

Ю.В.БАТЫГИН, докт.техн.наук;
А.Ю.БОНДАРЕНКО, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В СИСТЕМЕ ТРЕХ ПЛОСКИХ ПЛАСТИН С n ПРОДОЛЬНЫМИ ПРОРЕЗЯМИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТОКОНЕСУЩЕЙ

Проанализовано величину співвідношення між електродинамічними силами відштовхування й притягання, що виникають у системі трьох плоских ізолюваних друг від друга пластин; у центральній струмонесучій є n поздовжніх прорізів. Показано, що величина цього співвідношення має екстремум, який залежить від геометрії системи.

A value of the relationship between the electrical dynamical repelling forces and attracting ones that appear, in the system of three insulated plates, the central of which has n longitudinal cuts, was analyzed. It was shown that this relationship value has an extremum that depends on the system geometry.

Одним из направлений развития магнитно-импульсной обработки металлов является исследование процессов электромагнитного притяжения обрабатываемой заготовки к плоскому индуктору [1] и создание индукторных систем, позволяющих выполнять подобную технологическую операцию. В работе [2] проанализировано распределение напряженности магнитного поля в плоской индукторной системе с экраном. В подобных системах возникают как электромагнитные силы отталкивания между проводниками с разно направленными токами, так и электромагнитные силы притяжения, которые и используются для выполнения технологической операции.

Целью работы является анализ электродинамических усилий, возникающих в системе трех плоских проводящих пластин, изолированных друг от друга, при протекании импульсного тока по центральной пластине, имеющей n продольных разрезов.

Рассматриваемая система моделирует токопровод плоского индуктора, имеющий n продольных разрезов, плоскую заготовку и экран, расположенные симметрично по обе стороны от источника магнитного поля (индуктора). Расчетная модель поперечного сечения системы показана на рис. 1.

В токопроводе общей ширины L выполнено n продольных разрезов. По обе стороны токопровода (индуктора) симметрично и на расстоянии h друг от друга расположены плоские параллельные проводники (экран и листовая заготовка).

Примем следующие допущения.

– взаимодействие магнитного поля индуктора и вихревых токов, наведенных в экране и заготовке, приводит к появлению сил магнитного давления (сил отталкивания) с амплитудой, пропорциональной квадрату средней

напряженности магнитного поля на поверхностях экрана и заготовки;

– сквозь продольные прорезы индуктора происходит притяжение параллельных токов, индуцированных в экране и листовой заготовке;

– распределенная сила притяжения на единицу площади (давление с обратным знаком) приблизительно равна алгебраической сумме всех сил взаимодействия одинаково направленных токов в экране и листовой заготовке, сквозь прорезы, деленной на площадь участка произвольной длины ℓ с шириной L , равной ширине индуктора.

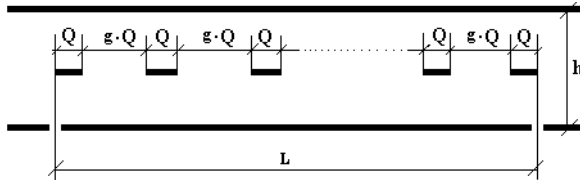


Рисунок 1 – Расчетная модель токопровода индуктора с n продольными прорезями, обрабатываемой заготовкой и экраном. $Q, g \cdot Q$ – ширина участка токопровода между прорезями и ширина прорези, соответственно

Амплитуды токов, индуцированных в экране или заготовке, можно определить как произведение средней относительной напряженности магнитного поля (безразмерная величина) на их поверхностях в зоне каждой прорези – $\bar{H}_{0и}$ [2] на ее амплитудное значение и ширину прорези:

$$I_{инд} = H_m \cdot \bar{H}_{0и} \cdot (g \cdot Q), \quad (1)$$

где H_m – амплитуда напряженности магнитного поля индуктора, $H_m \approx j_m$;
 j_m – линейная плотность тока в индукторе.

Рассматривая взаимодействие сквозь прорезы в индукторе, индуцированных в экране и заготовке токов, в соответствии с принятыми допущениями, находим, что распределенная сила притяжения между n параллельными проводниками шириной $(g \cdot Q)$ с токами $I_{инд}$ на некоторой длине ℓ , приходящаяся на единицу площади, определяется выражением [3,4]:

$$P_{пр} = \frac{F_{пр}}{L \cdot 1} = \frac{1}{L \cdot 1} \left(n \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{инд}^2 \cdot \frac{1}{h} \cdot G \cdot \left(\frac{g \cdot Q}{h} \right) \right) = n \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{инд}^2 \cdot \frac{1}{L \cdot h} \cdot G \cdot \left(\frac{g \cdot Q}{h} \right), \quad (2)$$

где $G\left(\frac{g \cdot Q}{h}\right)$ – функция, учитывающая конечную ширину взаимодействующих проводников, ее можно аппроксимировать гиперболической зависимостью [4]:

$$G\left(\frac{g \cdot Q}{h}\right) \approx \frac{1}{1 + 0.27 \cdot \left(\frac{g \cdot Q}{h}\right)}.$$

Отметим, что в выражении (2) динамика процессов не учитывается, так как, в конечном итоге, определяется отношение давлений (отталкивание и притяжение), которые содержат одинаковые множители, устанавливающие их зависимость от характера процесса во времени.

