

## РАСЧЁТ ПОЛЕЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМАХ – ИНСТРУМЕНТАХ РИХТОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ

*У статті представлено конструкцію комбінованої індукторної системи – інструменту зовнішнього рихтування вм'ятин в металевих покриттях автомобільних кузовів. Запропоновано використання низькочастотного плоскопаралельного замість кругового високочастотного магнітного поля для створення умов трансформації природного відштовхування в притягання листового провідника. В індукторній системі низькочастотне поле генерується за допомогою плоского круглого витка, а плоскопаралельне магнітне поле – витком прямокутної форми. У даній конструкції низькочастотне поле проникає крізь листову заготовку, але плоскопаралельне магнітне поле, як показує теорія та експеримент, у вільний півпростір практично, не дифундує. Виведення розрахункових співвідношень для аналізу процесів магнітно-імпульсного притягання в даній системі заснований на рішенні рівнянь Максвелла для ненульових складових напруженостей електромагнітного поля, перетворених по Лапласу з урахуванням нульових початкових умов. При цьому застосовувалося інтегральне синус-перетворення Фур'є. Завдання вирішується в наближенні плоских хвиль, для яких справедлив прямо пропорційний зв'язок між дотичними складовими векторів електромагнітного поля на поверхні провідника. У результаті була отримана повна сукупність розрахункових виразів для аналізу процесів у комбінованій індукторній системі для магнітно-імпульсного «втягування» заданої ділянки металевого листа, яка представляє собою суперпозицію низькочастотних кругового і плоскопаралельного магнітних полів. Показано, що магнітний тиск на металевий лист, який зумовлений силовим впливом з боку збуджуваних полів, визначається виключно амплітудою поля, що проникло, і направлений у бік робочої поверхні індуктора. Зрештою, має місце притягання заданої ділянки листового металу. Робоча частота плоскопаралельного поля може бути досить малою. Цей вибір не впливає на дифузійні процеси в системі, але дозволяє реалізувати режим найбільш ефективного виконання заданої виробничої операції. Бібл. 6, рис. 2.*

*Ключові слова:* комбінована індукторна система, зовнішнє рихтування, низькочастотне магнітне поле.

*В статье представлена конструкция комбинированной индукторной системы – инструмента внешней рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов. Предложено использование низкочастотного плоскопаралельного вместо кругового высокочастотного магнитного поля для создания условий трансформации естественного отталкивания в притяжение листового проводника. В индукторной системе низкочастотное поле генерируется с помощью плоского круглого витка, а плоскопаралельное магнитное поле – витком прямоугольной формы. В данной конструкции низкочастотное поле проникает сквозь листовую заготовку, но плоскопаралельное магнитное поле, как показывает теория и эксперимент, в свободное полупространство, практически, не диффундирует. Вывод расчетных соотношений для анализа процессов магнитно-импульсного притяжения в данной системе основан на решении уравнений Максвелла для ненулевых составляющих напряженностей электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учетом нулевых начальных условия. При этом применялось интегральное синус-преобразование Фурье. Задача решается в приближении плоских волн, для которых справедлива прямо пропорциональная связь между касательными составляющими векторов электромагнитного поля на поверхности проводника. В результате была получена полная совокупность расчётных выражений для анализа процессов в комбинированной индукторной системе для магнитно-импульсного «втягивания» заданного участка металлического листа, которая представляет собой суперпозицию низкочастотных кругового и плоскопаралельного магнитных полей. Показано, что магнитное давление на металлический лист, которое обусловлено силовым воздействием со стороны возбуждаемых полей, определяется исключительно амплитудой проникшего поля и направлено в сторону рабочей поверхности индуктора. В конечном итоге, имеет место притяжение заданного участка листового металла. Рабочая частота плоскопаралельного поля может быть достаточно малой. Этот выбор не влияет на диффузионные процессы в системе, но позволяет реализовать режим наиболее эффективного выполнения заданной производственной операции. Библ. 6, рис. 2.*

*Ключевые слова:* комбинированная индукторная система, внешняя рихтовка, низкочастотное магнитное поле.

**Введение.** Актуальность промышленных технологий с использованием энергии электромагнитных полей на современном этапе научно технического прогресса не вызывает сомнений. Помимо известных традиционных операций кузнечно-штамповочного производства, получивших достаточно широкое распространение в авиа- и автомобилестроении, наиболее востребованными являются способы рихтовки вмятин в покрытиях из тонкостенных металлов. Известными достоинствами магнитно-импульсных технологий такого рода является возможность реализации с внешней стороны корпуса или кузова, высокая скорость выполнения операции, возможность сохранения защитного лакокрасочного слоя и др. [1].

