



УДК 621.318

## ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Барбашова М.В.*

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

*В статье представлен анализ способов бесконтактного измерения удельной электропроводности тонкостенных листовых металлов при магнитно-импульсной обработке металлов (МИОМ). Раскрыты основы методов, основанных на компенсации электромагнитных полей двух соленоидов во внутренней полости системы с двумя листовыми металлическими образцами. Показаны различные конструктивные исполнения источников поля (в частности, их обмоток). Приведены аналитические соотношения для расчета основных электромагнитных характеристик рассматриваемых систем.*

*Ключевые слова: удельная электропроводность, листовый металл, магнитно-импульсная обработка.*

**Введение.** В современной промышленности применяются различные металлы и их сплавы, это обусловлено как экономическими показателями, так и техническими (прочность, доступность в обработке и обслуживании, массогабаритные показатели и др.) показателями. В связи с этим, остро встает вопрос о точных электрофизических параметрах (например, удельная электропроводность, магнитные характеристики и др.) обрабатываемого металлического элемента конструкции авто. От этого зависит выбор, как способа, так и метода самой обработки и, соответственно, качество, и эффективность обработки (ремонта, рихтовки, восстановления).

**Актуальность исследований.** Недостатком традиционных способов измерения удельного электрического сопротивления (удельной электропроводности проводников) является наличие электрических контактов в процессе самого измерения. Это вносит значительную погрешность в процесс измерения, т.к. сами контакты (места подсоединения) обладают своим значением активного сопротивления – переходное сопротивление [1, 2].

Данного недостатка лишены бесконтактные способы измерения удельной электропроводности проводников. Следует отметить, что в настоящее время появились предложения бесконтактных измерителей электропроводности, принцип действия которых основан на возбуждении вихревых токов (например, прибор SIGMASCOPE® SMP10 компании ХЕЛЬМУТ ФИШЕР, вихретоковый структуроскоп ВЭ-26НП разработанный в ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», и др.). К недостаткам устройств такого типа, в первую очередь, можно отнести ограниченность их возможностей. Так, во-первых, исключаются измерения для металлов с толщиной, меньшей величины эффективной глубины проникновения поля, во-вторых, предложения не работают для металлов, обладающих магнитными свойствами и т.д.

Указанные недостатки становятся особо значимыми и неприемлемыми при магнитно-импульсной обработке тонкостенных металлов, поскольку не позволяют идентифицировать важнейшую характеристику обрабатываемого объекта – удельную электропроводность, определяющую не просто эффективность, а практические возможности технологий с использованием энергии электромагнитных полей.

Отмеченных выше недостатков лишены бесконтактные системы измерения удельной электропроводности проводников, основанные на идее о взаимодействии «встречных» магнитных полей двух соленоидов [3].

**Постановка задачи.** Сущность предлагаемых способов состоит в суперпозиции магнитных потоков двух независимых источников, и соответственно, заключается в следующем.

На два листовых образца с внешних сторон действуют «встречные» магнитные поля. Термин «встречные» означает включение источников магнитного поля, при котором



вектора напряженности направлены противоположно, а их амплитуды таковы, что в пространстве между образцами магнитный поток обращается в нуль [4, 5].

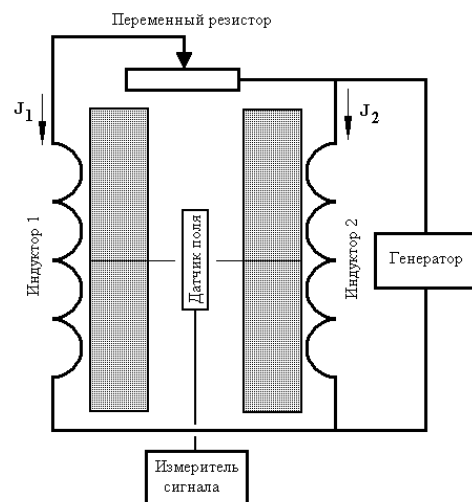


Рисунок 1 – Схема измерения удельной электропроводности плоских листовых металлов

