

## ИНДУКЦИОННАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С ДВОЙНЫМ ВИТКОМ

Батыгин Ю.В., д.т.н. проф., Сериков Г.С.  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25,  
тел. (057) 700-38-52

Бондаренко А.Ю., к.т.н., с.н.с.  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Инженерная электрофизика"  
тел (057) 707-62-45, e-mail: baiu@kharkov.ua

*Наведено результати експериментального дослідження індукційних індукторних систем прямокутної геометрії. Показано, що на відміну від циліндричної індукційної індукторної системи, подвійний виток прямокутної форми дозволяє домогтися істотно більше високого ступеня гладкості просторового розподілу вихрових струмів і порушуваних сил електродинамічного притягання в робочій зоні.*

*Приведены результаты экспериментального исследования индукционных индукторных систем прямоугольной геометрии. Показано, что в отличие от цилиндрической индукционной индукторной системы, двойной виток прямоугольной формы позволяет добиться существенно более высокой степени гладкости пространственного распределения вихревых токов и возбуждаемых сил электродинамического притяжения в рабочей зоне.*

### ВВЕДЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования цилиндрических индукционных индукторных систем достаточно полно осветили их достоинства и недостатки [1, 2].

Их основным преимуществом является простота технического исполнения и, соответственно, надёжность. Главный недостаток состоит в резко неоднородном радиальном распределении возбуждаемых сил электродинамического притяжения.

Индукционные индукторные системы с двойным прямоугольным витком, как показывают расчёты, позволяют значительно улучшить поперечное распределение индуцированных токов в листовой заготовке и вспомогательном экране, сделать это распределение более однородным и тем самым улучшить силовые характеристики инструмента данного типа и назначения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект исследований – индукционная индукторная система с плоским двойным прямоугольным витком, расположенным между двумя идентичными листами из нержавеющей стали. Последние расположены компланарно и симметрично относительно плоскости витка индуктора. Аналогично предыдущему, в настоящих экспериментах использовались листы из нержавеющей стали с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r \approx 1$ , удельной электропроводностью –  $\gamma \approx 0.4 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$  (определялась экспериментально) и толщиной  $d = 0.75$  мм.

Геометрия двойного витка, его расположение в исследуемой индукторной системе показаны на рис. 1:  $G = 12.5$  мм,  $L = g = l = 10$  мм,  $h = 0.001$  мм.

Фотография на рис. 2 иллюстрируют собственно исследуемую конструкцию в сборе.

Источник мощности – экспериментальный стенд, описанный [3].

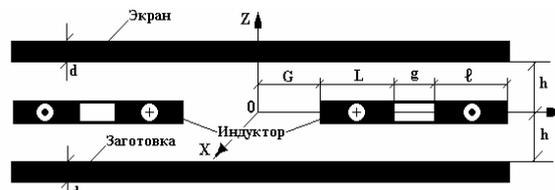


Рис. 1. Геометрия исследуемой системы

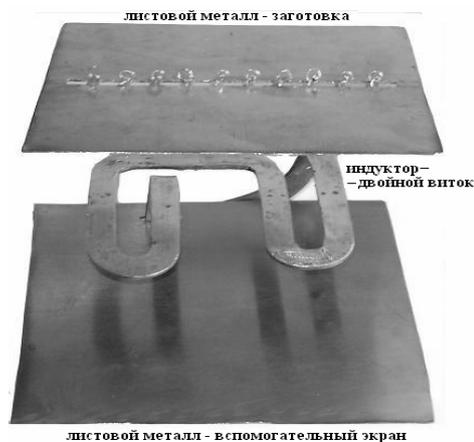


Рис. 2. Модельный вариант индукционной индукторной системы с двойным прямоугольным витком в сборе

Целью исследований являлось измерение основных характеристик процессов в инструментах магнитно-импульсного притяжения, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии плоских проводников с одинаково направленными токами.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТНЫМИ ЗАВИСИМОСТЯМИ

Измерение компонент напряженности магнитного поля проводилось индукционными датчиками (рис. 3.). Измерения индуцированных токов для большей достоверности проводились двумя методами.

