

References

1. Diell, H. Lösungsansatz zur mathematischen Modellierung der Kapazitätsbilanzierung für diskontinuierliche Umschlagprozesse [Text] / H. Diell // Hebezeuge und Fördertechnik. — 1987. — V. 27, № 2. — P. 44–45.
2. Botnariuk, M. V. Metodolohiia formirovaniia transportnoho uzla kak instituta setevykh partnerskikh otnoshenii [Tekst] / M. V. Botnariuk // Sovremennaia konkurentsia. — 2012. — № 3(38). — S. 98–110.
3. Bird, J. H. Seaports and Seaport Terminals [Text] / J. H. Bird. — London: Hutchinson, 1971. — 240 p.
4. Carbone, V. The changing role of ports in supply-chain management: an empirical analysis [Text] / V. Carbone, M. De Martino // Maritime Policy & Management. — 2003. — № 30(4). — P. 305–320. — Available at: \www/URL: DOI:10.1080/0308883032000145618.
5. Ritchey, T. Scenario Development and Risk Management using Morphological Field Analysis [Text] / T. Ritchey // Proceedings of the 5th European Conference on Information Systems. — Cork: Cork Publishing Company, 1997. — Vol. 3. — P. 1053–1059.
6. Zwicky, F. Discovery, Invention, Research: Through the Morphological Approach [Text] / F. Zwicky. — Toronto: The Macmillan Company, 1969. — 276 p.
7. Dorigo, M. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents [Text] / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics. — 1996. — Vol. 26, No. 1. — P. 29–41. — Available at: \www/URL: DOI: 10.1109/3477.484436.
8. Krishnaiyer, K. Ant algorithms: Review and future applications [Text] / K. Krishnaiyer, S. H. Sheragh // IERC'02, Industrial Engineering Research Conference, Orlando, USA, may 2002. — Available at: \www/URL: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.86.8976.
9. Kurenkov, P. V. Upravlenie dostavkoi v vneshnetorhovykh hruzov v smeshannom soobshchenii [Tekst] : dis. ... d-ra ekon. Nauk / P. V. Kurenkov. — M.: HUU, 1999. — 478 s.
10. Khoar, N. Vzaimodeistviushchie posledovatel'nye protsessy [Tekst]: per. s anhl. / N. Khoar. — M.: Mir, 1989. — 264 s.
11. Milner, R. A Calculus of Communicating Systems, Lecture Notes in Computer Science 92 [Text] / R. Milner. — Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1980. — 171 p. — ISBN 3-540-10235-3.
12. Klepikov, V. P. Metodolohiia kompleksnoho rozvitiia transportnykh sistem v proektakh vzaimodeistviia zheleznodorozhnoho i morskoho transporta [Tekst]: dis. ... d-ra tekhn. nauk / V. P. Klepikov. — M.: MHUPS (MIIT), 2007. — 352 s.
13. Sychev, A. A. Orhanizatsiia raboty transportnoho uzla v sostave transportnoho koridora [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk / A. A. Sychev. — Rostov-na-Donu: RHUPS, 2009. — 167 s.
14. Hordon, Ya. Kh. Marketinh partnerskikh otnoshenii. Ser.: Marketinh dlia professionalov [Tekst]: per. s anhl. / Ya. Kh. Hordon. — SPb.: Piter, 2001. — 379 s.
15. Andreev, S. S. Teoriia sotsial'noho upravleniia: subiekt i obiekt sotsial'noho upravleniia [Tekst] / S. S. Andreev // Sotsial'no-humanitarnye znaniia. — 2001. — № 1. — S. 80–96.
16. Lius, R. Ihry i resheniia [Tekst] / R. Lius, Kh. Raifa. — M.: Izd-vo inostr. lit., 1961. — 642 s.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕВАЛКИ ГРУЗОВ В ОБЩЕТРАНСПОРТНЫХ УЗЛАХ

В статье предложен оригинальный подход к обеспечению согласованного управления транспортными узлами, основанный на сочетании методологии классической науки оптимального управления и конструктивных идей прогрессирующих в настоящее время новых концепций делового поведения и социального управления. При этом установлено, что реализацию предлагаемого подхода необходимо осуществлять в два этапа: вначале необходимо согласовать параметры процесса перевалки грузов, а затем обеспечить осуществление этого процесса в оптимальном режиме.