Как видно из схемы на рисунке 1, источниками «встречных» полей являются два плоских соленоида (индуктор 1 и индуктор 2), расположенные на внешних поверхностях двух немагнитных металлических образцов. Один из них является «контрольным». Все его параметры известны. Пусть это будет металлический лист с толщиной и удельной электропроводностью –  $d_1$  и  $\gamma_1$ , соответственно. Для второго образца известна только его толщина –  $d_2$ . Удельная электропроводность подлежит определению,  $\gamma_2 = ?$ .

Практическая реализация настоящего предложения по измерению удельной электропроводности требует решения следующих основных вопросов:

- выбор конструктивного исполнения источников магнитного поля (индукторов) для возбуждения плоских магнитных полей, обеспечивающих максимум приближения к идеализации плоских электромагнитных волн,
- получение рабочих соотношений для определения неизвестной электропроводности, учитывающих взаимное влияние проводящих конструктивных элементов в реальной измерительной системе,
- возможность определения удельной электропроводности ферромагнитных листовых металлов, условия и рабочие соотношения.

**Цель работы** – провести сравнительную характеристику способов бесконтактного измерения удельной электропроводности листовых металлических образцов при магнитно-импульсной обработке металлов.

**Результаты исследований.** В данной работе приведен анализ трех конструктивных решений поставленной задачи:

1. Способ измерения удельной электропроводности немагнитного металла, когда «встречные» поля возбуждаются массивными соленоидами-индукторами, обмотки которых выполнены из «идеальных» проводников.

Постановка задачи предполагает принятие расчётной модели на рисунке 2б, соответствующей схеме на рисунке 2а.

Допущения сформулированы в пп. 1÷8.

1. Приемлема декартова прямоугольная система координат, единичные орты которой представлены в верхней части рисунке 2б.

2. В измерениях ОХ и ОУ рассматриваемая система обладает настолько большой протяжённостью, что  $\frac{d}{dx} = \frac{d}{dy} \approx 0$ .



3. Индукторы-соленоиды 1 и 2 идентичны геометрически и относительно листовых металлов расположены на одинаковом достаточно малом расстоянии –  $h$  от них, так что  $\frac{h}{a} \ll 1$ , где  $a$  – какой-то характерный размер системы.

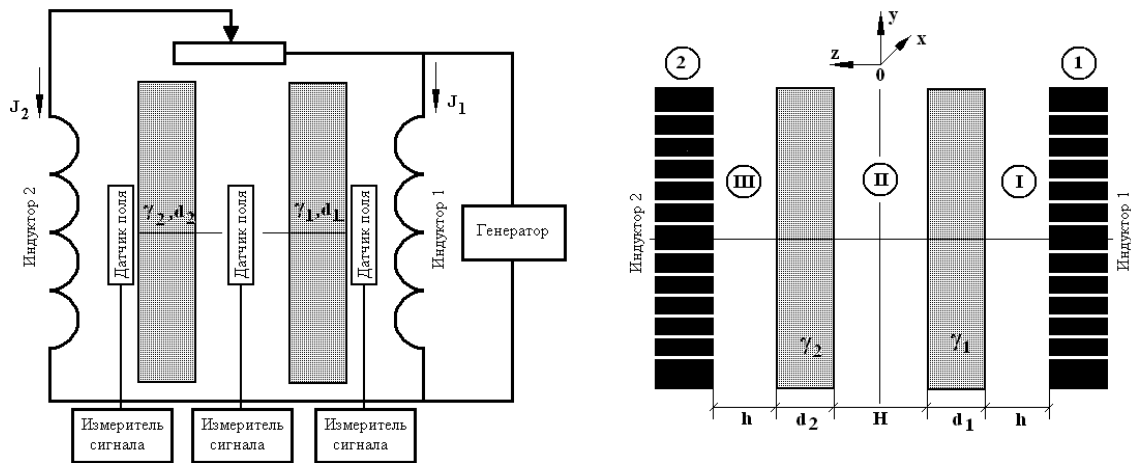


Рисунок 2 – Система для измерения удельной электропроводности плоских листовых металлов: а) схема практической реализации; б) расчётная модель

4. Расстояния между витками соленоидов пренебрежимо малы, а металл витков обладает идеальной проводимостью.

