

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ПЛОСКИХ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛАХ**

Батыгин Ю.В., д.т.н., проф., Чаплыгин Е.А.  
Харьковский Национальный автомобильно-дорожный университет  
Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, "Автомобильная электроника"  
тел. (057) 700-38-52, E-mail: batygin@kpi.kharkov.ua, chaplygin\_e\_a@mail.ru.

*Запропонована та описана методика прямого вимірювання індукованих струмів у плоских листових заготовках індукторних систем для магніто-імпульсної обробки металів. Проведені експерименти підтвердили достовірність теоретичних висновків про змінення часової форми індукованих сигналів у порівнянні зі струмом індуктора при зниженні робочих частот діючих полів. Для гармонічного процесу зсув за фазою між збуджуючим та індуктованим сигналами складає  $\sim \pi/2$ .*

*Предложена и описана методика прямого измерения индуцированных токов в плоских листовых заготовках индукторных систем для магнитно-импульсной обработки металлов. Проведенные эксперименты подтвердили достоверность теоретических выводов об изменении временной формы индуцированных сигналов по сравнению с током индуктора при понижении рабочих частот действующих полей. Для гармонического процесса сдвиг по фазе между возбуждающим и индуцированным сигналами составляет  $\sim \pi/2$ .*

В работах [1, 2] проведен теоретический анализ электродинамических процессов возбуждения вихревых токов в плоских листовых металлах при магнитно-импульсной обработке металлов.

Идеализированные приближения в совокупности со строгими расчётами, выполненными без упрощающих допущений, показали, что в случае резкого поверхностного эффекта (хороший массивный проводник) индуцированный ток является зеркальным отражением тока в индукторе. Направления токов – противоположны. В случае экспоненциально затухающего гармонического сигнала это соответствует сдвигу по фазе  $\sim \pi$ . Данный факт известен, но в проведенном исследовании он является лишь иллюстрацией, оттеняющей особенность электромагнитных процессов, появляющаяся при работе низкими частотами действующих полей и достаточно тонкостенными металлами. В этом случае временная зависимость индуцированного тока трансформируется в производную тока индуктора. Для экспоненциально затухающей синусоиды сдвиг по фазе между ними сокращается до величины  $\sim \pi/2$ .

Проведенные вычисления требуют реальных измерений для определения достоверности полученных результатов и логического завершения затронутых вопросов.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования процессов возбуждения вихревых токов в различных временных режимах действующих полей. Объект исследования – листовые металлы в плоских одновитковых индукторных системах для магнитно-импульсной обработки металлов. Источник мощности – экспериментальный стенд, специально созданный для адекватного моделирования реальных электромагнитных процессов. Фактически, стенд представляет собой модельную магнитно-импульсную систему, работающую в слаботочном режиме многократного повторения разрядных импульсов, следующих с частотой, кратной рабочей частоте напряжения питающей промышленной сети (50

Гц, 25 Гц и т.д.). Периодически повторяющаяся картинка разряда формируется в устойчивое стационарное изображение на экране осциллографа (аналогия со стробоскопическим эффектом!). Стенд позволяет проводить необходимые измерения при низких напряжениях и относительно малых токах в объектах исследования [3].

В отличие от широко используемых датчиков индукционного типа, известных в специальной литературе как пояса Роговского [4, 5], для измерения индуцированных токов была предложена и реализована схема, где измеряемый ток в соответствии с законом Ома будет прямо пропорционален снимаемому сигналу. Последний факт является несомненным преимуществом настоящего предложения в сравнении с индукционными системами измерения, поскольку оно не требует включения в схему специальных преобразователей (интеграторов), существенно ограничивающих практические возможности индикационных устройств данного типа.

Принципиальная схема прямого измерения вихревых токов и её возможной реализации приведены на рис. 1.

Из физических соображений, представляется, что вихревые токи текут по круговым контурам, центры которых совпадают с геометрическим центром листовой заготовки. Если выполнить радиальный разрез и в разрыв подключить активное сопротивление, то на краях разреза индуцированный ток разветвляется на три составляющие –  $I=I_1+I_2+I_3$ .