Ключевые слова: транспортный узел, перевалка грузов, оптимальное управление, партнерское взаимодействие, оптимизация грузоперевалки.

Мурад'ян Арсен Олегович, ассистент, кафедра експлуатації морських портів, Одеський національний морський університет, Україна, e-mail: fhcty1@rambler.ru.

Мурад'ян Арсен Олегович, ассистент, кафедра експлуатації морських портів, Одеський національний морський університет, Україна.

Muradian Arsen, Odessa National Maritime University, Ukraine, e-mail: fhcty1@rambler.ru

УДК 621.318

**Далека В. Ф.
Бондаренко А. Ю.,
Степанов А. А.**

РАСЧЕТ ДВУХЧАСТОТНЫХ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ — ИНСТРУМЕНТОВ ВНЕШНЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ

В статье проведен расчет инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки кузовных элементов автомобилей. Получены основные аналитические зависимости для расчета напряженностей электрических и магнитных полей, возбуждаемых с помощью рассматриваемой двухчастотной индукторной системы. Достоверность полученных результатов подтверждена проведенными предельными переходами к известным классическим закономерностям.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, индукторная система, инструмент рихтовки, магнитно-импульсная рихтовка, автомобильные кузова.

1. Введение

Разработки технических систем для выравнивания заданных участков на поверхности тонкостенных листовых металлов инициированы, в первую очередь, спро-

сом на выполнение операций по реставрации кузовных покрытий автомобилей и корпусов самолетов. Причем, как показывает практика, до 80 % повреждений приходится на небольшие и средние повреждения. Половина из них — это вмятины, не требующие замены

всего элемента и устраняемые рихтовкой. Более 50 % таких повреждений составляют зоны с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом — двери, капоты, крыши, пороги, арки, задние части хэчбэков, купе, боковины микроавтобусов, корпусные элементы самолетов. В этой связи особый интерес представляют устройства, позволяющие произвести, так называемую, внешнюю рихтовку без разборки кузова и возможного нарушения защитного лакокрасочного покрытия [1, 2].

Актуальность работы. С каждым годом в мире огромными темпами растет количество автомобилей. Украина занимает 65 место в общемировом рейтинге по количеству автомобилей на душу населения, имея показатель в 98 машин на 1000 населения. Но, к сожалению, вместе с ростом количества автотранспортных средств, растет и количество ДТП с их участием, в которых, в той или иной степени, но обязательно повреждаются панели кузовных элементов автомобилей. Помимо аварийных ситуаций, появление вмятин на кузовных панелях автотранспорта обусловлено и рядом других причин. Например, град, неудачная парковка, камни из под колес впереди идущих машин. Поэтому, операции связанные с ремонтом и реставрацией кузовных панелей автомобилей являются весьма актуальными и пользуются все большим спросом.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Достаточно перспективными и реальными для практики внешней реставрации повреждений в элементах кузовов автомобилей и корпусов самолетов представляются разработки с использованием энергии электромагнитных полей. В этой области на протяжении последних 35–40 лет передовые позиции занимают фирмы США «Boeing», «Electroimpact», «Fluxtronic».

Физическая сущность их предложений сводится к использованию «медленного» и «быстрого» магнитных полей.

Так, при медленном нарастании магнитное поле легко проникает сквозь металлический лист. В определенный момент времени включается поле, «быстро» нарастающее до амплитудного значения и направленное противоположно по отношению к первоначальному «медленному» полю. Пространственно-временная суперпозиция этих полей приводит к тому, что результирующая амплитуда над листовым металлом резко падает, а под ним остается неизменной. Сила давления будет направлена к индукторам. Имеет место магнитно-импульсное притяжение листового металла [3–5].

На практике, «медленное» и «быстрое» магнитные поля возбуждаются с помощью «двухчастотной индукторной системы», включающей два плоских многовитковых соленоида с импульсными токами низкой и высокой частот, соответственно. Отдельные аспекты действенности такой системы были исследованы автором работы [6].