5. Плотность токов в соленоидах –  $j_1(t)$  и  $j_2(t)$ . Их временные параметры таковы, что в расчётах приемлемо известное условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов и  $\frac{\omega}{c} \cdot a \ll 1$  (здесь  $\omega$  – циклическая частота,  $c$  – скорость света в вакууме).

6. Немагнитные металлические листы являются достаточно тонкостенными с геометрической –  $\frac{d_{1,2}}{a} \ll 1$  и электродинамической –  $\omega \cdot \tau_{1,2} \ll 1$  точек зрения ( $\tau_{1,2}$  – характерные времена проникновения поля в проводящие слои:  $\tau_1 = \mu_0 \cdot \gamma_1 \cdot d_1^2$ ,  $\tau_2 = \mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot d_2^2$ ,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума).

7. Расстояние между листами –  $H$  достаточно мало ( $\frac{H}{a} \ll 1$ ) и магнитное поле между ними однородно.

8. Система возбуждается только  $x$  – компонентами токов индуктора, вследствие чего нетривиальными составляющими вектора электромагнитного поля являются  $E_x \neq 0, H_y \neq 0$ .

Для металлов уравнения Максвелла в пространстве  $L$  – изображений с учётом нулевых начальных условий, имеют вид [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_y(p, z)}{\partial z} = \gamma \cdot E_x(p, z); & (1) \\ \frac{\partial E_x(p, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_y(p, z); & (2) \end{cases}$$



где  $p$  – параметр преобразования Лапласа.

$$E_x(p, z) = L\{E_x(t, z)\}; H_y(p, z) = L\{H_y(t, z)\}.$$

Опуская подробное описание решения уравнений Максвелла для данной системы, в результате было получено:

- если токи в обмотках соленоидов равны и одинаково направлены (одинаковая направленность токов соответствует противоположной направленности магнитных потоков в пространстве между ними), поле во внутренней полости системы обращается в нуль;
- неизвестная удельная электропроводность металлического листа толщиной  $d_2$  может быть найдена из выражения (3):

$$\gamma_2 \approx \frac{\gamma_1 \cdot d_1}{d_2} \cdot \frac{H_{2m}}{H_{1m}}, \quad (3)$$

где  $H_{1m}$  – амплитудное значения напряжённости магнитного поля на граничной поверхности металлического листа  $(d_1, \gamma_1)$  со стороны индуктора 1;  $H_{2m}$  – амплитудное значения напряжённости магнитного поля на граничной поверхности металлического листа  $(d_2, \gamma_2)$  со стороны индуктора 2.

2. Способ бесконтактного измерения удельной электропроводности листового ферромагнетика в системе с индукторами, обмотки которых «абсолютно прозрачны» для возбуждаемых магнитных полей. Обмотки индукторов не влияют на характер протекающих электромагнитных процессов.

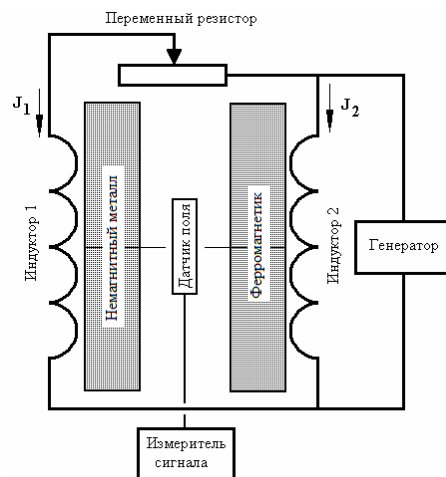


Рисунок 3 – Принципиальная схема измерения электропроводности листовых ферромагнетиков в системе с «абсолютно прозрачными» обмотками индукторов

Измерительный комплекс состоит (рис. 3) из параллельно размещённых плоского индуктора – 1, первого немагнитного листового металла (со стороны индуктора – 1), второго листового магнитного металла (со стороны индуктора – 2) и плоского индуктора – 2.