**Обзор литературы. Постановка задачи.** Среди различных способов магнитно-импульсного устранения вмятин в корпусах самолётов, доведенных до уровня реального практического осуществления, в первую очередь, следует выделить разработки инженеров концерна «Боинг». Физическая сущность сформулированных предложений состоит в использовании низко- (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) магнитных полей. Первое проникает сквозь металл с вмятиной. Второе концентрируется только со стороны источника поля – индуктора. Результатом их суперпозиции является нуль напряжённости с одной и её не нулевая амплитуда с другой стороны обрабатываемого объекта. Возникающая

© Д.О. Волонцевич, М.В. Барбашова, Е.С. Радченко

сила магнитного давления деформирует заданный участок листового металла с вмятиной и осуществляет его притяжение к источнику поля – индуктору. Конструктивно, предлагаемые инструменты метода обладают круговой симметрией, что объясняется традиционными представлениями о характере протекающих электромагнитных процессов [2, 3].

Отбрасывая второстепенные факторы, основным требованием к инструменту данного принципа действия является формирование проникающего (НЧ) и не проникающего (ВЧ) магнитных полей.

Избежать проникновения можно не только за счёт повышения рабочей частоты действующего поля. Решить данную задачу можно с помощью природного эффекта, в соответствии с которым касательная составляющая напряжённости магнитного поля не проникает сквозь проводящий слой в свободное полупространство. Практически, реализовать отмеченный эффект можно с помощью комбинированных индукторных систем, генерирующих круговые и плоскопараллельные магнитные поля [4].

**Цель работы** – предложить конструкции и вывод расчётных соотношений для анализа процессов магнитно-импульсного притяжения в комбинированной индукторной системе – инструменте внешней рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов.

**Вывод расчётных соотношений.** На рис. 1, схематически, представлена индукторная система, в которой низкочастотное поле генерируется с помощью плоского круглого витка, а плоскопараллельное магнитное поле – витком прямоугольной формы.

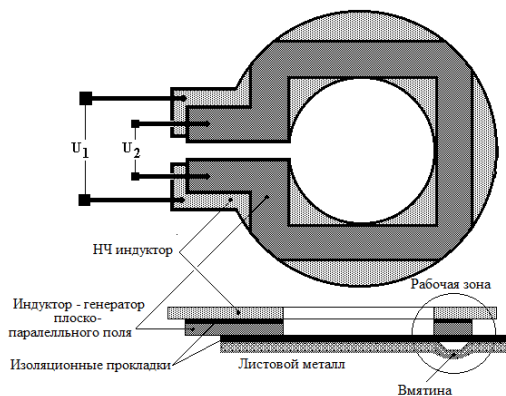


Рис. 1

В данной конструкции низкочастотное поле (так же как и ранее) проникает сквозь листовую заготовку, но плоскопараллельное магнитное поле, как показывает теория и эксперимент, в свободное полупространство, практически, не диффундирует [4]. И если в рабочей зоне индукторной системы амплитуда плоскопараллельного магнитного поля равна амплитуде низкочастотного поля над заготовкой, то давление на заготовку со стороны её внешней поверхности (фактически – это притяжение к индукторам) будет обеспечиваться только величиной напряжённости проникшего низкочастотного магнитного поля.

То есть, в такой конструкции индукторной системы нет жёстких требований на временные параметры дополнительного сигнала, устраняющего поле над

заготовкой, и позволяющего реализовать эффект её притяжения.

Касательная компонента напряжённости магнитного поля в цилиндрической системе координат, связанной с витком низкочастотного индуктора была вычислена ранее авторами научного издания [5].

Перепишем их.