Подставим (1) в формулу (2).

Получим, что

$$P_{\text{пр}} \approx n \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot (H_m \cdot \bar{H}_{0и} \cdot g \cdot Q)^2 \cdot \frac{1}{L \cdot h} \cdot \frac{1}{1 + 0,27 \cdot \left(\frac{g \cdot Q}{h} \right)}. \quad (3)$$

Магнитное давление со стороны поля индуктора на каждый из проводников, расположенных по обе стороны от него, равно [5]:

$$P_{\text{отт}} \approx \frac{\mu_0}{2} \cdot (H_m \cdot \bar{H}_0)^2, \quad (4)$$

где \bar{H}_0 – среднее значение напряженности магнитного поля на поверхностях экрана и заготовки.

Найдем отношение действующих давлений.

После преобразований, учитывая, что $L = Q \cdot [n \cdot (g+1) + 1]$, получаем:

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{отт}}} \approx \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\bar{H}_{0и}}{\bar{H}_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \cdot \left(\frac{n}{n+1} \right)} \cdot \frac{\left(\frac{g \cdot Q}{h} \right)}{\left(1 + 0,27 \cdot \left(\frac{g \cdot Q}{h} \right) \right)}. \quad (5)$$

Рассчитаем распределение напряженности магнитного поля, а значит и индуцированных токов, на поверхностях экрана и заготовки, используя результаты работы [2], для системы из трех пластин с 10 продольными прорезями в центральной токонесящей и различной ее геометрией. Результаты расчетов в виде графиков представлены на рис. 2.

Как следует из графиков рис. 2, с увеличением ширины разреза падает амплитуда наведенного сигнала.

В относительных величинах (по отношению к плотности тока в индукторе) с ростом ширины разреза более чем в два раза от 2 мм до 4,5 мм при постоянной ширине проводников между ними 3 мм индуктивная связь падает от 0,3 до 0,2, то есть более чем на 30 %.

Поскольку все расчетные кривые получены для разрезов разной ширины, но одинакового поперечного размера участка между ними. То есть, плотность возбуждающего тока в индукторе будет одинаковой и равной:

$$j_m \approx H_m \approx \frac{I_m}{(n+1) \cdot Q} \Big|_{\substack{n=10 \\ Q=0,003 \text{ м}}} \approx 30,3 \cdot I_m. \quad (6)$$

Это значение позволяет оценить амплитуды индуцированных сигналов

в экране и листовой заготовке. Результаты расчетов по формуле (5) для рассматриваемой системы приведены на рис. 3.

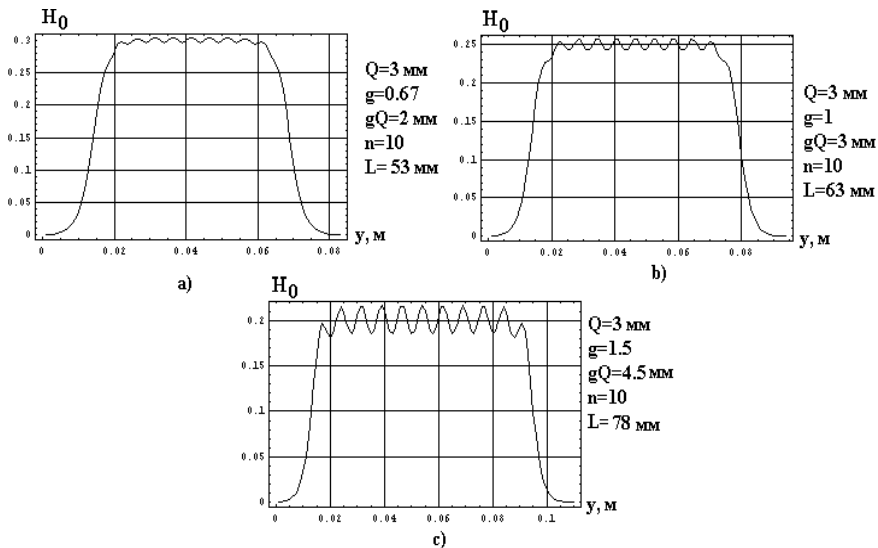


Рисунок 2 – Распределение напряженности магнитного поля на поверхностях экрана и заготовки при 10 продольных разрезах в токопроводе и различной его геометрии

Отношение величин сил электромагнитного притяжения между индуцированными токами сквозь продольные прорезы в токопроводе индуктора и сил магнитно-импульсного отталкивания (см. рис. 3) имеет экстремум. В данном конкретном случае силы притяжения не могут превышать ~ 50 % амплитуд сил отталкивания.