Все составляющие комплекса разделены диэлектрическими промежутками.

Индукторы – 1 и 2 подключаются к отдельным источникам питания.

Варьируя параметры сигналов в обмотках индукторов, можно добиться нулевого поля в пространстве между листами (индикация производится, например, с помощью катушечного индукционного измерителя в центральной полости между листами).

Немагнитный металл является контрольным. Его электропроводность –  $\gamma_1$ , магнитная проницаемость –  $\mu_1 \approx \mu_0$  ( $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума) и толщина –



$d_1$  известны. Второй листовый металл обладает известной толщиной –  $d_2$ , но неизвестными электропроводностью –  $\gamma_2$  и магнитной проницаемостью –  $\mu_2$ .

При решении поставленной задачи принимаем следующие допущения.

1. Одинаковые индукторы-соленоиды 1 и 2 расположены идентично относительно листовых металлов на одинаковом и достаточно малом расстоянии –  $h$  от них, так что  $\frac{h}{a} \ll 1$ , где  $a$  – ширина обмоток соленоидов.

2. Витки соленоидов достаточно тонки и «абсолютно прозрачны» для действующих полей, так что их металл не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы и можно считать, что  $D \rightarrow 0$ .

3. Изоляционные промежутки между витками –  $b$  достаточно малы, так что  $\frac{b}{a} \ll 1$ .

4. В каждом из соленоидов параллельные ветви обмоток удалены друг от друга настолько, что их взаимным влиянием можно пренебречь.

5. В измерении ОХ соленоиды достаточно протяжённые, так что  $\frac{d}{dx} \approx 0$ .

6. Размеры металлических листов в измерениях ОХ и ОУ достаточно велики, а расстояние –  $(2d)$  между ними достаточно мало, так что  $\frac{(2d)}{a} \ll 1$ .

7. В соответствии с положениями 1÷6 для проведения расчётов приемлема модель на рисунке 4.

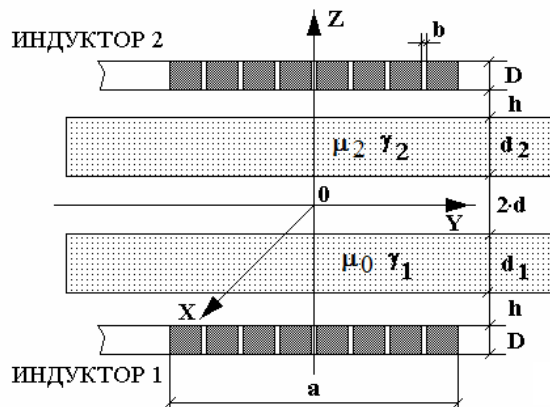


Рисунок 4 – Расчётная модель способа измерения удельной электропроводности листовых ферромагнетиков

8. В соленоидах текут токи с плотностью  $j_1(t)$  и  $j_2(t)$ , временные параметры которых таковы, что в расчётах приемлемо известное условие квазистационарности электромагнитных процессов и  $\frac{\omega}{c} \cdot a \ll 1$  (здесь  $\omega$  – циклическая частота,  $c$  – скорость света в вакууме).

