

УДК 621.3 : 538.3

Панасенко О.Т.

Харьковский государственный политехнический университет

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ПЛАСТИНУ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ИНДУКТОРА-ТОКОПРОВОДА

© Панасенко О.Т., 2000

Описано математичну модель перехідного процесу, що виникає при розряді ємнісного накопичувача енергії на систему індуктор-струмопровід-пластина. На прикладах розрахунку показано вплив ширини внутрішнього витка та міжвиткового отвору індуктора-струмопровода на розподіл електродинамічних зусиль на поверхні пластини.

В магнитно-импульсной обработке металлов по схеме “листовая штамповка” [1] используют индукторы-токопроводы (рис.1, 2), состоящие из параллельных шин произвольного поперечного сечения, определенным образом соединенных между собой. В работе [4] были предложены математические модели систем индуктор-токопровод-пластина, которые позволяют найти импульсные токораспределения во всех проводниках и определить интегральные электромагнитные характеристики (импульсную или переходную проводимость [3]). При проектировании таких систем необходимо также знать распределение электродинамических усилий, действующих на пластину. Для систем с осевой симметрией этому вопросу посвящены работы [2, 6]. При этом влияние междувитковых зазоров на распределение электромагнитного поля и электродинамических усилий считалось распределенным по всей ширине индуктора, что приемлемо для систем с очень большим числом витков. Кроме того, ток в индукторе полагался известным, а поверхностный эффект не учитывался. В предлагаемой в этой статье методике число витков в индукторе может быть любым, ток определяется в результате анализа переходного процесса, а в проводниках системы учитывается поверхностный эффект в переходном режиме.

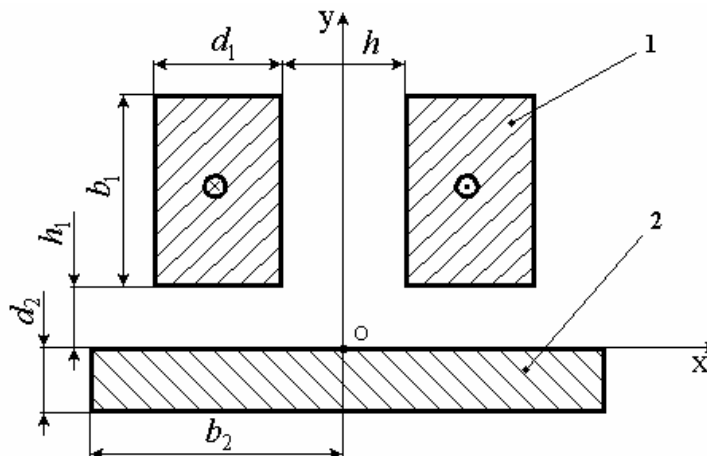


Рис.1. Размеры поперечного сечения пластини.

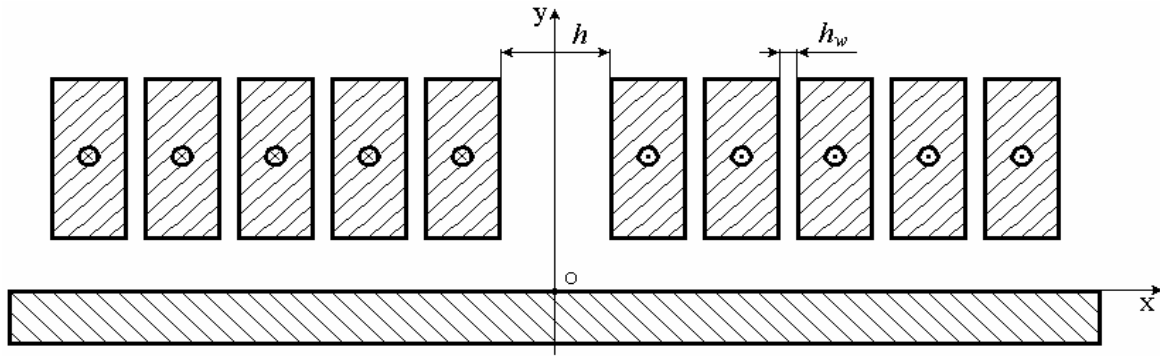


Рис.2. Индукторы-токопроводы.