Цель работы — получение расчетных соотношений для напряженности поля, возбуждаемого в двухчастотных индукторных системах — инструментах внешней магнитно-импульсной рихтовки вметаллических покрытиях автомобильных кузовов.

3. Предмет исследования

Конструктивно, такие системы включают два плоских соленоида — катушечных индукторов, расположенных

друг над другом параллельно поверхности листового металла. Их обмотки подсоединены к отдельным источникам мощности, генерирующим импульсы тока различной частоты. Одним из вопросов эффективности индукторных систем рассматриваемого принципа действия является вопрос о пространственно-временном распределении напряженности результирующего магнитного поля в области вмятины на листовом металле — обрабатываемой заготовке.

4. Результаты исследования двухчастотной индукторной системы — инструмента магнитно-импульсной рихтовки

Для успешной реальной рихтовки необходима обязательная концентрация и однородность поля в области расположения вмятины. Естественно, что, как результат суперпозиции, суммарная напряженность будет обладать требуемой амплитудой и степенью однородности только в какой-то ограниченной зоне на листовой заготовке. Причем эта зона может не совпадать с геометрическим центром системы. Тогда в практике реальной рихтовки инструмент необходимо смещать относительно вмятины таким образом, чтобы последняя попадала в периферийную область магнитного поля, где напряженность однородна и достигает требуемой величины.

В конечном итоге, эффективность силового воздействия будет определяться характеристиками электромагнитных процессов, устанавливаемыми положением именно рабочей зоны рассматриваемого инструмента силового воздействия.

При решении поставленной задачи воспользуемся простейшей расчетной моделью на рис. 1, допускающей интегрирование уравнений Максвелла в цилиндрической системе координат $\{r, \varphi, z\}$ с началом на поверхности листового металла со стороны индукторов в геометрическом центре принятой модели (r — радиус, φ — полярный угол, z — аппликата). Определение характеристик электромагнитных процессов проведем аналогично работам [6, 7] с привлечением классического аппарата интегрирования уравнений математической физики [8–10].

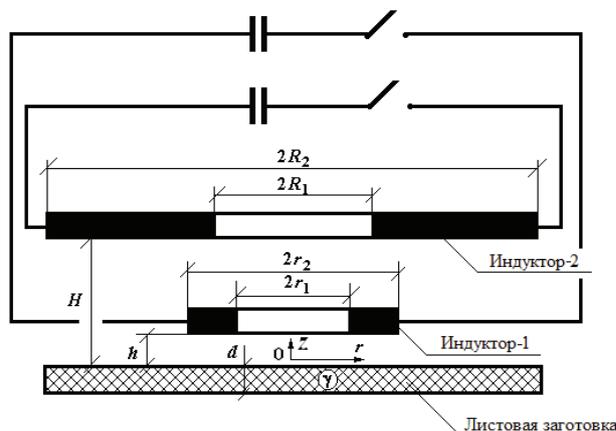


Рис. 1. Расчетная модель двухчастотной индукторной системы — инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки

Алгоритм решения поставленной задачи разделим на две части:

Первая часть. Предполагается вычисление напряженности поля, генерируемой произвольным одиночным

плоским соленоидом — индуктором, произвольно расположенным над металлическим листом. Временные характеристики процессов не конкретизируются и задаются в общем виде. Пусть это будет индуктор-1 на рис. 1.

Вторая часть. Исходя из полученных результатов, следует записать уже два выражения для напряженностей полей, генерируемых соленоидом — индукторами с фиксированными геометрией, положением и частотами возбуждающих токов. Просуммировав их, можно найти результат суперпозиции. Последний даст ответ на поставленный вопрос о пространственно-временной зоне концентрации и однородности напряженности в системе с двумя индукторами — источниками магнитного поля.

4.1. Напряженность магнитного поля одиночного соленоида. Примем следующие допущения:

— Рассматривается взаимодействие электромагнитного поля с листовым металлом толщиной d и удельной электропроводностью γ .

— Имеет место аксиальная симметрия относительно оси OZ и в соответствующей системе координат $\partial/\partial\varphi=0$ (φ — полярный угол).

