

Чаплыгин Е. А., канд. техн. наук, доц.,  
Барбашова М. В., аспирант

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

## ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

chaplygin\_e\_a@mail.ru

Предложена методика измерения магнитных характеристик в магнитно-импульсной обработке металлов. Получены рабочие соотношения для определения динамической и относительной магнитных проницаемостей тонкостенных листовых ферромагнетиков. Выражения представлены в виде, характеризующем пространственно-временную зависимость проницаемостей и позволяющем получать интегральную информацию о магнитном состоянии заготовки.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка металлов, магнитная проницаемость, тонкостенный листовой ферромагнетик.

### АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) открывает исключительные возможности для обрабатываемых технологий современности [1]. Можно выделить массу технологий традиционной магнитно-импульсной обработки разного рода стальных заготовок (например, плоская штамповка, обжим и раздача полых труб, холодная сварка и др.), магнитные свойства которых никак не влияли на успешность выполняемой производственной операции [1]. В основе этих технологий лежит возбуждение мощных пондеромоторных сил – сил отталкивания заготовки от источника поля. Действительно, при реальном силовом давлении на массивные объекты амплитуды напряжённости составляли  $\sim 10^7$  А/м и выше. В этом диапазоне действующих полей относительная магнитная проницаемость обрабатываемых металлов далека от своего максимума и стремится к единице [2,3]. Отличие её величины от предельного значения не оказывало влияния на эффективность обработки. Соответственно, вопрос об определении магнитных характеристик обрабатываемых металлов не представлял никакого практического интереса. Но с появлением разработок производственных операций, основанных на магнитно-импульсном притяжении ферромагнетиков, идентификация магнитной проницаемости объектов обработки при реальном силовом воздействии становится весьма актуальной. Результаты проведенных исследований дали основание полагать, что её величина, даже незначительно больше единицы, определяет амплитуды возбуждаемых сил магнитного притяжения заготовки к источнику поля – индуктору [3,4,5].

В подтверждение достоверности выше сказанного необходимо провести экспериментальные исследования.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Теоретическое обоснование методики измерений и определения характеристик тонкостенных листовых ферромагнетиков при реальном магнитно-импульсном притяжении.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для определения относительной магнитной проницаемости целесообразно использовать индукционные датчики, представляющие собой многовитковые катушечные зонды, выполненные на полом диэлектрическом каркасе [6].

В теле ферромагнитной листовой заготовки от центра к периферии выполняются два прямоугольных выреза. Их взаимное расположение: либо по радиусам под прямым углом (рис. 1б), либо по диаметру в противоположные стороны (рис. 1а). В одном из них полностью удалён металл и вместо удалённого металла крепится плоская прямоугольная вставка из диэлектрика. В другом оставлена полоска металла. Поперечные размеры вставки и металлической полоски таковы, что на них можно надеть полый диэлектрический каркас измерительного индукционного датчика.

Ферромагнитная листовая заготовка с вырезом устанавливается на рабочую поверхность индуктора – инструмента магнитно-импульсного притяжения. В режиме силового воздействия, индуцированные электрические сигналы с обмоток идентичных датчиков непосредственно или через интегратор подаются на вход осциллографа.

Отношение сигналов с обмоток датчиков даст величину магнитной проницаемости ферромагнитной заготовки в режиме реального импульсного силового воздействия.

### ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Достоверность рабочих соотношений должна подтверждаться физически обоснованной корректной постановкой задач и достаточно строгими математическими выкладками. Поэто-

му для получения аналитических выражений используются фундаментальные зависимости, описывающие процессы в теории электромагнитного поля – уравнения Максвелла и материальные связи между характеристиками полей

[6,7]. Далее, тождественным образом преобразуем их к виду, пригодному для практического использования.