9. Листы обоих металлов являются достаточно тонкостенными с геометрической –  $\frac{d_{1,2}}{a} \ll 1$  и электродинамической –  $\omega \cdot \tau_{1,2} \ll 1$  точек зрения (в последнем неравенстве  $\tau_{1,2}$  – характерные времена проникновения поля:  $\tau_1 = \mu_0 \cdot \gamma_1 \cdot d_1^2$ ,



$\tau_2 = \mu_2 \cdot \gamma_2 \cdot d_2^2$ ,  $\gamma_{1,2}$  – удельные электропроводности,  $d_{1,2}$  – толщины листовых металлов,  $\mu_{0,2}$  – абсолютные магнитные проницаемости,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

10. Полагаем, что магнитная проницаемость исследуемого листового металла –  $\mu_2 \approx \text{const}$ .

11. Размеры листов в измерениях ОХ и ОУ достаточно велики, расстояние между ними –  $2d$  достаточно мало  $\left(\frac{2d}{a} \ll 1\right)$ , магнитное поле между ними однородно.

12. Система возбуждается  $x$  – составляющей тока индуктора, вследствие чего нетривиальными составляющими вектора электромагнитного поля являются  $E_x \neq 0, H_{y,z} \neq 0$ .

Уравнения Максвелла в пространстве L – изображений с учётом нулевых начальных условий, имеют вид [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z); \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -\mu \cdot p \cdot H_y(p, y, z); \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = \mu \cdot p \cdot H_z(p, y, z); \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -\mu \cdot p \cdot H_y(p, y, z); \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = \mu \cdot p \cdot H_z(p, y, z); \quad (6)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $E_x(p, y, z) = L\{E_x(t, y, z)\}$ ;  $H_{y,z}(p, y, z) = L\{H_{y,z}(t, y, z)\}$ ;  $j_x(p, y, z) = L\{j_x(t, y, z)\}$

В общем случае плотность тока описывается зависимостью:

$$j_x(p, y, z) = (p \cdot \varepsilon + \gamma) \cdot E_x(p, y, z) + j_{x1,2}(p, y, z), \quad (7)$$

где  $\gamma, \varepsilon$  – удельная электропроводность и диэлектрическая проницаемость среды,  $j_{x1,2}(t, y, z)$  – плотность стороннего тока в индукторах 1 и 2, соответственно,

$$j_{x1}(p, y, z) = j_1(p) \cdot f(y) \cdot \delta(z + L_1), \quad L_1 = (d + d_1 + h),$$

$$j_{x2}(p, y, z) = j_2(p) \cdot f(y) \cdot \delta(z - L_2), \quad L_2 = (d + d_2 + h),$$

$f(y)$  – функция поперечного распределения тока в обмотках индукторов;

$\delta(x)$  – дельта функция Дирака.

После решения поставленной задачи с помощью уравнений Максвелла было получено выражение для определения неизвестной удельной электропроводности ферромагнетика

$$\gamma_2 \approx \frac{\gamma_1 \cdot d_1}{d_2} \cdot \frac{j_{2m}}{j_{1m}}. \quad (8)$$

где  $j_{1m}, j_{2m}$  – амплитудное значение тока в индукторах 1 и 2, соответственно.

Зависимость (8) говорит о том, что в измерениях электропроводности предлагаемым методом при достаточно низких частотах сигналов в обмотках индукторов магнитные свойства исследуемого образца не оказывают никакого влияния на результаты измерений.



3. Способ бесконтактного измерения удельной электропроводности листового ферромагнетика с помощью «встречных» магнитных полей в системе с индукторами, обмотки которых представляются тонкостенными проводящими слоями, отделяющими собственно систему от свободного полупространства. Данная модель представляется достаточно адекватной реально возможной технической реализации, поскольку позволяет количественно учесть влияние металла обмоток на протекающие электромагнитные процессы и, соответственно, на вид рабочих соотношений для определения неизвестной электропроводности исследуемого образца.

Предлагаемая модельная схема системы приведена на рис. 5.

Измерительный комплекс состоит из параллельно размещённых плоского индуктора – 1, первого немагнитного листового металла (со стороны индуктора – 1), второго листового магнитного металла (со стороны индуктора – 2) и, собственно, плоского индуктора – 2.

Все составляющие комплекса разделены диэлектрическими промежутками.