— Толщина катушки пренебрежимо мала, так что ее металл «прозрачен» для действующих электромагнитных полей.

— В катушке с равномерной намоткой (число витков — w) течет ток $i(t)$, временные параметры которого таковы, что в расчетах вполне приемлемо известно условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов, таких что $\frac{\omega}{c} \cdot \ell \ll 1$ (здесь ω — циклическая частота процесса, c — скорость света в вакууме, ℓ — наибольший характерный геометрический размер системы).

Уравнения Максвелла для возбуждаемых в рассматриваемой системе составляющих вектора электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учетом нулевых начальных условий, имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p,r,z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p,r,z)}{\partial r} = j_\varphi(p,r,z) + (p\varepsilon_0 + \gamma)E_\varphi(p,r,z); & (1) \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r \cdot E_\varphi(p,r,z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p,r,z); & (2) \\ \frac{\partial E_\varphi(p,r,z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p,r,z), & (3) \end{cases}$$

где p — параметр преобразования Лапласа; $j_\varphi(p,r,z)$ — плотность стороннего тока в катушке;

$$j_\varphi(p,r,z) = j(p) \cdot (\eta(r-R_1) - \eta(r-R_2)) \cdot \delta(z-h);$$

$$j(p) = \frac{I(p) \cdot w}{(R_2 - R_1)}; \quad I(p) = L\{I(t)\};$$

$\eta(r)$ и $\delta(z)$ — ступенчатая и импульсная функции, соответственно;

$$E_\varphi(p,r,z) = L\{E_\varphi(t,r,z)\}; \quad H_{r,z}(p,r,z) = L\{H_{r,z}(t,r,z)\}.$$

Из дифференциальных уравнений (1)–(3) с учетом принятых допущений можно получить уравнения для азимутальной компоненты напряженности электрического поля — $E_\varphi(p,r,z)$ в областях с однородными электрофизическими характеристиками:

а) над листовой заготовкой, $z \geq 0$,

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p,r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p,r,z)) \right) \approx \mu_0 p j_\varphi(p,r,z); \quad (4)$$

б) в металле заготовки, $z \in [-d, 0]$,

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p,r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p,r,z)) \right) - (p \cdot \gamma \cdot \mu_0) E_\varphi(p,r,z) = 0; \quad (5)$$

в) под листовой заготовкой, $z \leq -d$,

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p,r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p,r,z)) \right) \approx 0. \quad (6)$$

Условию ограниченности радиального распределения $E_\varphi(p,r,z)$ в уравнениях (4)–(6) при $r=0$ и $r=\infty$ удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя:

$$E_\varphi(p,r,z) = \int_0^\infty E_\varphi(p,\lambda,z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (7)$$

где $J_1(\lambda \cdot r)$ — функция Бесселя первого порядка.

В соответствии с (7) уравнения (4)–(6) приводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям второго порядка:

а) $z \geq 0$,

$$\frac{d^2 E_\varphi(p,\lambda,z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_\varphi(p,\lambda,z) = \mu_0 \cdot p \cdot j_\varphi(p,\lambda,z), \quad (8)$$

где $j_\varphi(p,\lambda,z)$ — Фурье-Бесселево изображение плотности стороннего тока,

$$j_\varphi(p,\lambda,z) = \int_0^\infty j_\varphi(p,r,z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot r \cdot dr = j(p) \cdot f(\lambda) \cdot \delta(z-h),$$

$$\begin{aligned} f(\lambda) &= \int_0^\infty (\eta(r-R_1) - \eta(r-R_2)) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot r \cdot dr = \\ &= \frac{F(\lambda \cdot R_1) - F(\lambda \cdot R_2)}{\lambda^2}, \quad F(x) = \int_0^x x \cdot J_1(x) dx; \end{aligned}$$

б) $z \in [-d, 0]$,

$$\frac{d^2 E_\varphi(p,\lambda,z)}{dz^2} - (\lambda^2 + p \cdot \mu_0 \cdot \gamma) \cdot E_\varphi(p,\lambda,z) = 0, \quad (9)$$