С физической точки зрения, в случае достаточно узких, как и в случае, достаточно широких прорезей должно происходить уменьшение средней амплитуды тока, наведенного в зоне прорезей, и к соответствующему падению сил притяжения. При определенном соотношении поперечных размеров прорезей и ширины проводников должна иметь место ситуация, в которой соотношение напряженности магнитного поля, ответственного за появление сил притяжения, и напряженности магнитного поля, обуславливающей силы отталкивания, будет экстремальным.

Необходимо отметить важное обстоятельство. Выполненные оценки соотношения электромагнитных сил отталкивания и притяжения являются заниженными, поскольку, если токопровод «прозрачен» для действующих полей, то взаимодействие токов экрана и заготовки может осуществляться не только через прорезы, но и непосредственно через металл индуктора. Напри-

мер, при частоте разрядного тока, протекающего в индукторе, ~ 5 кГц глубина скин-слоя в стали, составляет $\sim 2,94$ мм. Если же материал, из которого изготовлен токопровод индуктора, сталь, толщиной ~ 2 мм, то, оценивая взаимодействие токов в экране и заготовке за счет диффузионных эффектов, можно сказать, что сила притяжения будет в $\sim 1,5$ раза больше, чем в проведенных вычислениях.

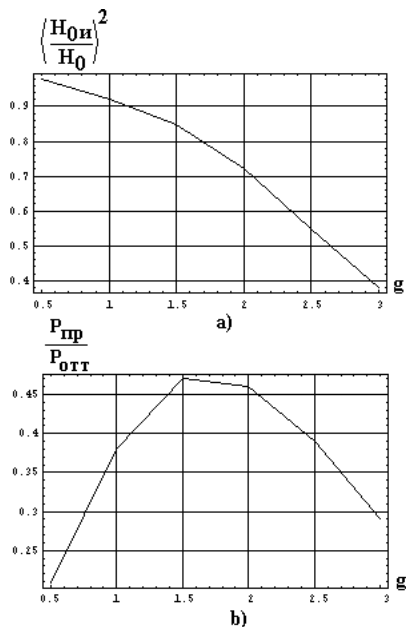


Рисунок 3 – Результаты расчетов по формуле (5): а) квадрат отношения средней напряженности магнитного поля по ширине токопровода индуктора и средней напряженности магнитного поля в зоне разреза в зависимости от его относительной ширины; б) отношение амплитуд сил притяжения и отталкивания в зависимости от относительной ширины разреза токопровода

Расчеты, проведенные по формулам работы [2], показали, что неоднородность в распределении плотности тока в индукторе приводит к искажению картины распределения индуцированных токов и, соответственно, к изменению характера их силового взаимодействия, но при этом общая картина не меняется.

Для более полного подавления эффекта отталкивания обрабатываемой заготовки от токопровода индуктора необходимо существенное увеличение общей ширины токопровода индуктора при одновременном увеличении количества продольных прорезей, что определяется для каждой конкретной

индукторной системы. Полученные результаты и рекомендации работы [2] были использованы при проектировании индуктора, предназначенного для выполнения технологической операции притяжения плоской обрабатываемой заготовки. Общий вид индуктора показан на рис. 4.

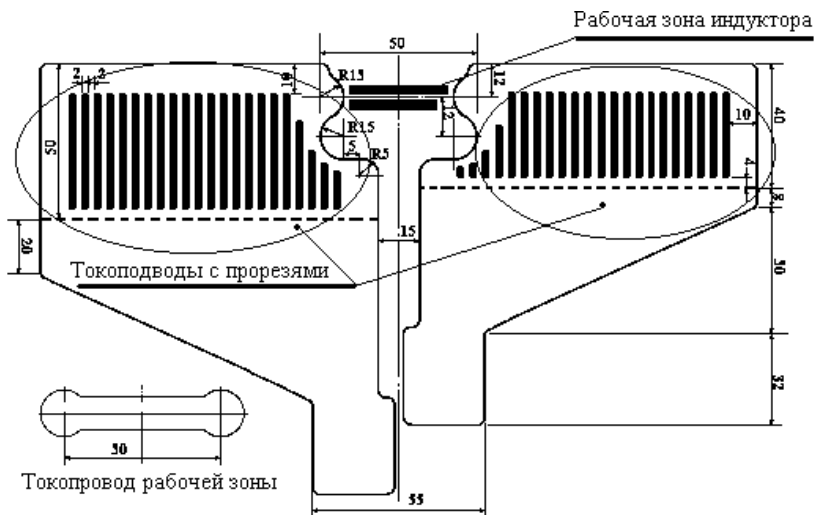


Рисунок 4 – Индуктор с продольными прорезями в токопроводах для выполнения технологической операции притяжения плоской заготовки

Список литературы: 1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 80-84. 2. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. . Распределение напряженности магнитного поля в плоской индукторной системе с экраном // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 17. – С. 55-64. 3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – 4-е изд., перераб. – М.: Наука, 1968. – 940 с. 4. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. Анализ электродинамических усилий в системе плоский индуктор прямого пропускания тока – обрабатываемая заготовка // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. –Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 37. – С. 55-62. 5. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. –Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.

Поступила в редакцию 26.03.2007.