Индукторы – 1 и 2 подключаются к источнику питания так, чтобы обеспечить возможность отдельной регулировки токов в их обмотках, что позволяет добиться нулевого магнитного потока в пространстве между листами.

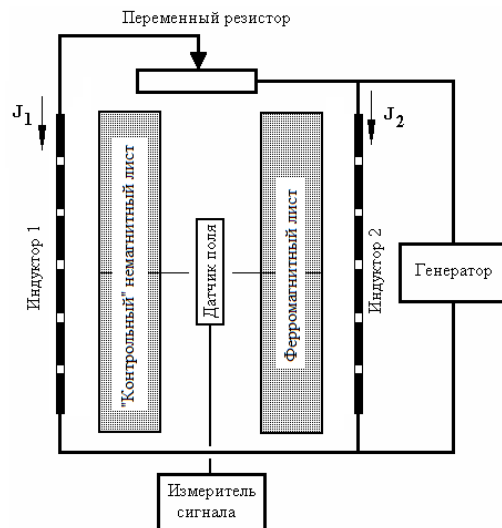


Рисунок 5 – Модельная схема измерения удельной электропроводности листовых металлов при возбуждении системы индукторами с «тонкостенными» обмотками

Немагнитный металл является контрольным. Его электропроводность –  $\gamma_1$ , магнитная проницаемость –  $\mu_1 \approx \mu_0$  ( $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума) и толщина –  $d_1$  известны. Второй листовой металл обладает известной толщиной –  $d_2$ , но неизвестными электропроводностью –  $\gamma_2$  и магнитной проницаемостью –  $\mu_2$ .

Работоспособность предлагаемого способа зависит от многих факторов. Но обязательным среди них является низкочастотный временной режим, обеспечивающий достаточную «прозрачность» элементов системы для действующих полей, что означает их интенсивное проникновение сквозь листовые металлы и обмотки индукторов.

При решении поставленной задачи принимаем следующие допущения.

1. Источниками возбуждаемого поля в системе являются индукторы-соленоиды 1 и 2 одинаковой геометрии и идентичным расположением относительно листовых металлов на одинаковом и достаточно малом расстоянии –  $h$  от них, так что  $\frac{h}{a} \ll 1$ , где  $a$  – ширина обмоток соленоидов.

2. В каждом из индукторов токоподводы к рабочей зоне удалены настолько, что их влиянием можно пренебречь.



3. Изоляционные промежутки между витками –  $b$  достаточно малы, так что  $\frac{b}{a} \ll 1$ .

4. Плотность токов в соленоидах –  $j_1(t)$  и  $j_2(t)$ . Их временные параметры таковы, что в расчётах приемлемо известное условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов и  $\left(\frac{\omega}{c} \cdot a\right) \ll 1$  (здесь  $\omega$  – циклическая частота,  $c$  – скорость света в вакууме) [4].

Плоские обмотки соленоидов и металлические листы являются достаточно тонкостенными (но не «абсолютно прозрачными!») с геометрической, а также с электродинамической точек зрения, так что  $\frac{d_i}{a} \ll 1$  и  $\frac{d_{1,2}}{a} \ll 1$ , а  $\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma_i \cdot d_i^2 \ll 1$  и  $\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma_{1,2} \cdot d_{1,2}^2 \ll 1$  ( $d_{i,1,2}$  – толщины обмоток соленоидов и листовых металлов, соответственно,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\gamma_i$  – удельная электропроводность металла обмоток соленоидов,  $\gamma_{1,2}$  – удельные электропроводности металлических листов).

5. В измерении ОХ соленоиды достаточно протяжённы, так что  $\frac{d}{dx} \approx 0$ .

6. Размеры листов в измерениях ОХ и ОУ достаточно велики, расстояние между ними –  $2d$  достаточно мало  $\left(\frac{2d}{a} \ll 1\right)$ , магнитное поле между ними однородно.

7. В соответствии с положениями 1÷7 для проведения расчётов приемлема модель на рис. 6.