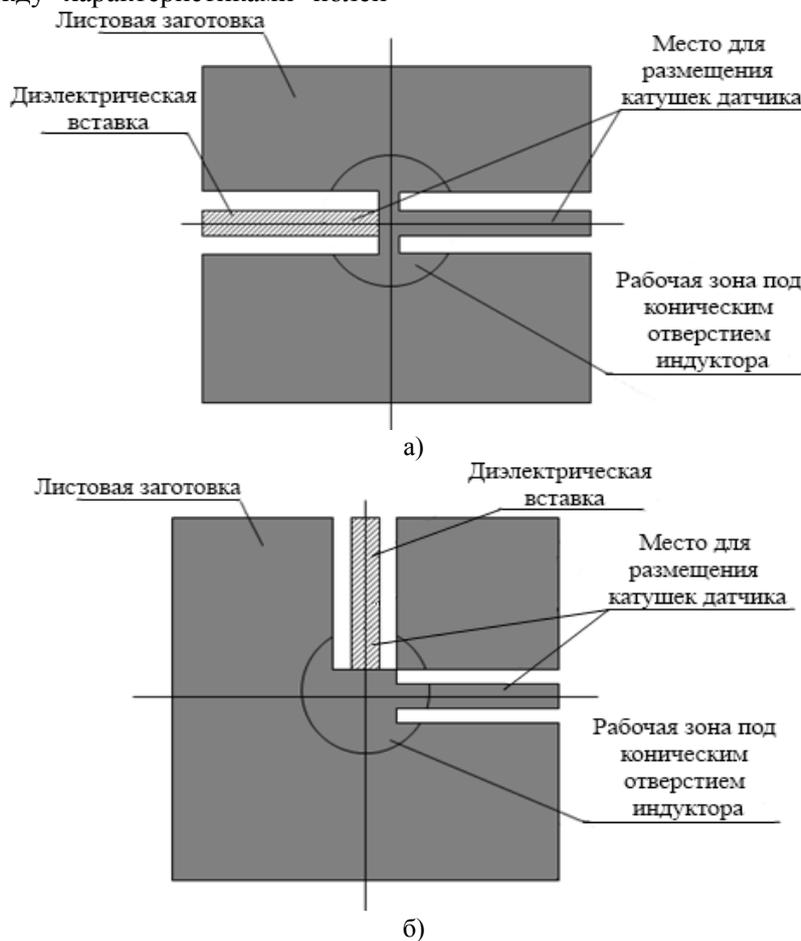


Рис. 1. Объект исследования, эскиз листовой заготовки.

Поскольку речь идёт о выводах, описывающих интегральные характеристики (то есть, процесс в целом), необходимо использовать математический аппарат усреднения по пространственным координатам и времени [7,8].

Для решения поставленной задачи используем уравнение Максвелла, связывающее электрическую напряжённость –  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  и индукцию –  $\vec{B}(\vec{r}, t)$  переменного поля [6]:

$$\text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t) = - \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (1)$$

где  $\vec{r}$  – совокупность пространственных координат,  $t$  – время.

После интегрирования по поверхности поперечного сечения –  $S$ , и применения несложных математических преобразований из данного выражения мы получаем следующее соотношение:

$$\varepsilon(t) = - \frac{\partial \Phi_s(t)}{\partial t} \quad (2)$$

где  $\varepsilon(t)$  – электродвижущая сила, возбуждаемая в контуре –  $L$ , ограничивающем поперечное сечение –  $S$  катушки датчика.

$\Phi_s(t)$  – магнитный поток через заданную поверхность поперечного сечения –  $S$  катушки датчика.

Выражение (2) представляет собой математическую запись закона электромагнитной индукции Майкла Фарадея [3,6,9]. Данный факт есть свидетельство достоверности полученного результата.

Для дальнейших преобразований необходимо отметить два важных обстоятельства:

- 1) величины в формуле (2) являются функциями места расположения обмотки датчика;
- 2) поперечное сечение датчика должно выбираться настолько малым, чтобы индукцию и напряжённость магнитного поля можно было считать константами в его пределах.