Основные допущения те же, что и в работе [4]: а) магнитное поле системы полагаем плоским; б) соблюдаются условия квазистационарности; в) проводники являются немагнитными, неподвижными и имеют неизменные во времени электрофизические характеристики.

Полагаем, что известны распределение $E_1(P,t)$ напряженности электрического поля (плотности тока) в проводниках при воздействии на индуктор-токопровод единичного напряжения, а также импульсная или переходная проводимость системы.

В соответствии с первым допущением векторы напряженности электрического поля \vec{E} , плотности электродинамических усилий \vec{f} и индукции магнитного поля \vec{B} имеют такую структуру в декартовых координатах:

$$\vec{E}\{0; 0; E_z\}, \quad \vec{f}\{f_x; f_y; 0\}, \quad \vec{B}\{B_x; B_y; 0\}. \quad (1)$$

Рассмотрим переходный процесс при разряде емкостного накопителя энергии на индуктор-токопровод, параллельно которому расположена проводящая пластина. Процесс описывается системой двух уравнений для тока и напряжения на индукторе при разряде емкостного накопителя энергии

$$r_C i(t) + L_C \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau - U_0 + u(t) = 0 \quad (2)$$

$$i(t) - \int_0^t y(t-\tau) u(\tau) d\tau = 0 \quad (3)$$

или

$$i(t) - \int_0^t i_1'(t-\tau) u(\tau) d\tau = 0, \quad (4)$$

где r_C , L_C , C , U_0 – параметры емкостного накопителя энергии соответственно его активное сопротивление, индуктивность, емкость и начальное напряжение, до которого заряжены конденсаторы; $i(t)$, $u(t)$ – ток и напряжение в разрядном контуре; $y(t)$, $i_1(t)$ – импульсная и переходная проводимость системы индуктор-токопровод — пластина.

В случае одновиткового индуктора-токопровода используем уравнение (3), а в случае многовиткового индуктора-токопровода — уравнение (4). Уравнение (2) составлено по второму закону Кирхгофа для разрядной цепи. Уравнения (3), (4) связывают импульсную или переходную проводимость, ток в разрядном контуре и напряжение на индукторе. По полученным в результате решения системы уравнений значениям тока и напряжения с помощью интеграла Дюамеля [5] рассчитываем все дифференциальные и интегральные величины, характеризующие процесс при разряде емкостного накопителя, а именно распределение напряжения по виткам индуктора-токопровода и распределение напряженности электрического поля в толще проводников. Напряженность электрического поля $E_C(P,t)$ в проводниках при разряде емкостного накопителя рассчитываем по формуле

$$E_C(P, t) = u(t)E_1(P, 0) + \int_0^t u(\tau)E_1'(P, t - \tau)d\tau \quad (5)$$

По известным значениям напряженности электрического поля рассчитываем составляющие вектора магнитной индукции [7]

$$B_x(P, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_S \gamma(M)E(M, t) \left[\frac{y_P - y_M}{(x_P + x_M)^2 + (y_P - y_M)^2} - \frac{y_P - y_M}{(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2} \right] dS_M; \quad (6)$$

$$B_y(P, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_S \gamma(M)E(M, t) \left[\frac{x_P - x_M}{(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2} - \frac{x_P - x_M}{(x_P + x_M)^2 + (y_P - y_M)^2} \right] dS_M, \quad (7)$$

где $\gamma(M)$ — удельная электропроводность металла индуктора-токопровода и пластины в точке M ; x_P, y_P — координаты точки наблюдения P ; x_M, y_M — координаты расчетной точки M .

