

Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, С.А. Шиндерук, В.А. Стрельникова

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ТОКОВ И СИЛ В ЛИНЕЙНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ. ЧАСТЬ 1: МЕТАЛЛЫ С НИЗКОЙ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ

Метою статті є проведення чисельних оцінок основних характеристик електродинамічних процесів в лінійних інструментах магнітно-імпульсного притягання провідників з односпрямованими струмами в умовах інтенсивного проникнення діючих електромагнітних полів в метали з низькою питомою електропровідністю. Методика. Для проведення обчислень використовувалися положення теорії електромагнітного поля, що витікають з рівнянь Максвелла, і стандартні математичні програми з пакета Wolfram Mathematica. Результати. За допомогою аналітичних виразів розраховані амплітудно-часові залежності струмів і електродинамічних зусиль в лінійних магнітно-імпульсних інструментах, дієвість яких заснована на збудженні сил взаємного притягання провідників з односпрямованими струмами. Вперше встановлено, що збільшення сил притягання, в першу чергу, можливо за рахунок інтенсифікації процесів проникнення полів, що забезпечується переходом до досить низьких робочих частот збуджуючих струмів. Практична значимість. Використання отриманих результатів дозволить створювати нові більш ефективні лінійні інструменти магнітно-імпульсного притягання заданих ділянок листових металів, що працюють в умовах інтенсивного проникнення збуджених електромагнітних полів. Бібл. 10, рис. 9.

Ключові слова: лінійний інструмент усунення вм'ятин в листових провідниках, інтенсивне проникнення поля в метали з низькою питомою електропровідністю, магнітно-імпульсне притягання провідників з односпрямованими струмами.

Целью статьи является проведение численных оценок основных характеристик электродинамических процессов в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения проводников с однонаправленными токами в условиях интенсивного проникновения действующих электромагнитных полей в металлы с низкой удельной электропроводностью. Методика. Для проведения вычислений использовались положения теории электромагнитного поля, вытекающие из уравнений Максвелла, и стандартные математические программы из пакета «Wolfram Mathematica». Результаты. С помощью аналитических выражений рассчитаны амплитудно-временные зависимости токов и электродинамических усилий в линейных магнитно-импульсных инструментах, действенность которых основана на возбуждении сил взаимного притяжения проводников с однонаправленными токами. Впервые установлено, что увеличение сил притяжения, в первую очередь, возможно за счет интенсификации процессов проникновения полей, что обеспечивается переходом к достаточно низким рабочим частотам возбуждающих токов. Практическая значимость. Использование полученных результатов позволит создавать новые более эффективные линейные инструменты магнитно-импульсного притяжения заданных участков листовых металлов, работающие в условиях интенсивного проникновения возбуждаемых электромагнитных полей. Библ. 10, рис. 9.

Ключевые слова: линейный инструмент устранения вмятин в листовых проводниках, интенсивное проникновение поля в металлы с низкой удельной электропроводностью, магнитно-импульсное притяжение проводников с однонаправленными токами.

Введение. Методы притяжения заданных участков листовых металлов с использованием энергии импульсных магнитных полей для разного рода обрабатываемых технологий приобретают всё большую актуальность в различных отраслях промышленного производства [1-3]. Особое внимание привлекают разработки технологий удаления вмятин и выравнивания поверхностей листовых металлов при реставрации корпусов самолётов и автомобильных кузовов [4].

Как показывает практика, более 50 % повреждённый представляют собой вмятины в зонах с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом [4]. В этой связи весьма привлекательным способом магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов, который может быть положен в основу создания эффективного инструмента внешней рихтовки автомобильных кузовов, является притяжение линейными инструментами. Физическая сущность данного способа заключается в силовом взаимодействии однонаправленных параллельных токов (закон Ампера [10]). Первый – это ток в основном токопроводе линейного инструмента (аналог индуктора, в общепринятой терминологии [1]). Второй – это ток в обрабатываемом металле. Оба тока возбуждаются при непосредственном последовательном или

параллельном точечном подключении к источнику мощности. Основной токопровод – линейный инструмент жёстко зафиксирован. Притяжением деформируется обрабатываемый металл. Очевидным препятствием к эффективному возбуждению электродинамических усилий могут стать индукционные эффекты, соответственно которым ток в основном токопроводе индуцирует противоток в листовой заготовке, а ток в её металле индуцирует противоток в основном токопроводе линейного инструмента.