В предположении равномерного распределения плотности тока было найдено, что

а) над листом:

$$H_1(t, r, z = 0) \approx \frac{-j_1(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{(\lambda \cdot R_1)}^{(\lambda \cdot R_2)} x \cdot J_1(x) dx \right] \times \frac{e^{-\lambda \cdot H}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda; \quad (1)$$

б) под листом:

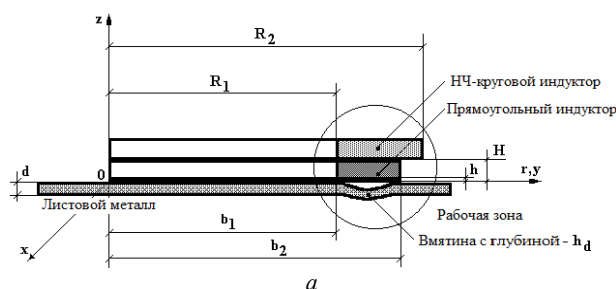
$$H_1(t, r, z = -d) \approx \frac{-j_1(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{(\lambda \cdot R_1)}^{(\lambda \cdot R_2)} x \cdot J_1(x) dx \right] \times \frac{e^{-\lambda \cdot (H+d)}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda, \quad (2)$$

где  $j_1(t)$  – плотность тока в катушке,  $j_1(t) = \frac{I_1(t) \cdot w_1}{(R_2 - R_1)}$ ,

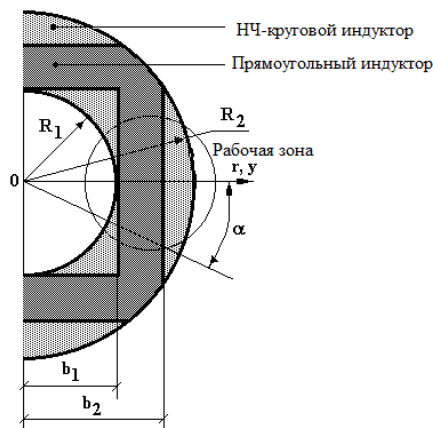
$I_1(t)$  и  $w_1$  – ток и число витков в катушке, соответственно.

Вычислим напряжённость плоскопараллельного поля, генерируемого прямоугольным индуктором в декартовой системе координат, связанной с индуктором.

Для вычисления результата суперпозиции возбуждаемых полей совместим координатные системы в рабочей зоне соответственно рис. 2. На рис. 2,а – поперечное сечение рабочей зоны, рис. 2,б – по ширине круглого и прямоугольного индукторов.



а



б

Рис. 2

Вычисление касательной компоненты напряжённости магнитного поля прямоугольного индуктора в рабочей зоне проведём при следующих допущениях:

- имеет место геометрическая симметрия системы относительно координатной плоскости  $ZOX$ ;
- заготовка – металлический лист достаточно больших поперечных размеров с толщиной  $d$  и электропроводностью  $\gamma$ ;
- наличием разреза и токоподводов для подключения к источнику питания пренебрегаем, индуктор представляем замкнутым квадратным витком, по которому течёт ток  $I(t)$  (по противоположным сторонам в противоположных направлениях);
- вдоль оси абсцисс система обладает достаточно большой протяжённостью, так что электромагнитные процессы в рабочей зоне не зависят от поля, возбуждаемого боковыми токоподводами и  $\partial/\partial x=0$ ;
- толщина индуктора пренебрежимо мала. Расстояние между поверхностью индуктора и заготовки –  $h$ , а также толщины экрана и заготовки –  $d$  много меньше всех характерных размеров системы, то есть  $h/(b_{1,2}) \ll 1, d/(b_{1,2}) \ll 1$ .

Задача решается в приближении плоских волн, для которого справедлива прямо пропорциональная связь между касательными составляющими векторов электромагнитного поля на поверхности проводника, отделяющего источник поля от свободного полупространства [4]:

$$H_\tau = \pm(\gamma \cdot d) \cdot E_\tau, \quad (3)$$

где  $\gamma, d$  – электропроводность и толщина проводника (в данной задаче – это листовая заготовка).

В пространстве между индуктором и листовой заготовкой  $z \in [0, h]$  уравнения Максвелла для ненулевых составляющих напряжённостей электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z); \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z); \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z), \end{cases} \quad (4)$$

где  $j_x(p, y, z)$  – плотность стороннего тока – тока в индукторе,  $j_x(p, y, z) = j(p) \cdot f(y) \cdot \delta(z-h)$ ,  $j(p) = I(p)/L$ ,  $I(p) \leftrightarrow I(t)$ ,  $L$  – ширина индуктора в рабочей зоне,  $L = b_1 - b_2$ ;  $f(y) = \eta(y - b_1) - \eta(y - b_2)$  – функция поперечного распределения плотности тока;  $\eta(y)$ ,  $\delta(z)$  – ступенчатая и импульсная функции, соответственно;  $E_x(p, y, z) \leftrightarrow E_x(t, y, z)$ ;  $H_y(p, y, z) \leftrightarrow H_y(t, y, z)$ .