Первый из них – это использование поясов Роговского, второй – по методике "прямого" измерения индуцированных токов, когда снимаются сигналы с

отдельных перемычек. В листовой заготовке вдоль средней линии рабочей зоны выполнялись прямо-угольные сквозные прорезы. В эти прорезы пропускались пояса Роговского. Снимаемый сигнал подавался на вход осциллографа. Во втором способе ("прямое" измерение) измерялось напряжения с перемычек между прорезями, каждая из которых представляла собой активное сопротивление, по которому протекала часть индуцированного тока. Сигнал с электрических выводов на краях перемычки подавался на вход осциллографа (рис. 4). Отличительной позитивной особенностью данного подхода в измерениях являлась прямо пропорциональная зависимость между снимаемым напряжением и протекающим током.

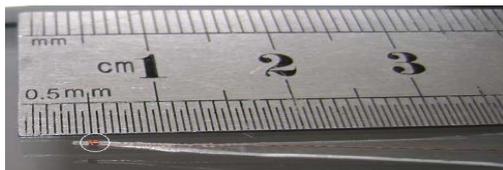


Рис. 3. Датчик для измерения тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля (собственно катушечный зонд обведен окружностью)

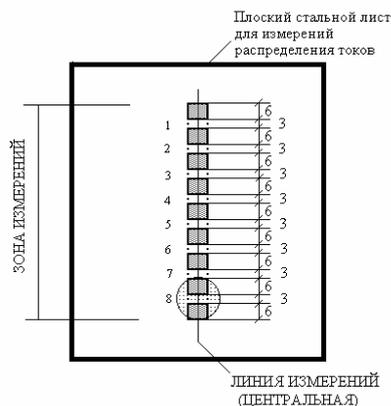


Рис. 4. Схема измерений характеристик электромагнитных процессов в исследованной индукторной системе

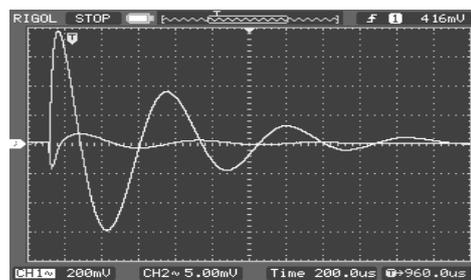
Сигналы в различных способах измерения, обрабатывались соответствующими методиками (пояс Роговского – интегрирование, "прямое" – деление на сопротивление перемычки). Их сравнение по амплитуде и разбросу временных параметров показало различия, не превышающие  $\sim 10\div 15\%$ .

Начнём с временных зависимостей.

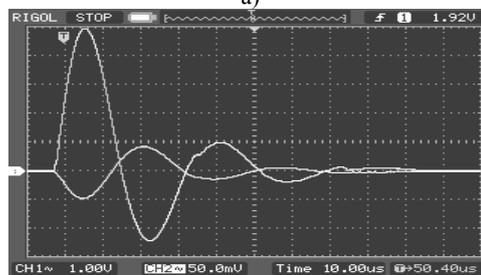
На рис. 5 приведены осциллограммы возбуждающего тока в индукторе (вверху) и индуцированных токов (внизу).

Как следует из измерений, вихревые токи, обеспечивающие силовое взаимодействие в системе, при низких значениях рабочих частот имеют обостренный фронт. Этот факт уже отмечался ранее.

Пространственные распределения индуцированных токов и компонент вектора напряжённости возбуждаемых магнитных полей приведены на рис. 6. Результаты измерений оттенены соответствующими расчётными зависимостями по формулам, полученным ранее для низкочастотного временного режима исследуемой системы.

