ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ ЭКИПАЖНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА МАГНИТОЛЕВИТАЦИННОЙ ТРАНСПРОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Г. Е. Середа, В. М. Стрепетов
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

DEFINITION OF INDUCTANCE VEHICLE ELECTROMAGNET MAGNITOLEVITATION TRANSPRORT SYSTEM

G. E. Sereda, V. M. Strepetov
Emperor Alexander I St.
Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

Аналитическое исследование установившихся и переходных режимов работы различных магнитолевитационных транспортных системах, в том числе и относительно мало исследованной в комбинированной системе левитации и тяги на переменном токе предполагает знание параметров этих систем и в частности индуктивности экипажных электромагнитов. При этом точность определения коэффициента самоиндукции во многом определяет достоверность результатов, получаемых при исследовании электромеханических систем, в особенности, если эти исследования носят поисковый характер.

Расчёт коэффициента самоиндукции различных проводящих систем, как правило, представляет собой технически сложную процедуру, связанную с громоздкими вычислениями даже для самых простых форм электромагнитов.Большое количество справочников по вычислению указанных величин (см., например, библиографию в [1-2]) содержат, в основном, наборы приближённых формул, точность которых и зоны их применимости далеко не всегда указываются.

Настоящая статья посвящена определению величины коэффициента самоиндукции L_T для проводников определённой конфигурации, у которых величина «высоты» электромагнита пренебрежимо мала по сравнению с другими геометрическими размерами катушки. Такие электромагниты будем называть «бесконечно» тонкими (плоскими) источниками магнитного поля.

Общая формула для определения индуктивности плоского источника магнитного поля L_T задаётся следующим соотношением [2]:

$$L_T = \frac{\mu_0 W^2}{4\pi I^2} \int\limits_S d\boldsymbol{\rho} \int\limits_{S'} d\boldsymbol{\rho}' \left(\boldsymbol{i}, \boldsymbol{i}'\right) / \left|\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}'\right|$$

где $d\boldsymbol{\rho} = dx\,dy$, $d\boldsymbol{\rho}' = dx'\,dy'$, $\left|\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}'\right|^2 = \left(x - x'\right)^2 + \left(y - y'\right)^2$

(x, y) и (x', y') – подходящие декартовы координаты, $\boldsymbol{i}$ и $\boldsymbol{i}'$ – линейные плотности тока, $S \equiv S'$– токонесущая поверхность катушки, W– число витков, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Дальнейшие рассмотрения будут проводиться для одновитковой катушки ($W = 1$). В качестве плоского источника магнитного поля рассмотрим электромагнит прямоугольной формы, схематичное изображение которого представлено на рис.1.

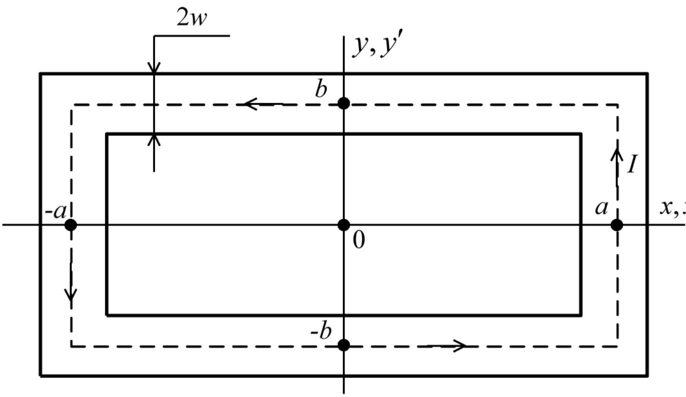

Рис.1. Схематическое изображение плоского источника магнитного поля прямоугольной формы

Смысл обозначений, указанных на рис. 1 понятен из его содержания. Отметим, что на геометрические параметры данного плоского электромагнита накладывается естественное ограничение: $0 < w \le \min(a, b)$.