в) $z \leq -d$,

$$\frac{d^2 E_\varphi(p,\lambda,z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_\varphi(p,\lambda,z) = 0. \quad (10)$$

Уравнение (8) для Фурье-Бесселевого образа напряженности электрического поля $E_\varphi(p,\lambda,z)$ в области, где $z \geq 0$, перепишем в виде, более удобном для последующего интегрирования:

$$\frac{d^2 E_\varphi(p,\lambda,z)}{dz^2} - \lambda^2 E_\varphi(p,\lambda,z) = K(p,\lambda) \cdot \delta(z-h), \quad (11)$$

где $K(p,\lambda) = \mu_0 \cdot p \cdot j(p) \cdot f(\lambda)$.

Общий интеграл неоднородного дифференциального уравнения (11) можно записать в виде:

$$E_{\phi}^{(1)}(p, \lambda, z) = C_1(p, \lambda)e^{\lambda z} + C_2(p, \lambda)e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \operatorname{sh}(\lambda(z-h))\eta(z-h), \quad (12)$$

где $C_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования.

Одну из постоянных интегрирования в (12) можно найти из условия ограниченности решения при $z \rightarrow \infty$, то есть $\lim_{z \rightarrow 0} E_{\phi}^{(1)}(p, r, z) = 0$.

Выполняя предельный переход в выражении (12), находим, что:

$$C_1(p, \lambda) = -\frac{K(p, \lambda)}{2 \cdot \lambda} \cdot e^{-\lambda h}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), получаем, что:

$$E_{\phi}^{(1)}(p, \lambda, z) = C_2(p, \lambda)e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} (\operatorname{sh}(\lambda(z-h))\eta(z-h) - 0,5e^{\lambda(z-h)}). \quad (14)$$

Из уравнения (9) находим напряженность электрического поля в металле листовой заготовки ($z \in [-d, 0]$):

$$E_{\phi}^{(2)}(p, \lambda, z) = D_1(p, \lambda) \cdot e^{qz} + D_2(p, \lambda) \cdot e^{-qz}, \quad (15)$$

где q – волновое число в металле, $q = \sqrt{\lambda^2 + (p \cdot \mu_0 \cdot \gamma)}$, $D_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования.

Для свободного пространства под заготовкой, где $z \leq -d$, из уравнения (10) получаем решение, удовлетворяющее условию ограниченности при $z \rightarrow -\infty$:

$$E_{\phi}^{(3)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{\lambda z}, \quad (16)$$

где $B(p, \lambda)$ – произвольная постоянная интегрирования.

С помощью уравнения (3) и выражений (13)–(15) находим тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля в выделенных областях:

а) $z \geq 0$,

$$H_r^{(1)}(p, r, z) = -\frac{\lambda}{p\mu_0} \times \left[C_2(p, \lambda)e^{-\lambda z} - \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} (\operatorname{ch}(\lambda(z-h))\eta(z-h) - 0,5e^{\lambda(z-h)}) \right], \quad (17)$$

б) $z \in [-d, 0]$,

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{q}{p\mu_0} [D_1(p, \lambda) \cdot e^{qz} - D_2(p, \lambda) \cdot e^{-qz}], \quad (18)$$

в) $z \leq -d$,

$$H_r^{(3)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p\mu_0} \cdot B(p, \lambda) \cdot e^{\lambda z}. \quad (19)$$

Неизвестные произвольные постоянные интегрирования в выражениях (14)–(19) для напряженности электрических и магнитных полей можно определить

из условий их непрерывности на границах раздела выделенных областей:

$$\begin{cases} E_{\phi}^{(1)}(p, \lambda, z=0) = E_{\phi}^{(2)}(p, \lambda, z=0); \\ E_{\phi}^{(2)}(p, \lambda, z=-d) = E_{\phi}^{(3)}(p, \lambda, z=-d); \\ H_r^{(1)}(p, r, z=0) = H_r^{(2)}(p, r, z=0); \\ H_r^{(2)}(p, r, z=-d) = H_r^{(3)}(p, r, z=-d). \end{cases} \quad (20)$$

Подставляя в (20) соответствующие выражения, можно прийти к алгебраической системе уравнений, из которой находим неизвестные произвольные постоянные $B(p, \lambda)$ и $C_2(p, \lambda)$ в выражениях для напряженности магнитного поля над листовой металлической заготовкой и под ней.