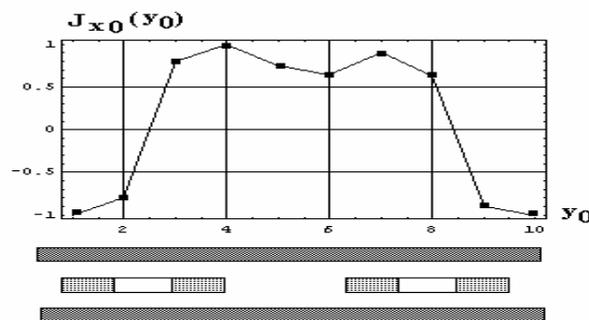


а)

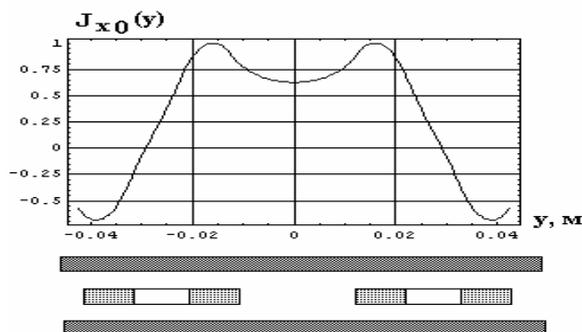


б)

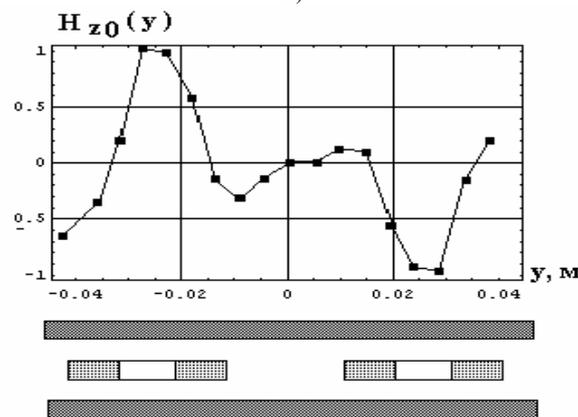
Рис. 5. Осциллограммы тока в индукторе (вверху) и вихревого тока в листовых металлах (внизу): а) – при рабочей частоте 1.33 кГц, б) – при рабочей частоте 33 кГц



а)



б)



в)

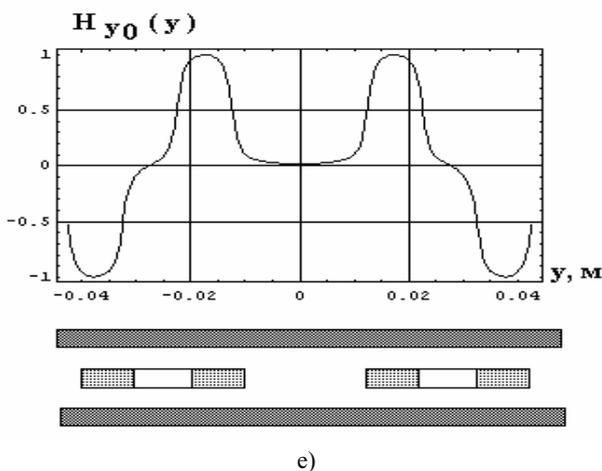
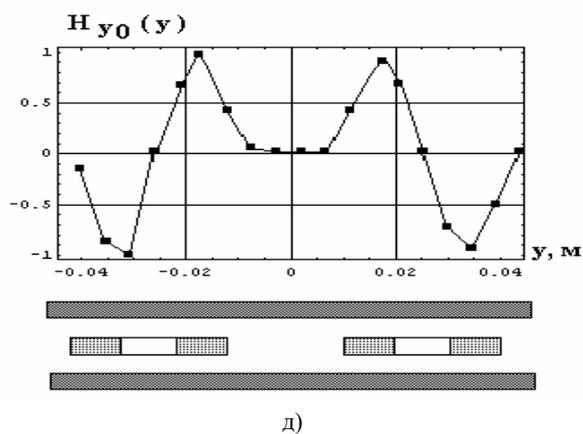
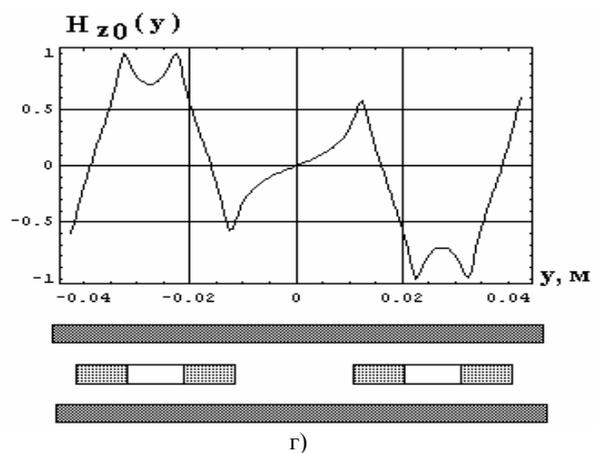