Вектор плотности электродинамических усилий согласно [7] будет

$$\vec{f} = \gamma[\vec{E}, \vec{B}]. \quad (8)$$

Полную силу \vec{F} , действующую на пластину, определяем интегрированием \vec{f} по объему пластины

$$\vec{F} = \int_V \vec{f}dV = 2l \int_{-d_2}^0 \int_0^{b_2} [(-\gamma E_z B_y) \vec{i}_x + (\gamma E_z B_x) \vec{i}_y] dx dy \quad (9)$$

где l — длина системы индуктор-токопровод—пластина; d_2, b_2 — размеры поперечного сечения пластины (рис.1).

Для рассматриваемых технологических приложений наибольший интерес представляет y — составляющая вектора \vec{f}

$$f_y(P, t) = \gamma(P)E_C(P, t)B_x(P, t) \quad (10)$$

и интегральная сила, действующая на пластину в направлении оси y

$$F_y(t) = 2l \int_{-d_2}^0 \int_0^{b_2} \gamma(P) E_C(P, t) B_x(P, t) dx_P dy_P \quad (11)$$

Для расчета силы $dF_y(x, t)$, действующей на единицу площади поверхности пластины используем формулу

$$dF_y(x, t) = \int_0^{d_2} \gamma(P) E_C(P, t) B_x(P, t) dy \quad (12)$$

Влияние геометрии индуктора-токопровода на распределение электродинамических усилий на поверхности пластины

В случае одновиткового индуктора-токопровода максимум электродинамических усилий значительно возрастает при увеличении ширины внутреннего витка h , что объясняется ослаблением эффекта близости между шинами витка и усилением этого же эффекта между индуктором-токопроводом и пластиной. На рис.3 показаны кривые распределения максимальных электродинамических усилий по поверхности пластины для одновиткового индуктора с таким соотношением размеров: $b_1/d_1 = 2,0$; $h_1/d_1 = 0,1$; $b_2/d_1 = 10,0$; $d_2/d_1 = 0,5$. Кривая 1 соответствует значению $h/d_1 = 0,1$; 2 — 0,5; 3 — 1,0; 4 — 2,0; 5 — 5,0.

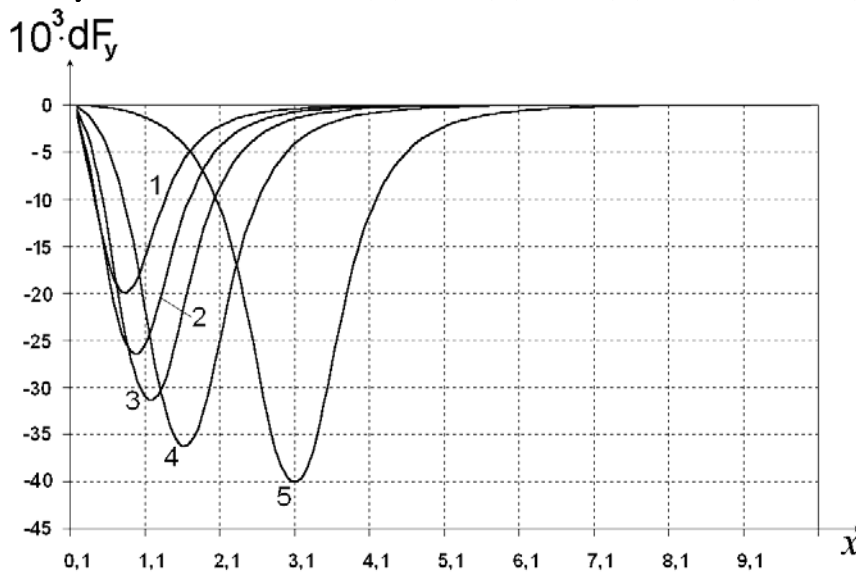


Рис.3. Кривые распределения максимальных электродинамических усилий.