Из дифференциальной системы (4) можно получить уравнение для  $E_x(p, y, z)$ :

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = p\mu_0 j(p, y, z). \quad (5)$$

Для решения уравнения (5) применим интегральное синус-преобразование Фурье. Допустимость данного математического подхода обусловлена электрической асимметрией рассматриваемой задачи относительно плоскости  $ZOX$  [6].

Таким образом, имеем

$$\begin{cases} E_x(p, y, z) = \int_0^\infty E_x(p, \lambda, z) \cdot \sin(\lambda y) d\lambda; \\ j_x(p, y, z) = \int_0^\infty j_x(p, \lambda, z) \cdot \sin(\lambda y) d\lambda, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$j_x(p, \lambda, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty j_x(p, y, z) \cdot \sin(\lambda y) dy = j(p) f(\lambda) \delta(z);$$

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{b_1}^{b_2} f(y) \cdot \sin(\lambda y) dy = \frac{4}{\pi \cdot \lambda} \sin(\lambda(b_2 + b_1)) \cdot \sin(\lambda(b_2 - b_1)).$$

С учётом преобразований и дальнейшего решения поставленной задачи изображение касательной составляющей напряжённости магнитного поля имеет вид:

$$H_y(p, \lambda, z) = j(p) \cdot f(\lambda) (\eta(z-h) \operatorname{ch}(\lambda(z-h)) - e^{-\lambda h} \left( \operatorname{ch}(\lambda z) - \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda z}}{(\lambda + p\mu_0 \gamma d)} \right)). \quad (7)$$

Из формулы (7) при  $z = 0$  находим напряжённость магнитного поля на поверхности листовой заготовки:

$$H_y(p, \lambda, 0) = -f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{p \cdot j(p)}{\left( \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} + p \right)}. \quad (8)$$

Выполняем в (8) обратные синус-Фурье и преобразования Лапласа и учтём вид функции  $f(\lambda)$  из системы (6).

После тождественных преобразований получим, что

$$H_y(t, y, 0) = -\frac{4}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin(\lambda(b_2 + b_1)) \cdot \sin(\lambda(b_2 - b_1))}{\lambda} \times e^{-\lambda h} \cdot \frac{dj_2(t)}{dt} \cdot e^{-\frac{\lambda t}{\mu_0 \gamma d}} d\lambda. \quad (9)$$

Результирующие магнитные поля в системе находятся суперпозицией соответствующих решений:

а) над листом (алгебраическая сумма зависимостей (1) и (9)):

$$H_s^{(over)}(t, r, z = 0) = H_r(t, r, z = 0) + H_y(t, y, z = 0), \quad (10)$$

б) под листом (выражение (2)):

$$H_s^{(under)}(t, r, z = -d) \approx H_1(t, r, z = -d). \quad (11)$$

Магнитное давление на металлический лист, обусловленное силовым воздействием со стороны возбуждаемых полей, пропорционально разности квадратов напряжённостей на граничных поверхностях листа [4]. Его величина в соответствии с выражениями (10) и (11) будет определяться зависимостью:

$$P = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left( (H_r(t, r, z = 0) + H_y(t, y, z = 0))^2 - H_1^2(t, r, z = -d) \right) \quad (12)$$

Как видно из формулы (12), при равенстве и противоположной направленности напряжённостей полей, возбуждаемых круговым и прямоугольным индукторами, алгебраическая сумма в первых скобках стремится к нулю. Выражение (12) принимает вид:

$$P = -\frac{\mu_0}{2} \cdot H_1^2(t, r, z = -d). \quad (13)$$

Полученная зависимость (13) свидетельствует о том, что сила магнитного давления определяется исключительно амплитудой проникшего поля и направлена в сторону рабочей поверхности индуктора. В конечном итоге, имеет притяжение заданного участка листового металла.

Формулы (10) – (13) представляют собой полную совокупность расчётных выражений для анализа процессов в комбинированной индукторной системе для магнитно-импульсного «вытягивания» заданного участка металлического листа за счёт суперпозиции низкочастотных кругового и плоскопараллельного магнитных полей.

Подчеркнём, что рабочая частота плоскопараллельного поля может быть достаточно малой. Этот выбор не влияет на диффузионные процессы в системе, но позволяет реализовать режим наиболее эффективного выполнения заданной производственной операции.