Подставим их в формулы (17) и (19). Зафиксируем координаты на поверхности листового металла $z=0$ и $z=-d$.

После необходимых математических преобразований получаем формулы для напряженности магнитного поля на внутренней и внешней поверхностях обрабатываемой металлической листовой заготовки.

Вместо $K(p, \lambda)$ подставим соответствующую зависимость из (11).

В конечном итоге находим, что:

$$H(p, \lambda, z=0) = -j(p)f(\lambda)e^{-\lambda h} \frac{\operatorname{sh}(qd) + \left(\frac{\lambda}{q}\right) \operatorname{ch}(qd)}{2\left(\frac{\lambda}{q}\right) \operatorname{ch}(qd) + \left[1 + \left(\frac{\lambda}{q}\right)^2\right] \operatorname{sh}(qd)}, \quad (21)$$

$$H(p, \lambda, z=-d) = H(p, \lambda, z=0) \cdot S(q, \lambda), \quad (22)$$

где $S(q, \lambda)$ – коэффициент экранирования поля металлом листовой заготовки,

$$S(q, \lambda) = \frac{(\lambda/q)}{\operatorname{sh}(qd) + (\lambda/q) \cdot \operatorname{ch}(qd)}.$$

4.2. Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных формул (21) и (22) легко проверить предельными переходами к хорошо известным физическим ситуациям.

Пусть обрабатываемый металл обладает идеальной проводимостью, $\gamma \rightarrow \infty$, что реально соответствует отсутствию процессов проникновения.

Тогда из выражения (21) получаем, что:

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow \infty} H(p, \lambda, z=0) &= \\ &= -\lim_{\gamma \rightarrow \infty} j(p)f(\lambda)e^{-\lambda h} \frac{\operatorname{sh}(qd) + \left(\frac{\lambda}{q}\right) \operatorname{ch}(qd)}{2\left(\frac{\lambda}{q}\right) \operatorname{ch}(qd) + \left[1 + \left(\frac{\lambda}{q}\right)^2\right] \operatorname{sh}(qd)} = \\ &= \left\| \lim_{\gamma \rightarrow \infty} q = \infty \right\| = -j(p) \cdot f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}. \end{aligned} \quad (23)$$

Аналогичным образом, из формулы (22) находим:

$$\lim_{\gamma \rightarrow \infty} H(p, \lambda, z = -d) = -\lim_{\gamma \rightarrow \infty} H(p, \lambda, z = 0) \cdot S(p, \lambda) = 0. \quad (24)$$

Конечный результат формулы (23) представляет собой хорошо известное распределение напряженности магнитного поля по поверхности идеально проводящей плоской заготовки. Фактически, это плотность возбуждающего стороннего тока в пространстве изображений по Фуре-Бесселю, амплитуда которого экспоненциально убывает по мере приближения к обрабатываемой заготовке.

Как видно из (24), идеально проводящий слой полностью экранирует магнитное поле источника-индуктора от внешнего свободного полупространства.

Следующая легко прогнозируемая физическая ситуация: металлический лист очень тонкий, $d \rightarrow 0$.

Выполняя соответствующие предельные переходы в выражениях (21) и (22), приходим к следующим результатам:

$$\lim_{d \rightarrow 0} H(p, \lambda, z = 0) = -j(p) \cdot f(\lambda) \cdot \frac{e^{-\lambda h}}{2}, \quad (25)$$

$$\lim_{d \rightarrow 0} H(p, \lambda, z = -d) = -j(p) \cdot f(\lambda) \cdot \frac{e^{-\lambda h}}{2}. \quad (26)$$

Сравнение выражений (25) и (26) показывает, что в рассматриваемой ситуации обрабатываемая листовая заготовка не оказывает никакого экранирующего действия. Напряженность магнитного поля на ее внешней и внутренней поверхностях одинакова.