В целом, привлекательность данного способа обусловлена простотой технической реализации и довольно высокими энергетическими показателями [5, 6]. Анализ электродинамических процессов в подобной схеме позволит установить требования, выполнение которых обеспечит не только дееспособность, но и эффективность инструмента предлагаемого принципа действия.

Справедливости ради следует отметить, что подобная задача уже рассматривалась ранее авторами [7, 8]. Однако, непосредственное использование полученных формул и соотношений, полученных в цитируемых работах, для проведения практических расчётов не представляется возможным, ввиду ограни-

ченности найденных результатов условиями постановки и решения этой задачи.

Целью работы является анализ временных характеристик электродинамических процессов в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения листовых металлов, конечным результатом которого должны стать физико-математические зависимости для возбуждаемых токов и сил в условиях интенсивного проникновения электромагнитных полей в проводящие элементы инструментов.

Физико-математическая модель, допущения и постановка задачи. Для анализа электромагнитных процессов в рассматриваемой схеме обработки металла примем расчётную модель (рис. 1), соответствующую поперечному сечению исследуемой электромагнитной системы с токами J_1 и J_2 [9].

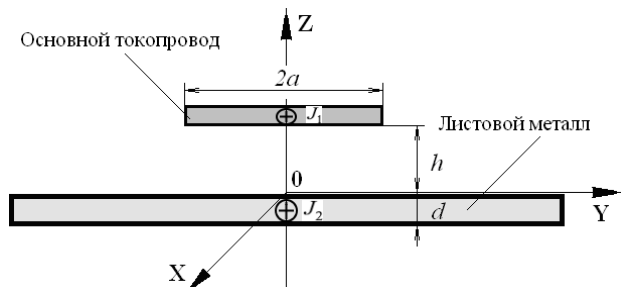


Рис. 1. Расчётная модель ($J_{1,2}$ – протекающие токи)

Обрабатываемая заготовка представляет собой достаточно тонкий листовой металл толщиной d с довольно большими поперечными размерами и удельной электропроводностью материала γ .

Основной токопровод так же «прозрачен» для действующих полей, так что его металл не оказывает влияния на протекающие электромагнитные процессы. Имеет место геометрическая симметрия системы относительно координатной плоскости ZOY. Вдоль оси абсцисс OX система обладает достаточно большой протяжённостью, так что оператор дифференцирования – $\partial/\partial x = 0$. В основном токопроводе в направлении оси OX течёт равномерно распределённый по OY возбуждающий ток с линейной плотностью $j(t) = j_m j(t)$, где $j_m = I_m/2a$ – амплитуда плотности тока (I_m – максимум тока), а $j(t)$ – временная зависимость тока.

Частотные характеристики возбуждающего тока таковы, что выполняется условие квазистационарности по Ландау – $\frac{\omega}{c} \cdot b \ll 1$ [10], где ω – циклическая частота процесса; c – скорость света в вакууме; b – произвольный характерный размер рассматриваемой электромагнитной системы. Пусть в системе возбуждается электромагнитное поле с ненулевыми компонентами напряжённости: $E_x \neq 0$; $H_{y,z} \neq 0$. Требуется выполнить оценку токов и сил в рассматриваемой электромагнитной системе.

Расчетные соотношения. Для дальнейших расчетов воспользуемся аналитическими выражениями, полученными авторами работы [9]. Согласно цитируемой публикации, при допущении об идентичности параллельных основного токопровода и заданного участка деформируемого металла, возбуждаемые токи

с учётом индукционных эффектов можно описать следующей зависимостью. Суммарный ток в основном токопроводе:

$$I_x^{(s)}(t) = I_m \left[j_t(t) - \left(\frac{4a}{\pi d} \right) \int_0^\infty \left(\frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} \right) \times \right. \\ \left. \times e^{-\alpha \frac{h}{d}} \sum_{k=0}^\infty \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left(\frac{dj_t(t)}{dt} \cdot e^{p_k t} \right) \alpha d \alpha \right] \quad (1)$$

где

$$G(\beta_k, \alpha) = \left[(1 - \cos \beta_k) + \left(\frac{\beta_k}{\alpha} \right) \right] \cdot \sin \beta_k;$$

$$\Phi(\beta_k, \alpha) = \cos \beta_k \cdot \left[\alpha^2 + 2\alpha - \beta_k^2 \right] + 2\beta_k \sin \beta_k \cdot [\alpha + 1];$$

δ_k – символ Кронекера; β_k – корни уравнения:

$$\operatorname{ctg} \beta_k = 0,5 \cdot \left(\frac{\beta_k}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta_k} \right); \quad p_k = - \left(\frac{1}{\mu_0 \gamma d^2} \right) \cdot (\beta_k^2 + \alpha^2),$$

$k = 0, \pm 1, 2, \dots$; $\left(\frac{dj_t(t)}{dt} \cdot e^{p_k t} \right)$ – свёртка функций.