В случае многовиткового индуктора-токопровода исследовано влияние межвиткового зазора h_w и ширины внутреннего витка h индуктора-токопровода на распределение усилий, действующих на пластину. На рис. 4 показано распределение электродинамических усилий на верхней границе ($x = 0$) пластины, расположенной под пятивитковым индуктором-токопроводом при $h_w/d_1 = 0,1$. Кривая 1 соответствует значению $h/d_1 = 0,1$; 2 — 1,0; 3 — 2,0; 4 — 5,0. Введем такое понятие: рабочая зона индуктора-токопровода. Это область на поверхности пластины с электродинамическими усилиями не ниже $0,5 dF_{y\max}$ ($dF_{y\max}$ — максимальное значение величины dF_y). Ширина рабочей зоны индуктора-токопровода – это

ее размер вдоль оси Ox на уровне $0,5 dF_{y_{\max}}$. При $h/d_1 \leq 0,5$ максимум электродинамических усилий выше и уменьшается с увеличением h/d_1 , а ширина рабочей зоны индуктора-токопровода, напротив, увеличивается пропорционально h/d_1 .

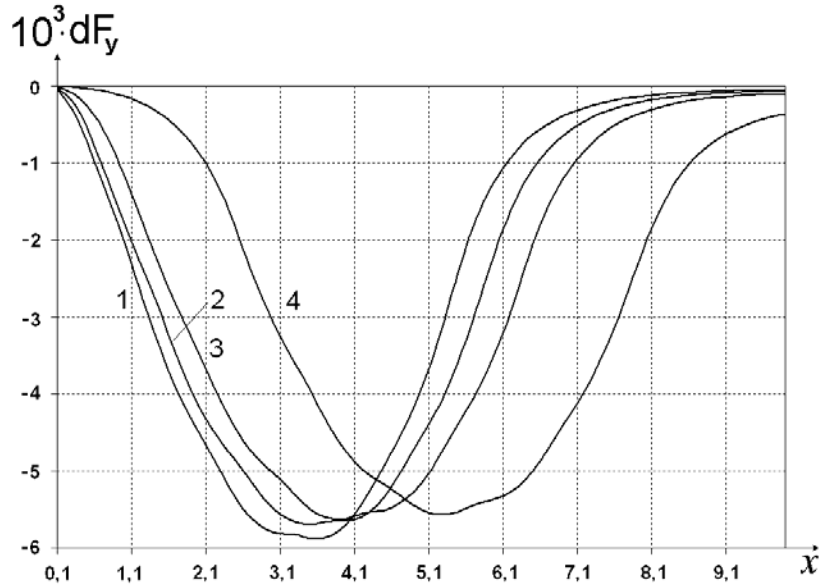


Рис.4. Распределение электродинамических усилий на верхней границе пластины.

На кривых, приведенных на рис.5, показано влияние междувиткового зазора h_w/d_1 пятивиткового индуктора-токопровода с теми же геометрическими размерами. Размеры пластины: $b_2/d_1 = 35,0$; $d_2/d_1 = 0,5$. Кривые с нечетными номерами рассчитаны для ширины внутреннего витка $h/d_1 = 0,1$, а с четными — для $h/d_1 = 5,0$. Кривые 1,2 соответствуют значению $h_w/d_1 = 0,2$; 3,4 — $0,5$; 5,6 — $5,0$. Кривые 3 - 6 показывают, что в системе с многовитковым индуктором-токопроводом при $h_w/d = 0,5$ и более на поверхности пластины, вдоль ее ширины, наблюдаются пространственные “осцилляции” электродинамических усилий с максимумами под витками и минимумами в области междувитковых зазоров. Эти осцилляции сглаживаются при уменьшении междувитковых зазоров (кривые 1,2).