**Выводы.** Предложена и развита идея использования плоскопараллельного магнитного поля для создания условий трансформации естественного отталкивания в магнитно-импульсное притяжение. Предложена конструкция комбинированной индукторной системы, реализующая принцип суперпозиции кругового и плоскопараллельного магнитных полей. Получены аналитические зависимости для анализа электродинамических процессов в предложенном инструменте внешней магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бажинов А.В., Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов. // Труды междунауч.-техн. конф. «Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития». Самара, 18-19 сентября 2007. – С. 3-13.
2. US Patent no.3,998,081, Hansen et al. (The Boeing Company, 1976).
3. US Patent no.4,986,102, Hendrickson et al. (The Boeing Company, 1991).
4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю. В. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.
5. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. Под ред. проф. Ю.В. Батыгина. – Х.: Изд. ХНАДУ, 2009. – 249 с.
6. Г. Корн, Т. Корн, Справочник по математике. М.: Наука, 1973. – 831 с.

#### REFERENCES

1. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Bazhinov A.V. Magnetic pulsed methods and systems for attraction of thin sheet metal. *Trudy mezhd. nauchn.-tekhn. konf. «Magnitno-impul'snaya obrabotka metallov. Puti sovershenstvovaniya i razvitiya»* [Proceedings of Int. Sci.-Tech. Conf. «Magnetic pulsed treatment of metals. Ways to improve and develop»]. Samara (Russia), 18-19 September, 2007, pp. 3-13. (Rus).
2. Hansen et al. (The Boeing Company). Patent US, no.3.998.081, 1976.
3. Hendrickson et al. (The Boeing Company). Patent US, no.4.986.102, 1991.

4. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Khimenko L.T. *Impul'snyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 1. Izdaniye vtoroye, pererabotannoye i dopolnennoye*. [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.1. 2nd edition, revised and enlarged.] Kharkov, MOST-Tornado Publ., 2003. 284 p. (Rus).

5. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impul'snyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 3: Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami*. [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.3: Theory and experiment attraction of thin-walled metal pulsed magnetic fields]. Kharkov, KHNADU Publ., 2009. 249 p. (Rus).

6. Korn G., Korn T., *Spravochnik po matematike* [Mathematical Handbook]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 831 p. (Rus).

*Поступила (received) 20.04.2015*

*Волонцевич Дмитрий Олегович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Барбашова Марина Викторовна<sup>2</sup>, ассистент,  
Радченко Евгения Сергеевна<sup>2</sup>, студент,*

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, e-mail: vdo@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

61002, Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: barbashova1987@gmail.com

*D.O. Voloncevich<sup>1</sup>, M.V.Barbashova<sup>2</sup>, E.S. Radchenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

#### **Calculation of fields in a combined inductor system as a tools of straightening of metal coating of car body.**

*In the paper construction of combined inductor system realizing the principle of superposition of circular and plane-parallel magnetic fields is proposed. This inductor system is the instrument of external straightening of dents in the metal coating of car body. The use of low-frequency plane-parallel magnetic field instead of a high-frequency magnetic field to create conditions for the transformation of the natural repulsion to attraction of sheet conductor is suggested. The low-frequency field is generated by inductor system by dint of flat circular turn. The plane-parallel magnetic field is generated by a rectangular turn. The low-frequency field penetrates the sheet workpiece in the construct. The theory and experiment indicate that plane-parallel magnetic field doesn't diffuse almost. Conclusion calculated ratios to analyze the processes of magnetic pulse attraction in the system based on the solution of Maxwell's equations for non-zero intensity components of the electromagnetic field. The Maxwell's equations are transformed by Laplace zero initial conditions. In this case the integral sinus-transformation Fourier are applied. The problem is solved in the plane-wave approximation. Valid for plane waves directly proportional relationship between the tangent vector components of the electromagnetic field on the surface of conductor. For the analysis of processes in combined inductor system for a magnetic-pulsed «pulling» a predetermined part of the metal sheet were obtained the population of calculated expressions. The magnetic pressure on the metal sheet is caused by force action on the part of the excited fields. It is determined solely amplitude of penetrate field and is directed towards the working surface of the inductor. Finally, there is a predetermined part of the attraction of the sheet metal. The operating frequency of the plane-parallel field can be quite small. This choice doesn't influence the diffusion processes in the system, but allows for the most efficient mode of implementation of a given production operation. References 6, figures 2.*

**Key words:** combined inductor system, external straightening, low-frequency magnetic field.