Интегральная сила притяжения, возбуждаемая при взаимодействии идентичных однонаправленных параллельных токов для одинаковых проводников – основного токопровода и заданного участка листового металла, запишется в виде [5]:

$$F_{\text{attr}}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(I_x^{(s)}(t) \right)^2 \frac{l}{h}, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; l – длина проводника; h – расстояние между основным токопроводом и листовым металлом.

Численные оценки проведём для следующих исходных данных. Листовой металл – $d = 0,001$ м, $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ (Ом·м)⁻¹ (сталь). Основной токопровод выполнен из того же металла и той же толщины, что и обрабатываемый объект (рассматривается электродинамическая система «сталь – сталь»). Геометрия системы – $l = 0,06$ мм, $2a = 0,01 \dots 0,06$ м, $h = 0,002$ м, рабочая зона инструмента – область $l \times (2a)$. Основной токопровод и заданный участок обрабатываемого металла – параллельны и идентичны, так что в цепи каждого из них протекающие токи одинаковы.

Параметры токовых импульсов определяются характеристиками источника мощности – магнитно-импульсной установки МИУС-2 [2], разработанной и созданной в лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Максимальное напряжение на емкостном накопителе – $U = 2000$ В. Максимальная рабочая частота при подключении к непосредственно электрическому выходу МИУС-2 – $f_{\text{max}} = 7000$ Гц (относительный коэффициент затухания – $\delta/\omega = 0,3$). Рабочая частота в разрядном контуре установки – $f_p = 1000 \dots 1500$ Гц (относительный коэффициент затухания – $\delta/\omega = 0,3$) при ее подключении через согласующее устройство с коэффициентом передачи энергии в рабочую зону инструмента – $K \approx 4$. Магнитно-импульсная установка

МИУС-2 позволяет работать в 2-х режимах. Первый режим – генерирование экспоненциально затухающих (осциллирующих) токовых импульсов. Второй режим – генерирование токовых импульсов аperiodической (униполярной) временной формы. Следует отметить, что последний режим является более предпочтительным для практики, поскольку работа тиристорных коммутаторов указанной установки с униполярными сигналами характеризуется более длительным сроком их эксплуатации.

Вычисления проводились с помощью стандартного программного пакета «Wolfram Mathematica». Приближенный интервал изменения переменной интегрирования $\alpha \in [0; \alpha_{\max}]$ определяется функциональным видом Фурье-образа поперечного распределения возбуждающего тока. Для значений $\alpha \in [0; \alpha_{\max}]$ модуль функции распределения должен быть отличен от нуля. Как показали численные оценки по максимуму – $\alpha \in [0; 1]$. В общем случае расчётную зависимость $\beta_k = \beta_k(\alpha)$ можно аппроксимировать совокупностью последовательности линейных функций. Численные оценки показали, что для принятой геометрии основного токопровода (индуктора) вполне удовлетворительной представляется аппроксимация $\beta_k(\alpha)$ аналитической зависимостью: $\beta_k \approx \sqrt{2\alpha} + k \cdot \pi$, $k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$. Найденная зависимость $\beta_k = \beta_k(\alpha)$ подставляется в подынтегральное выражение зависимости (1).

Несобственные интегралы и суммы рядов в них вычисляются с помощью стандартных программ «NIntegrate» и «NSum». Суммирование в рядах выполняется для разного числа высших гармоник. Их учтённое количество полагается достаточным, если увеличение предельного значения « k » на единицу не приводит к результату, отличному от предыдущего более чем на 5...10 %. Корректировка интервала интегрирования $\alpha \in [0; \alpha_{\max}]$ производится для принятого априори условия $\alpha < \alpha_{\max}$ с помощью сравнения конечных результатов вычислений. Допускается их расхождение ~ 5...10 %.