С учётом этих замечаний магнитный поток во внутренней полости датчика с многovitковой

обмоткой запишется как функция времени и координаты [3,6]:

$$\Phi_S(t, \zeta) \approx w \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_r(H(t, \zeta)) \cdot H(t, \zeta), \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $S$  – площадь поперечного сечения внутренней полости обмотки датчика;  $w$  – число витков в обмотке датчика,  $\mu_r(H(t, \zeta))$  – относительная магнитная проницаемость, как функция напряжённости магнитного поля,  $H(t, \zeta)$  – напряжённость магнитного поля (нормальная к поперечному сечению и тангенциальная к поверхности листового ферромагнетика),  $\zeta$  – обобщённая пространственная координата места расположения обмотки датчика.

Подставим (3) в (2) и выполним дифференцирование по времени. Опуская функциональное обозначение зависимости от времени, получим, что

$$\varepsilon(t, \zeta) \approx - \left( w \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial H(t, \zeta)}{\partial t} \right) \cdot \mu_n(H(t, \zeta)), \quad (4)$$

где

$$\mu_n(H(t, \zeta)) = \frac{d\mu_r(H(t, \zeta))}{dH} \cdot H(t, \zeta) + \mu_r(H(t, \zeta))$$

– нелинейная или динамическая магнитная проницаемость среды [2].

Введём следующие величины.

В катушке датчика, размещённого на диэлектрике, возбуждается Э.Д.С.:

$$\varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta) = - \left( w \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial H(t, \zeta)}{\partial t} \right). \quad (5)$$

Если датчик размещён на ферромагнетике, то

$$\varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta) = - \left( w \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial H(t, \zeta)}{\partial t} \right) \cdot \mu_n(H(t, \zeta)). \quad (6)$$

Разделив (6) на (5) и фиксируя зависимость только от окончательных аргументов –  $\{t, \zeta\}$ , получим следующее выражение для определения динамической магнитной проницаемости:

$$\mu_n(t, \zeta) = \frac{\varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta)}{\varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta)}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), динамическая проницаемость ферромагнетика может быть определена как отношение электродвижущих сил – Э.Д.С., возбуждаемых в катушках индукционных датчиков, размещённых на ферромагнитной и диэлектрической вставках в теле исследуемой листовой заготовки.

Для определения относительной магнитной проницаемости проинтегрируем по времени зависимость (2).

С учётом пространственного расположения датчика получим, что

$$\Phi_S(t, \zeta) = - \int_t \varepsilon(t, \zeta) \cdot dt. \quad (8)$$

В (8) подставим выражение для магнитного потока (3)

$$w \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_r(H(t, \zeta)) \cdot H(t, \zeta) = - \int_t \varepsilon(t, \zeta) \cdot dt. \quad (9)$$

Соответственно обозначениям ранее введенных величин, перепишем (9) в виде следующих зависимостей:

а) для диэлектрического заполнения внутренней полости индукционного датчика,

$$w \cdot S \cdot \mu_0 \cdot H(t, \zeta) = - \int_t \varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta) \cdot dt, \quad (10)$$

б) для ферромагнетика внутри катушки датчика,

$$w \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_r(H(t, \zeta)) \cdot H(t, \zeta) = - \int_t \varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta) \cdot dt. \quad (11)$$

Разделив (11) на (10), в терминах окончательных аргументов –  $\{t, \zeta\}$  получим, что

$$\mu_r(t, \zeta) = \frac{\int_t \varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta) \cdot dt}{\int_t \varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta) \cdot dt}. \quad (12)$$

Как следует из формулы (12), относительная магнитная проницаемость ферромагнетика может быть определена, как отношение проинтегрированных по времени Э.Д.С., возбуждаемых в обмотках датчиков, размещённых на ферромагнитной и диэлектрической вставках в теле исследуемой листовой заготовки.