Первая составляющая –  $I_1$  протекает по металлу заготовки вдоль разреза к её центру (активное сопротивление –  $R_1$ ), вторая –  $I_2$  – через разрез (ёмкость –  $C$ ), наконец, третья –  $I_3$  должна протекать через подключённое активное сопротивление –  $R_3$ . Вне разреза индуцированный ток замыкается через эквивалентную индуктивность –  $L$  и активное сопротивление –  $R$  так, как это показано на эквивалентной схеме замещения рис. 1а.

Данная схема позволяет провести необходимые

оценки и сформулировать требования к подключённому активному сопротивлению –  $R_3$ , с которого снимается сигнал и подаётся на вход осциллографа.

Если удовлетворяются неравенства  $\{R_3 \ll (\omega \cdot L); R_3 \ll (1/\omega \cdot C); R_3 \ll R_1\}$ , то, весь индуцированный ток сосредоточится в подключённом активном сопротивлении –  $R_3$ . Поскольку снимаемый сигнал – это напряжение –  $U$ , то собственно ток будет равен  $J=U/R_3$ . Таким образом, имеет место индикация вихревых токов не по их временным производным, а по пропор-

циональному сигналу с коэффициентом пропорциональности  $\sim 1/R_3$ .

Как показывают численные оценки, в качестве активного сопротивления –  $R_3$ , с которого снимается сигнал, подаваемый на осциллограф, может служить перемычка в радиальном разрезе листовой заготовки (см. рис. 1б). Величина её сопротивления легко устанавливается известным соотношением, в которое входит удельное сопротивление металла заготовки. Последнее должно определяться отдельно.