Графики характерных расчётных зависимостей сгруппированы ниже по виду токовых импульсов, генерируемых магнитно-импульсной установкой.

Графические иллюстрации. В соответствии с возможностями источника мощности в части генерирования токовых сигналов различной временной формы численные оценки рассматриваемых параметров были выполнены вначале для осциллирующих токовых импульсов (рис. 2-5).

Вариант №1. Рабочая частота – $f = 7000$ Гц, напряжение – $U = 2000$ В, рабочая зона: $l \times (2a) = 0,06 \text{ м} \times 0,06 \text{ м}$.

Из результатов вычислений для высоких рабочих частот ($f = 7000$ Гц) следует, что в режиме осциллирующих импульсов возбуждающего тока максимум возможностей источника мощности соответствует максимум силы притяжения ~ 1000 Н. Переход к униполярному импульсу возбуждающего тока приводит к снижению амплитуды силы притяжения почти в ~ 2 раза, т.е. до ~ 500 Н.

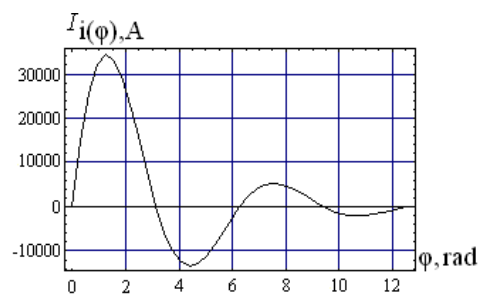


Рис. 2. Возбуждающий ток

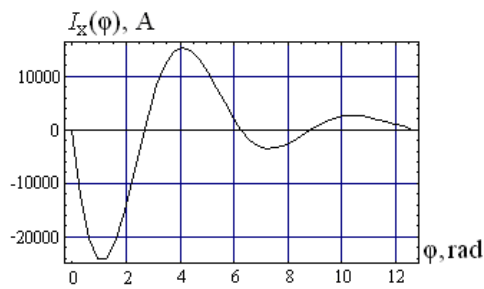


Рис. 3. Индуцированный ток

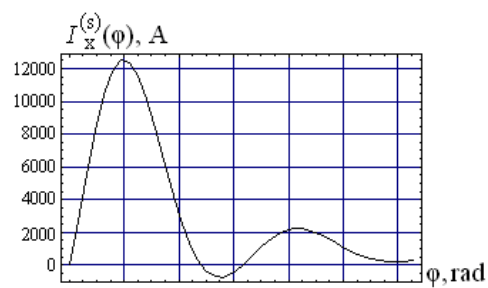


Рис. 4. Суммарный ток в цепи каждого из взаимодействующих проводников

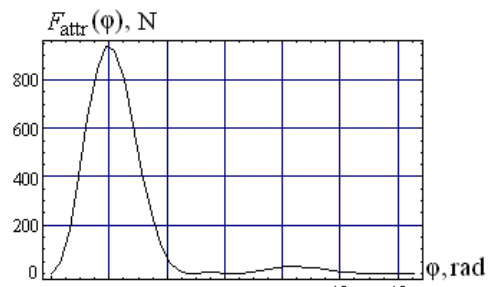


Рис. 5. Возбуждаемая сила притяжения

С физической точки зрения, причиной снижения силы притяжения при аperiodической форме возбуждающего тока можно считать уменьшение его временной длительности по сравнению с осциллирующим и экспоненциально затухающим гармоническим сигналом (см. рис. 2, где $\varphi \in [0, (4 \cdot \pi)]$). Это, очевидно, приводит к сокращению времени развития электродинамических процессов в обрабатываемом объекте. Все дальнейшие вычисления были проведены для униполярной формы возбуждающего тока, как более предпочтительной для практики (увеличение эксплуатационного срока тиристорных коммутаторов установки) (рис. 6-9).

Вариант №2. Рабочая частота – $f = 1500$ Гц, напряжение – $U = 2000$ В, рабочая зона: $l \times (2a) = 0,06 \text{ м} \times 0,06 \text{ м}$.