Динамическая и относительная проницаемости в формулах (7) и (12) есть функции времени и координаты расположения обмотки измерителя. Это означает, что магнитные характеристики должны описываться некоторым пространственно-временным распределением в обрабатываемых заготовках.

Приведём зависимости (7) и (12) к виду, удобному в практических оценках.

Для временного усреднения характеристик ферромагнетиков необходимо провести усреднение числителей и знаменателей в формулах для проницаемостей по времени действия импульсов магнитного поля [10,11], после чего найти  $\bar{\mu}_n(\zeta)$  или  $\bar{\mu}_r(\zeta)$ , как отношение средних значений Э.Д.С. или их интегралов за время импульса в фиксированной точке расположения обмотки измерителя, соответственно

$$\bar{\mu}_n(\zeta) = \frac{\int_0^T \varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta) \cdot dt}{\int_0^T \varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta) \cdot dt}, \quad (13)$$

где  $T$  – длительность импульса;

$$\bar{\mu}_r(\zeta) = \frac{\int_0^T \left( \int_x \varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta) \cdot dt \right) dx}{\int_0^T \left( \int_x \varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta) \cdot dt \right) dx}. \quad (14)$$

Усреднение магнитных характеристик по пространственным переменным следует провести с учётом функциональных зависимостей от дискретных значений обобщённых координат –  $\zeta_k$ , фиксирующих места расположения датчиков в рабочей зоне индукторной системы [10,11].

$$\bar{\mu}_n = \frac{\sum_{k=1}^N \left( \int_0^T \varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta_k) \cdot dt \right)}{\sum_{k=1}^N \left( \int_0^T \varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta_k) \cdot dt \right)}, \quad (15)$$

где  $N$  – число точек расположения обмоток измерителя;

$$\bar{\mu}_r = \frac{\sum_{k=1}^N \left[ \int_0^T \left( \int_x \varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta_k) \cdot dt \right) dx \right]}{\sum_{k=1}^N \left[ \int_0^T \left( \int_x \varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta_k) \cdot dt \right) dx \right]}. \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) представляют собой соотношения для расчёта средних значений магнитных характеристик листовых заготовок в МИОМ.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика измерения магнитных характеристик в режиме реального силового воздействия при магнитно-импульсном притяжении тонкостенных листовых ферромагнетиков.

2. Исходя из фундаментальных зависимостей теории электромагнитного поля, получены рабочие соотношения для определения динамической и относительной магнитных проницаемостей.

3. Рабочие соотношения приведены к виду, позволяющему характеризовать как пространственно-временную зависимость проницаемостей, так и давать интегральную информацию о магнитном состоянии обрабатываемой заготовки по усреднённым показателям магнитных свойств её металла.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т.Хименко.- Харьков: Вища школа, 1977. - 190С.
2. Туровский Я. Техническая электродинамика. М: "Энергия". 1974. – 488С.
3. Круг К.А. Основы электротехники. М-Л: Главная редакция энергетической литературы. 1936. – 887С.
4. Meichtry R., Kouba I. Dent removing method and device. Patent US2008/0163661A1, Jul.10,2008.
5. Батыгин Ю. В. Особенности возбуждения электромагнитных сил при магнитно-импульсной обработке листовых ферромагнетиков / Ю.В. Батыгин, А. В.Гнатов // Техн. электродинамика. – К: 2012. – №1.
6. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М: «Мир». 1972.
7. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц – М: «Наука». 1982.
8. Корн Г.Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Изд-во «Наука», 1973. – 832 с.
9. Мэтьюз Дж. Математические методы физики. Пер. с англ. Крайнова В.П. / Дж. Мэтьюз, Р.Уокер – М: Атомиздат. 1972. – 399С.
10. Батыгин Ю. В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В.Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Электричество. – М: 2011. – №4.
11. Батыгин Ю. В. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю. В. Батыгин, С. Ф. Головащенко, А. В. Гнатов, Д. О. Смирнов // Электротехніка і електромеханіка.– Харків: 2010. –№3.