4.3. Напряженность магнитного поля в системе с двумя соленоидами. Выражения (21) и (22) являются базовыми для проведения дальнейших вычислений. Для получения искомым пространственно-временных зависимостей необходимы строгие, но достаточно громоздкие обратные интегральные преобразования. Эти математические операции можно упростить, исходя из адекватных физических представлений о характере протекающих электромагнитных процессов.

Предварительно, с помощью разного рода предельных переходов, выделим физические ситуации, наиболее интересные для практики, и оценим значения характерных параметров системы, при которых данные ситуации могут быть реализованы.

5. Выводы

Для эффективной рихтовки требуется обязательная концентрация и однородность поля в области расположения вмятины. Естественно, что, как результат суперпозиции, суммарная напряженность будет обладать требуемой амплитудой и степенью однородности только в какой-то ограниченной зоне на листовой заготовке. Причем эта зона может не совпадать с геометрическим центром системы.

В работе получены расчетные соотношения для напряженности поля, возбуждаемого в двухчастотных индукторных системах — инструментах внешней магнитно-импульсной рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов. Это позволяет решать вопросы пространственно-временного распределе-

ния напряженности результирующего магнитного поля в области вмятины на листовом металле, т. е. повышать эффективность индукторных систем, что является основным направлением в проектировании специальных устройств.

Литература

1. Бажинов, А. В. Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности [Текст] / А. В. Бажинов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин // Автомобильный транспорт. — Харьков: ХНАДУ, 2005. — Вып. 16. — С. 349–353.
2. Pat. 3,998,081 USA, B21D 26/14. Electromagnetic dent puller [Text] / Hansen K. A., Hendrickson G. I.; The Boeing Company, Seattle, Wash. — № 489,290; appl. 17.07.1974; publ. 21.12.1976.
3. Electromagnetic Dent Removal [Electronic resource]. — 2009. — Available at: \www/URL: http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp.
4. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover [Electronic resource]. — 2009. — Available at: \www/URL: http://www.fluxtronic.com/product.php.
5. Бондаренко, А. Ю. Электромагнитные процессы в плоской индукторной системе с двумя катушками при равномерном распределении в ней поверхностных токов [Текст] / А. Ю. Бондаренко // Электротехника і електромеханіка. — 2012. — № 3. — С. 61–65.
6. Батыгин, Ю. В. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов, Т. 2. [Текст] / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский. — Харьков: МОСТ-Торнадо, 2002. — 288 с.
7. Мэтьюз, Дж. Математические методы физики [Текст] / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер; пер. с англ. В. П. Крайнова. — М.: Атомиздат, 1972. — 399 с.
8. Батыгин, Ю. В. Расчет электродинамических процессов в согласующем устройстве цилиндрического типа с двумя разомкнутыми вторичными витками [Текст] / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, И. С. Трунова // Вестник ХНАДУ. — 2012. — Вып. 56. — 288 с.
9. Гнатов, А. В. Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном и тонкостенной листовой заготовкой [Текст] / А. В. Гнатов // Электротехніка і електромеханіка. — 2009. — № 6. — С. 46–49.
10. Батыгин, Ю. В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора [Текст] / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Шиголева // Электричество. — 2013. — № 9. — С. 23–27.

РОЗРАХУНОК ДВОЧАСТОТНИХ ІНДУКТОРНИХ СИСТЕМ — ІНСТРУМЕНТІВ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КУЗОВІВ

У статті проведено розрахунок інструменту зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування кузовних елементів автомобілів. Отримано основні аналітичні залежності для розрахунку напруг електричних і магнітних полів, що збуджуються за допомогою розглянутої двочастотної індукторної системи. Достовірність отриманих результатів підтверджена проведеними граничними переходами до відомих класичних закономірностей.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, індукторна система, інструмент рихтування, магнітно-імпульсне рихтування, автомобільні кузова.

Далека Василь Фомич, доктор технічних наук, професор, кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет городского хозяйства ім. А. Н. Бекетова, Україна. Бондаренко Александр Юрьевич, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, кафедра інженерної електрофізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Степанов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина.