Для рассматриваемой конфигурации источника магнитного поля модуль линейной плотности тока определяется равенством $i = i' = I/2w$. Переходя в (1) к безразмерным координатам и совершая там же первичное двукратное интегрирование, можно получить следующее выражение для коэффициента самоиндукции плоской катушки прямоугольной формы L_{T}:

Переходя в (1) к безразмерным координатам и совершая там же первичное двукратное интегрирование, можно получить следующее окончательное выражение для коэффициента самоиндукции плоской катушки прямоугольной формы L_{T}:

$$\frac{L(\nu)}{\nu} = \ln\frac{1+r}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon}\ln(\varepsilon + r) - \frac{(2+r)^2 - 2}{3(1+r)} - \frac{1}{3\sqrt{2}\,\varepsilon^2}\sum_{k=\pm 1}(1+k\varepsilon)^3 \ln\frac{1+\sqrt{2}\,r - k\varepsilon}{(1+\sqrt{2})(1+k\varepsilon)},$$

где $r^2 = 1 + \varepsilon^2$, $\varepsilon = \delta/\nu$, $(0 < \varepsilon \le 1)$

В качестве нормирующего множителя при переходе к безразмерным координатам в (2) выбрана величина $2p$ – полупериметр катушки по средней линии.

Расчёт величины L_T целесообразно проводить в безразмерном виде. В качестве базовой выберем величину индуктивности плоской катушки L_0, представляющей собой квадрат с «проколотым» центром. После соответствующих вычислений при $\alpha = \beta = \delta$ можно получить приближенную формулу

$$L_0 = \frac{\mu_0 P}{\pi}\cdot\frac{2}{3}\cdot\frac{1 + \ln\left(1+\sqrt{2}\right)}{1+\sqrt{2}} \approx 2.078\cdot 10^{-7} P,$$

$P = 4p$ – периметр квадратной катушки по средней линии.

Результаты численного анализа, показывающего зависимость относительной индуктивности L_T/L_0 от параметра e при различных значениях «вытянутости» катушки ς, представлены на рис.2.

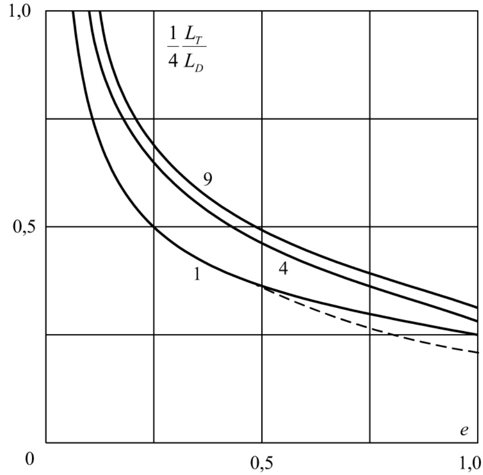

Рис.2. Зависимость относительного коэффициента самоиндукции плоской катушки прямоугольной формы L_T/L_0

(числа у кривых соответствуют значениям «вытянутости» катушки). Параметры e и ς соответственно равны: $e = w/\min(a,b)$, $\varsigma = \max(a,b)/\min(a,b)$. Пунктирная линия отвечает приближённой формуле $L\big|_{\delta<<\min(\alpha,\beta)}\big/L_0$ при $\varsigma = 1$. В расчётах периметр катушки по средней линии $P = 4p$ принимается постоянным, L_0 определено в (14).

Краткие выводы:

1. Получено точное аналитическое выражение для величины коэффициента самоиндукции «тонкого» источника магнитного поля прямоугольной формы в виде алгебраической суммы элементарных функций.

2. Выведена приближённая формула для вычисления коэффициента самоиндукции, погрешность которой не

превышает 14% в области изменений всех геометрических параметров электромагнита.

Библиографический список

1. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей.– Л.: Энергоиздат, 1986.– 488 с.

2.*Матвеев А.Н.* Электродинамика – М.: Высш. школа, 1980.– 383 с.

3. *Немцов М.В., Шамаев Ю.М.* Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. Москва, издательство Энергоиздат, 1981.– 136 с.

Сведения об авторах:
Середа Геннадий Евгеньевич
E-mail: gennady.sereda@mail.ru
Стрепетов Владимир Михайлович
E-mail: strepetov.vm@mail.ru

Information about authors:
Gennady E. Sereda
E-mail: gennady.sereda@mail.ru
Vladimir M. Strepetov
E-mail: strepetov.vm@mail.ru