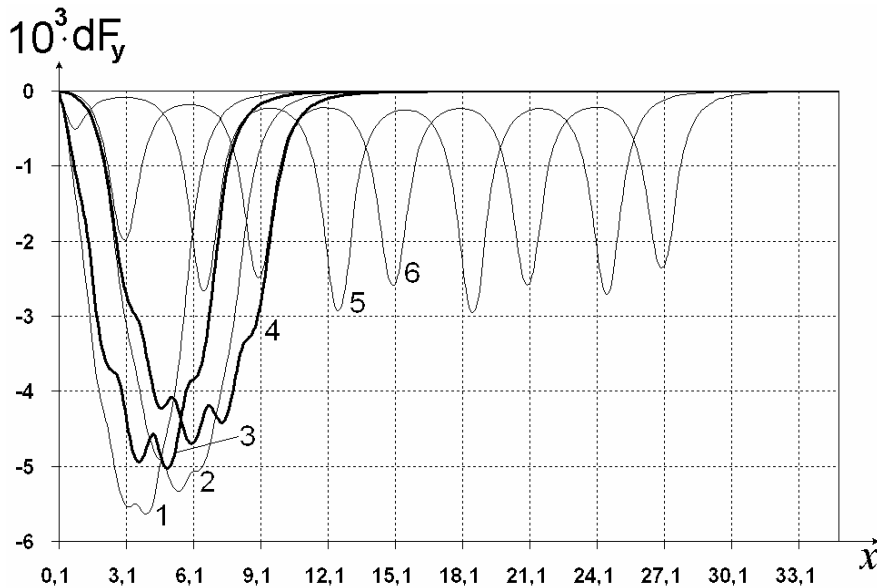


Рис.5. Влияние междувиткового зазора.

Область максимума поверхностной плотности силы под витком будем называть «следом» витка. Как видно из кривых 1, 3, 5 на рис.5, при значении $h/d_1 = 0,1$ «след» внутреннего витка практически отсутствует и основная сила, действующая на пластину, создается практически только оставшимися внешними витками. При увеличении ширины внутреннего витка до значения $h/d_1 = 5,0$ его «след» становится более заметным.

В целом поведение поверхностной плотности силы на пластине под первым витком многовиткового индуктора-токопровода и под одновитковым индуктором-токопроводом совпадает. Показанные на рис.4, 5 зависимости качественно совпадают с известными экспериментальными данными для системы плоский спиральный индуктор — пластина [2]. Однако максимумы индукции и электродинамических усилий в системе с плоским индуктором находятся под первым (внутренним) витком и убывают в сторону периферийных витков. Для индуктора-токопровода эти распределения имеют более сложный характер.

Выводы

1. При ширине внутреннего витка $h/d_1 = 1,0..5,0$ максимум поверхностной плотности силы под ним увеличивается, увеличивая тем самым ширину рабочей зоны индуктора-токопровода.

2. В многовитковых индукторах-токопроводах при междувитковом зазоре $h_w/d_1 = 0,1..0,2$ пространственные «осцилляции» электродинамических усилий на поверхности пластины практически отсутствуют. 3. Для достижения максимальных усилий при использовании многовиткового индуктора-токопровода следует выбирать $h/d_1 = h_w/d_1 = 0,1..0,2$, а при использовании одновиткового индуктора-токопровода - $h/d_1 = 5,0$.

1. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков, 1977. 2. Брон О.Б., Сегаль А.М. Многовитковые индукторы для магнитно-импульсной обработки металлов // Механические взаимодействия в сильных магнитных полях: Межвузовский сб. 1974. С.37. 3. Михайлов В.М. Интегральные электромагнитные характеристики соленоидов для получения сильных импульсных магнитных полей // Электричество. 1993. № 7. С.38–47. 4. Михайлов В.М., Панасенко О.Т. Распределение импульсных токов и интегральные характеристики системы индуктор-токопровод—пластина // Техническая электродинамика. 1999. № 4. С.4–9. 5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М., 1977. 6. Сегаль А.М. Взаимодействие индуктора с проводящим диском // Механические взаимодействия в сильных магнитных полях: Межвузовский сб. 1974. С.44. 7. Тозони О.В. Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах. К., 1967.