional coil, through the use of the calculated model in the cylindrical coordinate system. **Results.** Insertion of the additional coil placed over the accessory screen allows to concentrate and increase the amplitude of the attracting forces in the central part of the working area of the inductor system. **Practical value.** 1. Numerical analysis of fields and currents in experimental models of Induction Systems with Attracting Screen (ISAS) and additional coil, designed to align the metal coatings of vehicles was made. 2. It is shown that if in ISAS they insert additional coil placed over the accessory screen significantly increases the amplitude of excited forces of attraction. 3. It is shown that the parallel connection of the primary and additional coils in ISAS allows to concentrate the forces of attraction in the centre of the working area of the tool for straightening automobile bodies. References 10, table 1, figures 5

Key words: electromagnetic process, inductor, attracting screen, additional coil, attracting forces.