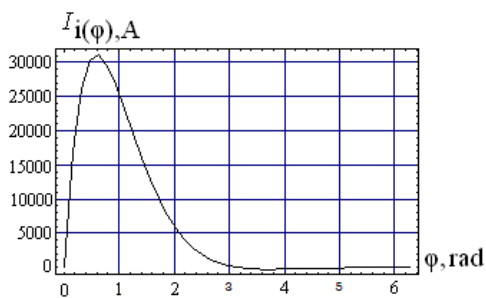


Рис. 6. Возбуждающий ток

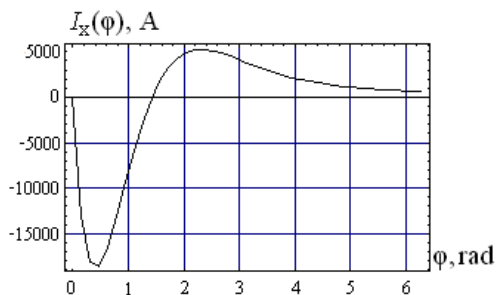


Рис. 7. Индуцированный ток

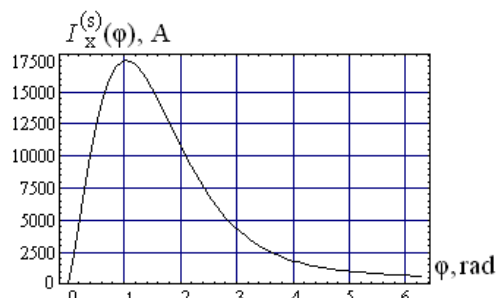


Рис. 8. Суммарный ток в цепи каждого из взаимодействующих проводников системы

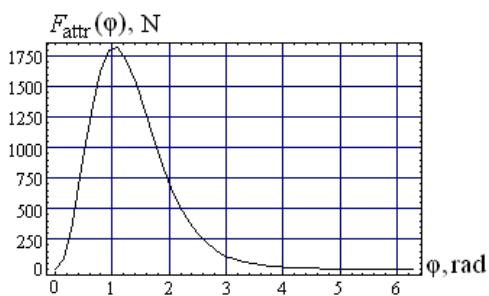


Рис. 9. Возбуждаемая сила притяжения

Из результатов вычислений для низких рабочих частот ($f = 1500$ Гц) следует, что:

- максимуму возможностей источника мощности соответствует максимум силы притяжения ~ 1800 Н, что примерно в 2 раза превышает аналогичный максимум для высоких частот ($f = 7000$ Гц) возбуждающего тока;
- с физической точки зрения, причиной увеличения сил притяжения при снижении рабочих частот можно считать интенсификацию процессов проникновения возбуждаемых полей в металл заготовки и инструмент, что и приводит к увеличению напряжённостей магнитного поля с внешней стороны проводников системы и, соответственно, к росту сил магнитного давления на них извне.

Выводы.

1. Рассчитаны амплитудно-временные зависимости характеристик электромагнитных процессов в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения листовых металлов с низкой удельной электропроводностью при интенсивном проникновении возбуждаемых магнитных полей в проводящие элементы инструментов и обрабатываемых объектов.

2. Установлено, что переход к низким рабочим частотам возбуждающих токов позволяет существенно увеличить амплитуды сил притяжения металла (например, при $f = 1,5$ кГц силовые показатели для обрабатываемой стали возрастают примерно в 2 раза по сравнению со случаем, когда $f = 7$ кГц).

3. Показано, что физической причиной увеличения сил притяжения при снижении рабочих частот можно считать интенсификацию процессов проникновения возбуждаемых полей сквозь металл инструмента и обрабатываемой заготовки, что приводит к росту сил магнитного давления на проводники извне.

Работа проводилась кафедрой физики ХНАДУ в рамках Научного исследования «Энергосберегающие малозатратные технологии питания и ремонта транспортных средств» №08-53-19, финансируемого Министерством образования и науки Украины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – vol.211. – no.5. – pp.787-829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
2. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review // Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – no.5. – pp. 35-39. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.05.
3. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport // International journal of automotive and mechanical engineering. – 2017. – vol.14. – no.4. – pp. 4649-4664. doi: doi:10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366.
4. Welcome to BETAG Innovation [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.betaginnovation.com>.
5. Бондаренко А.Ю. Финкельштейн В.Б., Гаврилова Т.В. Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – 2014. – №9(1052). – С. 66-72.
6. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Estimating the limit possibilities of the step charging system for capacitive energy storage // Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – no.2. – pp. 35-37. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.06.
7. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сильных токов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1992. – 413 с.
8. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Расчёт полей и токов в индукторной системе с притягивающим экраном и дополнительным витком как инструмента рихтовки // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 57-62. doi: 10.20998/2074-272X.2015.1.11.
9. Батыгин Ю.В., Еремина Е.Ф., Чаплыгин Е.А., Стрельникова В.А. Электродинамические процессы в инструментах магнитно-импульсного притяжения при «прямом пропускании тока» через обрабатываемый металл // Вісник НТУ «ХП». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2019. – №8(1333). – С. 207-213.