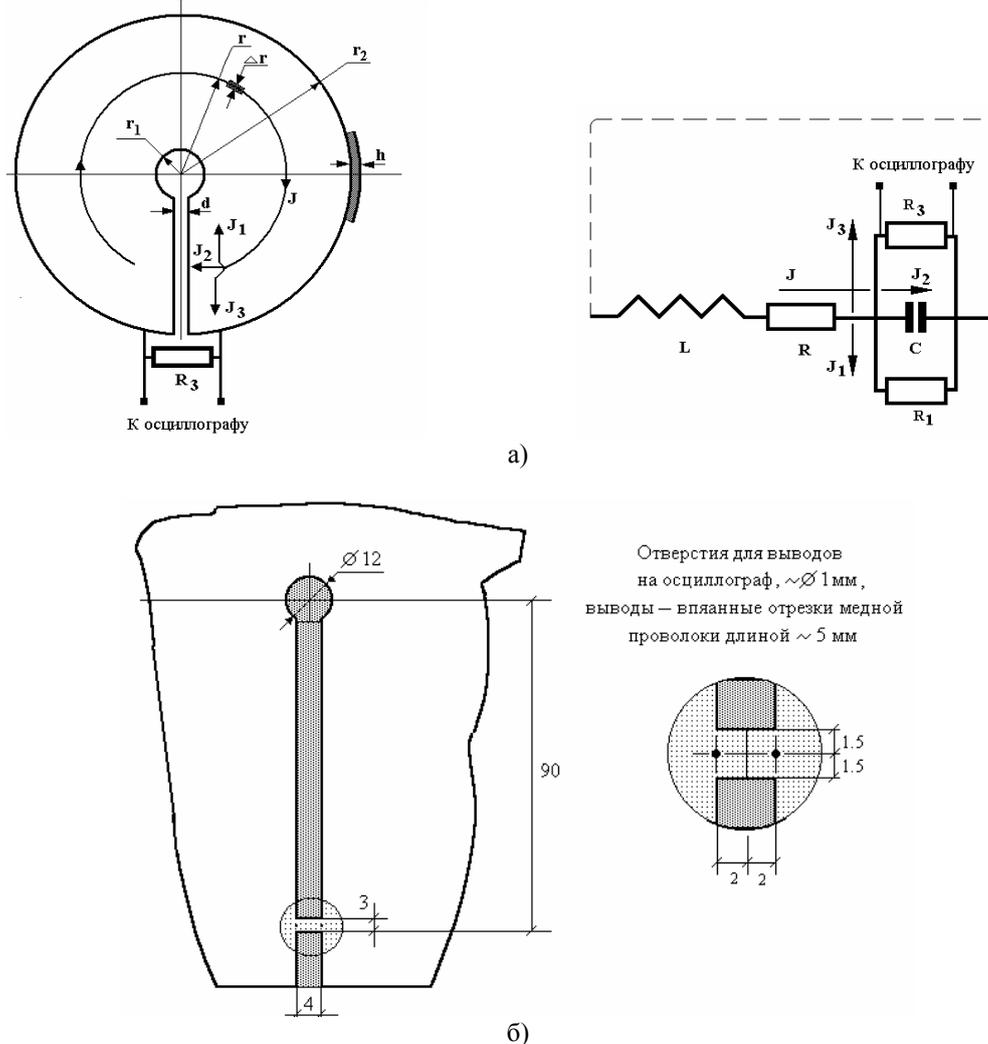


Рис. 1. Прямое измерение суммарной величины вихревых токов, индуцированных в листовой заготовке (а) принципиальная электрическая схема замещения; б) листовая заготовка с радиальным разрезом и перемычкой)

В экспериментах использовалась листовая заготовка  $br$  нержавеющей стали с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r \approx 1$ , удельной электропроводностью  $\gamma \approx 0.133 \cdot 10^7$  (1/Ом·м) (определялась экспериментально) и толщиной  $d \approx 0.75$  мм.

Геометрия перемычки:  $0.004 \text{ м} \times 0.003 \text{ м} \times 0.00075 \text{ м}$ . Величина сопротивления составляла  $R_3 \approx 0.0013$  Ом.

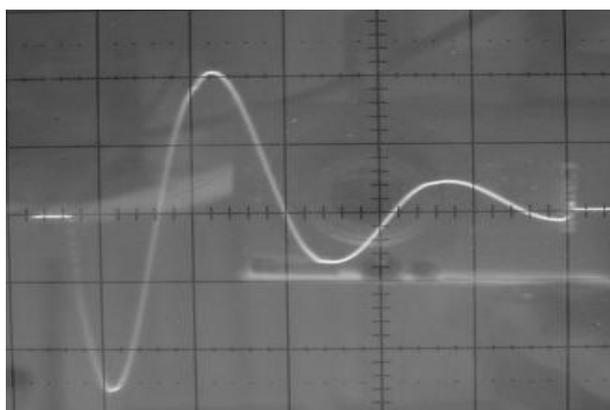
Источником магнитного поля, действующего на заготовку, служил индуктор из алюминия толщиной  $\sim 0.5$  мм с поперечными размерами  $\{R_1=54 \text{ мм}, R_2=64 \text{ мм}\}$ .

К электрическому выходу экспериментального стенда индуктор подключался через импульсные трансформаторы, позволявшие варьировать не только

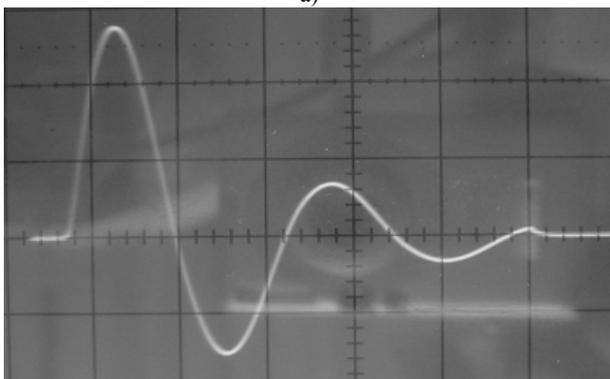
временные, но и амплитудные, характеристики токовых импульсов.

Основные результаты измерений индуцированных токов при различных рабочих частотах действующего магнитного поля представлены ниже в виде осциллограмм на рисунках 2 и 3.

Для экспериментальных значений рабочих частот величины скин-слоя составляют  $\delta_{33 \text{ кГц}} \approx 0.0024$  м,  $\delta_{1.33 \text{ кГц}} \approx 0.0012$  м. Отношения толщины образца к величинам эффективной глубины проникновения поля будут равны  $d/\delta_{33 \text{ кГц}} \approx 3.1$ ,  $d/\delta_{1.33 \text{ кГц}} \approx 0.0625$ .