Рис. 6. Экспериментальные поперечные распределения основных характеристик электромагнитных процессов в исследуемой индукторной системе с двойным прямоугольным витком при рабочей частоте  $\sim 1.33$  кГц, - индуцированные токи, а) – измерения, б) – расчёт, в) – касательная компонента напряжённости магнитного поля, г) – измерения, д) – расчёт, - нормальная компонента напряжённости магнитного поля, е) – расчёт

**Примечание.** Отношение амплитуд токов в индукторе и листовом металле составляет  $\sim 13$ .

Кривые рис. 6а, 6б иллюстрируют пространственное распределение индуцированных токов. Учитывая, что силы притяжения проводников с параллельными токами пропорциональны их произведению (в данном случае это индуцированные токи!), с помощью графика на рис. 6а можно построить качественную экспериментальную картину пространственного распределения этих сил в исследованной индукторной системе. Профиль этой зависимости в рабочей зоне между внутренними токопроводами двойного витка приведен на рис. 7.

Рис. 7. Пространственное распределение сил притяжения в центральной части рабочей зоны индукторной системы

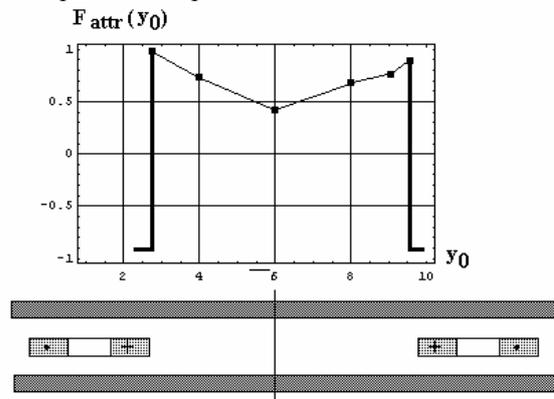


Рис. 7. Пространственное распределение сил притяжения в центральной части рабочей зоны индукторной системы

## ВЫВОДЫ

Основным результатом проведенных экспериментов является следующий вывод.

В отличие от цилиндрической индукционной индукторной системы, как это хорошо видно из зависимостей на рис. 6а, 6б, двойной виток прямоугольной формы позволяет добиться существенно более высокой степени гладкости пространственного распределения вихревых токов, а следовательно, и достаточной гладкости пространственного распределения возбуждаемых сил электродинамического притяжения, (см. рис. 7).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чаплыгин Е. А. Магнитное поле в тонкостенной листовой заготовке при низких значениях рабочих частот. // Электротехника і електромеханіка. – 2006. - №6. - С.71-73.
- [2] Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2007. - №. - С.109-117.
- [3] Бондаренко А. Ю., Сериков Г. С., Чаплыгин Е.А. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования. // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. - №6. - С. 66-69.

Поступила 21.08.2008