10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Т.8, Изд. 4-е. – М.: Физматлит, 2005. – 656 с.

REFERENCES

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol.211, no.5, pp.787-829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
2. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.5, pp. 35-39. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.05.
3. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International journal of automotive and mechanical engineering*, 2017, vol.14, no.4, pp. 4649-4664. doi: 10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366.
4. *Welcome to BETAG Innovation*. Available at: <http://www.betaginnovation.com> (accessed 17 June 2018).
5. Bondarenko A.Yu., Finkelishteyn V.B., Gavrilova T.V. External straightening basket of the motor transport by means of electro dynamic of the systems at direct drive pulsed current. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Car- and tractorbuilding*, 2014, no.9(1052), pp. 66-72. (Rus).
6. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Estimating the limit possibilities of the step charging system for capacitive energy storage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp. 35-37. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.06.
7. Shneerson G.A. *Polja i perehodnye processy v apparature sil'nyh tokov. 2-e izd., pererab. i dop.* [Fields and transients in the equipment of strong currents. 2nd edition]. Moscow, Energoizdat Publ., 1992. 413 p. (Rus).
8. 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. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 57-62. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.1.11.
9. Batygin Yu.V., Yeryomina O.F., Chaplygin E.A., Strelnikova V.A. Electrodynamics processes in instruments of magnetic pulse attract at «direct current passing» through the handled metal. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*, 2019, no.8(1333), pp. 207-213. (Rus).
10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnyh sred T. 8* [Continuum Electrodynamics. Vol.8]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 656 p. (Rus).

Поступила (received) 16.04.2019

Батыгин Юрий Викторович¹, д.т.н., проф.,
Чаплыгин Евгений Александрович¹, к.т.н., доц.,
Шиндерук Светлана Александровна¹, к.т.н., доц.,
Стрельникова Виктория Анатольевна¹, аспирант,
¹ Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25,
тел/phone +380 57 7003852,
e-mail: yu.v.batygin@gmail.com; chaplygin.e.a@gmail.com;
s.shinderuk.2016102@ukr.net; v.strelnikova91@gmail.com

Yu.V. Batygin¹, E.A. Chaplygin¹, S.A. Shinderuk¹, V.A. Strelnikova¹
¹ Kharkiv National Automobile and Highway University,
25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: Low electrical conductance metals.

Purpose. The electrodynamic processes study in the linear tools of magnetic-pulsed attraction, the final result of which should be the physics-mathematical dependencies for the characteristics of the flowing processes, under the conditions of intensive penetration in metal of acting electromagnetic fields, as well as numerical estimates of these processes main characteristics. **Methodology.** To carry out research, we used the fundamental statements of the electromagnetic field theory and the mathematical simulation with help of the standard codes from the Wolfram Mathematica package. **Results.** The functional dependencies for the space-temporal distributions of the currents and forces excited in the linear tools of magnetic-pulsed attraction under intensive penetration of the acting electromagnetic fields through the tool's conducting construction elements are used for the numerical estimates. From the calculation results it follows that from a physical point of view, the cause of the increase in attractive forces while decreasing the operating frequencies can be considered the intensification of penetration processes of the excited fields, which leads to increasing the magnetic pressure from the outside. Thus, the transition to low operating frequencies of the exciting currents can significantly increase the efficiency of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals with the linear tools. **Originality.** It was firstly determined that from the physical point of view, the reason for the increase in attractive forces with a decrease in operating frequencies can be considered the intensification of penetration processes of the excited fields, which leads to increasing the forces of magnetic pressure on the conductors from side of their external surfaces. **Practical value.** A usage of the obtained results will allow creating new, more efficient linear tools of magnetic-pulsed attraction of the low-electrical conduction sheet metals operating under conditions of intensive penetration of the electromagnetic fields being excited. References 10, figures 9.

Key words: linear tool for eliminating dents in sheet conductors, intensive penetration of the field into metals with low electrical conductance, magnetic-pulse attraction of conductors with unidirectional currents.