Далека Василь Хомич, доктор технических наук, профессор, кафедра электричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Україна.

Бондаренко Александр Юрійович, кандидат технических наук, старший науковий співробітник, доцент, кафедра інженерної електрофізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Степанов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина.

Daleka Vasyly, Kharkiv National University Municipal Economy named after A. M. Beketov, Ukraine.

Bondarenko Alexander, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Stepanov Alexander, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

УДК 537.523.9

**Білінський Й. Й.,
Павлюк О. А.,
Юкиш С. В.**

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ РІДИННОФАЗНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ГАЗОРОЗРЯДНІЙ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Запропоновано метод визначення малих концентрацій загальної мінералізації рідиннофазного об'єкта шляхом отримання спектрів випромінювання при газорозрядній візуалізації. Розроблено експериментальну установку для дослідження спектрів, в якій одночасно досліджуються два рідиннофазні об'єкти. Отримано спектри випромінювання розчинів солей NaCl, MgSO₄, KCl, CaCl₂, FeSO₄, виявлено характерні спектральні лінії для них.

Ключові слова: газорозрядна візуалізація, рідиннофазний об'єкт, спектр випромінювання, лінійчатий спектр, характерна спектральна лінія.

1. Вступ

В Україні існує проблема експрес-контролю домішок у воді (рідиннофазному об'єкті (РФО)), зокрема мінералізації в системах централізованого питного постачання. Існуючі методи дослідження РФО базуються на хімічному аналізі, фото та колориметрії, гравіметрії, спектроскопії, кондуктометрії. Для визначення загальної мінералізації найчастіше використовуються методи, що базуються на вимірюванні електроопору, але це не дозволяє з достатньою точністю визначати малі значення загальної мінералізації РФО, інші методи хоч і дозволяють отримати вищу точність, потребують більших витрат часу або дорогого обладнання [1–3]. Таким чином, існує необхідність у створенні методу, який дозволить підвищити точність визначення загальної мінералізації при малих витратах часу та за допомогою недорогого обладнання.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Одним з перспективних методів аналізу РФО є газорозрядна візуалізація (ГРВ) — це плазмове світіння на поверхні предметів, до яких прикладена змінна напруга з частотою у межах 10–100 кГц та напругою у межах 3–30 кВ [4]. Цей метод не потребує попередньої підготовки РФО та є практично миттєвим. При ГРВ до досліджуваного об'єкта прикладається високовольтна, високочастотна напруга, що призводить до загорання навколо об'єкта газового розряду. Розряд являє собою слабоіонізовану плазму, в якій крім хімічних елементів

та речовин, що присутні в атмосфері, знаходяться хімічні елементи та речовини, з яких складається РФО. Кожен хімічний елемент та речовина мають свій неповторний спектр випромінювання, який формується фотонами, що виникають при поверненні електронів з вищих орбіталей на нижчі (при ГРВ електрони у нейтральних атомів та їх іонів переходять на вищі рівні в основному за рахунок зіткнень з електронами, розігнаними прикладеним електричним полем), тому проаналізувавши спектр випромінювання плазми можливо встановити її хімічний склад [5].

Якщо РФО складається з n хімічних елементів та речовин, то спектр РФО можливо описати за формулою:

$$\sum_{m=1}^n I_{mk} = \sum_{m=1}^n N_{mk} (A_{mki} (E_{mk} - E_{mi})), \quad (1)$$

де I_{mk} — інтенсивність k -ї спектральної лінії для m -ї речовини або сполуки; N_{mk} — заселеність рівнів для m -ї речовини або сполуки; A_{mki} — ймовірність переходу з верхнього рівня k на нижній i для m -ї речовини або сполуки; E_{mk} та E_{mi} — енергія рівня k та i для m -ї речовини або сполуки.

По ширині спектральної лінії $\Delta\nu$ можна точно визначити концентрацію речовини N_0 в одиниці об'єму:

$$N_0 = \frac{\Delta\nu}{2\sigma^2} \sqrt{\frac{\pi\mu}{RT}}, \quad (2)$$

де μ — молярна атомна маса; σ — ефективний радіус атома; R — газова стала; T — температура [6, 7].