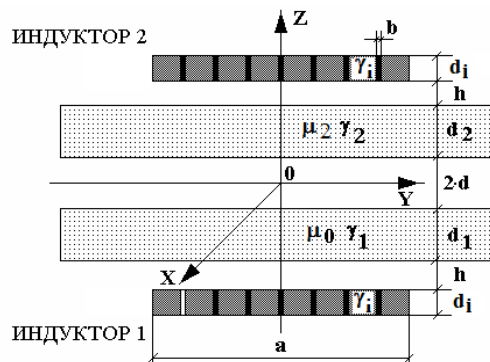


Рисунок 6 – Расчётная модель

8. Магнитная проницаемость исследуемого листового металла –  $\mu_2 \approx \text{const}$ .

9. Система возбуждается  $x$  – составляющей тока индуктора, вследствие чего нетривиальными составляющими вектора электромагнитного поля являются  $E_x \neq 0, H_{y,z} \neq 0$ .

Уравнения Максвелла в пространстве  $L$  – изображений с учётом нулевых начальных условий, имеют вид [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z); \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -\mu \cdot p \cdot H_y(p, y, z); \end{cases} \quad (10)$$





$$\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = \mu \cdot p \cdot H_z(p, y, z); \quad (11)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $E_x(p, y, z) = L\{E_x(t, y, z)\}$ ;  $H_{y,z}(p, y, z) = L\{H_{y,z}(t, y, z)\}$ ;  $j_x(p, y, z) = L\{j_x(t, y, z)\}$ .

В общем случае плотность тока описывается зависимостью

$$j_x(p, y, z) = (p \cdot \varepsilon + \gamma) \cdot E_x(p, y, z) + j_{x1,2}(p, y, z), \quad (12)$$

где  $\gamma, \varepsilon$  – удельная электропроводность и диэлектрическая проницаемость среды,

$j_{x1,2}(t, y, z)$  – плотность стороннего тока в индукторах 1 и 2, соответственно,

$$j_{x1}(p, r, z) = j_1(p) \cdot f(y) \cdot \delta(z + L_1), \quad L_1 = (d + d_1 + h),$$

$$j_{x2}(p, y, z) = j_2(p) \cdot f(y) \cdot \delta(z - L_2), \quad L_2 = (d + d_2 + h),$$

$f(y)$  – функция поперечного распределения тока в обмотках индукторов;

$\delta(x)$  – дельта-функция Дирака.

Поскольку поставленная задача классифицируется как линейная и аддитивная относительно характеристик электромагнитных процессов, справедлив принцип суперпозиции полей, возбуждаемых каждым из источников.

Решение выполнялось для каждого из них в отдельности. При этом положим, что металл обмотки действующего источника поля не влияет на электромагнитные процессы в системе, а металл обмотки второго соленоида представляет собой тонкостенный металлический экран, отделяющий систему от свободного полупространства.

Основным результатом проведенных расчетов является то, что при решении уравнения Максвелла было получено выражение, которое указывает на возможности измерения удельной электропроводности как магнитного, так и немагнитного металла:

$$\gamma_2 \approx \left( \frac{\gamma_1 \cdot d_1}{d_2} \right) \cdot \frac{H_{2m}}{H_{1m}}, \quad (13)$$

где  $H_{1,2m}$  – амплитуды напряженностей магнитного поля в рабочих зонах индукторов.

С практической точки зрения и для полноты теоретического описания рассматриваемой системы представляет интерес соответствующее соотношение между токами в обмотках индукторов.

Если принять, что временные зависимости токов в обмотках индукторов одинаковы, отличны только их амплитуды –  $J_{1,2m}$ , то

$$\gamma_2 = \left( \frac{\gamma_1 \cdot d_1}{d_2} \right) \cdot \left( \frac{J_{2m}}{J_{1m}} \cdot \left( 1 + \frac{\gamma_i d_i}{\gamma_1 d_1} \right) - \frac{\gamma_i d_i}{\gamma_1 d_1} \right), \quad (14)$$

где  $\gamma_i, d_i$  – удельная электропроводность и толщина металла обмотки индукторов, представленными тонкостенными проводящими слоями.