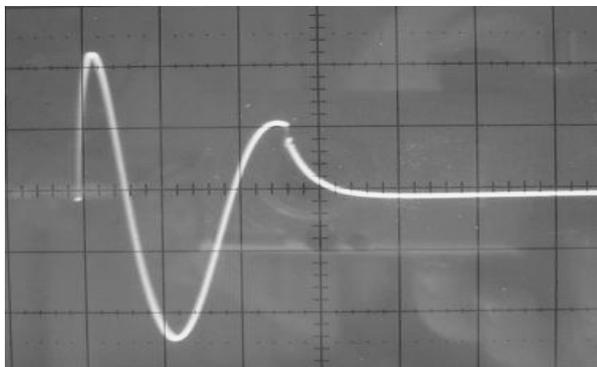


а)

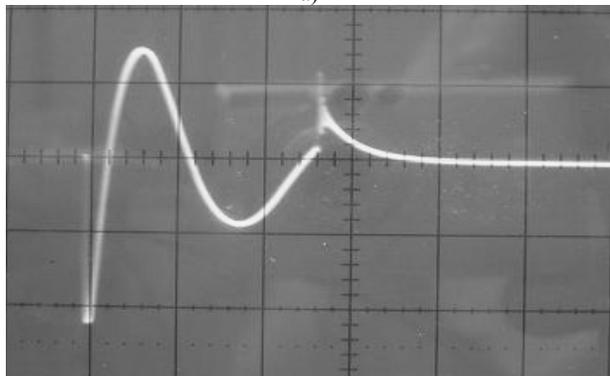


б)

Рис. 2. Осциллограммы токов в индукторной системе при частоте 33 кГц (а - токовый импульс в индукторе; б - токовый импульс, индуцированный в металле листовой заготовки)



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы токов в индукторной системе при частоте 1.33 кГц, (а - токовый импульс в индукторе; б - токовый импульс, индуцированный в металле листовой заготовки)

В первом случае диффузия поля, как показывают приведенные численные оценки, весьма незначительна. Как следует из осциллограммы на рис. 2, имеет место небольшое различие временной формы индуцированного сигнала и тока индуктора. Это различие просматривается в начальной фазе процесса. С определенной степенью условности данный режим взаимодействия поля с экспериментальным образцом можно рассматривать как режим резкого поверхностного эффекта. С практической точки зрения изменением временной формы индуцированного сигнала по сравнению с током индуктора можно пренебречь.

Во втором случае рабочая частота понижается почти в  $\sim 30$  раз. Проникновение магнитного поля становится много существеннее. Растёт искажение временной зависимости вихревых токов на фронте импульса. Этот факт наглядно иллюстрирует ранее отмеченную особенность электромагнитных процессов на низких частотах. Временная зависимость индуцированного тока трансформируется в производную тока индуктора. Для экспоненциально затухающей синусоиды сдвиг по фазе между ними действительно сокращается до величины  $\sim \pi/2$ .

#### ВЫВОДЫ

1. Предложена и описана методика прямого измерения индуцированных токов в плоских листовых заготовках индукторных систем для магнитно-импульсной обработки металлов. Несомненными преимуществами предложения являются прямая пропорциональность измеряемого тока снимаемому сигналу и отсутствие каких-либо дополнительных преобразующих устройств.

2. Проведенные эксперименты подтвердили достоверность теоретических выводов об изменении временной формы индуцированных сигналов по сравнению с током индуктора при понижении рабочих частот действующих полей. Временная зависимость вихревых токов стремится к производной тока индуктора. Для гармонического процесса сдвиг по фазе между возбуждающим и индуцированным сигналами составляет  $\sim \pi/2$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А., Особенности токов индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах // *Электротехника и электромеханика // Журнал*. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ". – 2005. - №3. – С. 69-73.
- [2] Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Вихревые токи в плоских металлических заготовках. // *Электротехника и электромеханика // Журнал*. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ". – 2005. – №5. – С. 54-59.
- [3] 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. Харьков: Изд. "МОСТ-Торнадо". 2003.- 288 с.
- [4] Кнопфель Г. ,Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 392 с.
- [5] Окунь И. З., Измерение разрядных токов поясами Роговского // *Приборы и техника эксперимента*. – 1968. - №6. – С. 120–126.

Поступила 17.12.2007