#### Выводы:

1. Проведен анализ способов бесконтактного измерения удельной электропроводности тонкостенных листовых металлов при магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ).

2. Работа систем с использованием метода «встречных» полей возможна исключительно в низкочастотном режиме возбуждаемых полей, когда имеет место их интенсивное проникновение сквозь листовые металлы, один из которых является «контрольным образцом» с известными параметрами, а второй – образцом, электропроводность которого определяется.



3. В случае идеально проводящих обмоток индукторов рабочее соотношение для определения удельной электропроводности немагнитных листовых металлов включает напряжённости магнитного поля, возбуждаемого в рабочих зонах индукторов равными и одинаково направленными токами.

4. Метод «встречных» магнитных полей позволяет измерять удельную электропроводность не только немагнитных металлов, но и тонкостенных листовых ферромагнитных образцов, причём в случае «абсолютно прозрачных» обмоток индукторов рабочее соотношение для определения удельной электропроводности включает не напряжённости магнитных полей на внешних границах листовых металлов, а токи, возбуждающие систему.

5. Обоснована практическая действенность конструктивного варианта исполнения реальной измерительной системы:

- с оценкой влияния обмоток индукторов, как тонкостенных экранов, отделяющих измерительную систему от свободного полупространства,
- с выводом рабочих соотношений для определения неизвестной удельной электропроводности тонкостенных листовых металлов,
- с выводом о независимости рабочих соотношений для определения электропроводности от наличия магнитных свойств исследуемого металла, что позволяет измерение электрофизических характеристик проводников любой природы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малиновский В. Н. Электрические измерения / Под ред. В. Н. Малиновского. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 393 с.
2. Тер-Хачатуров А. А. Измерительная техника / А. А. Тер-Хачатуров, Т. М. Алиев – М. : Высшая школа, 1991. – 384 с.
3. Пат. 96335 України, В21 Д 26/14. Спосіб вимірювання питомої електропровідності листових металів / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Смірнов Д. О.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № а 200913091 заявл. 16.12.2009; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 20.
4. Батыгин Ю. В. Магнитное поле в системе из двух соленоидов, разделенных тонкостенными проводниками / Ю. В. Батыгин, И. И. Щетинская, Л. Т. Хименко // Техническая электродинамика. – К., 1990. – № 4.
5. Батыгин Ю. В. Бесконтактный способ измерения удельной электропроводности листовых металлов / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, М. В. Барбашова та ін. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2012. – № 1. – С. 69-72.
6. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 831 с.

#### **Барбашова М.В. ВИМІРЮВАННЯ ПИТОМОЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ЛИСТОВИХ МЕТАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ**

*У статті представлено аналіз способів безконтактного вимірювання питомої електропровідності тонкостінних листових металів при магнітно-імпульсній обробці металів (МІОМ). Розкрито основи методів, заснованих на компенсації електромагнітних полів двох соленоїдів у внутрішній порожнині системи з двома листовими металевими зразками. Показані різні конструктивні виконання джерел поля (зокрема, їх обмоток). Наведено аналітичні співвідношення для розрахунку основних електромагнітних характеристик розглянутих систем.*

#### **Barbashova M. CONDUCTIVITY MEASUREMENT OF SHEET METAL USING MAGNETIC IMPULSE TECHNOLOGY**

*The analysis of methods of noncontact electric conductivity measurement of thin-walled sheet metals when magnetic-pulse metal working (MPMW) is provided in the article. The foundations of methods, based upon compensation of electromagnetic fields of two solenoids in an internal cavity of system with two sheet metal samples, are revealed. Various designs of sources of a field (in particular, their windings) are shown. The analytical expressions for calculation of electromagnetic characteristics of considered systems are given.*