

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. В. ВЛАСОВ

**О ПРИМЕНЕНИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ К УНИПОЛЯРНО-ИНДУКЦИОННОЙ ЗАДАЧЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ**

*(Представлено академиком И. П. Бардиным 19 VIII 1949)*

В некоторых устройствах для дефектоскопии контролируемое тело движется по отношению к источнику постоянного магнитного поля. При этом в металлическом теле, которое контролируется, индуцируются постоянные по направлению электрические токи — по два под каждым полюсом магнита. Эти токи мы в дальнейшем будем называть униполярно-индукционными, так как в данном случае, по замечанию Р. И. Янус<sup>(1)</sup>, механизму получения тока присущи все характерные особенности униполярной динамомашин.

В установке для контроля тел вращения, разработанной П. А. Халилеевым и В. В. Власовым<sup>(2)</sup>, униполярно-индукционные токи используются для выявления нарушений сплошности.

Следует заметить, что униполярно-индукционные токи являются, вообще говоря, более эффективным средством выявления нарушений сплошности по сравнению с выявлением посредством магнитного потока. Преимущество тока перед магнитным потоком в данном случае следует из того, что при встрече с дефектом электрический ток претерпевает практически полное перераспределение, обтекая нарушение сплошности, тогда как магнитный поток испытывает лишь незначительное возмущение, проходя в большей своей части сквозь дефект, в особенности если он сильно сплюснут.

Интенсивность униполярно-индукционных токов при прочих равных условиях будет, очевидно, тем больше, чем больше внешняя магнитодвижущая сила и чем выше скорость движения. При использовании униполярно-индукционных токов для целей дефектоскопии необходимо, конечно, считаться с наличием скин-эффекта, который очевидно, зависит от скорости движения.

Униполярно-индукционные токи в ферромагнитном теле при небольшой скорости движения и слабом намагничивании изучались К. М. Поливановым<sup>(3)</sup>, а при большой скорости движения — примерно 50 км/час — и при сравнительно большой внешней магнитодвижущей силе качественно изучались П. А. Халилеевым и В. В. Власовым<sup>(2)</sup>. Более детальные исследования униполярно-индукционных токов при высоких скоростях движения, насколько нам известно, не производились.

Математически задача о плотности униполярно-индукционного тока даже в простейшем случае сводится, как не трудно показать, к весьма сложному интегро-дифференциальному уравнению, решение

которого в общем виде невозможно. Методы приближенного вычисления плотности униполярно-индукционного тока даже для простейших геометрических тел еще не разработаны. Поэтому целесообразно использовать для приближенного количественного определения униполярно-индукционных токов, наводимых в том или ином контролируемом изделии, способ моделирования. Цель настоящей работы — выяснить принципиальные и экспериментальные возможности изучения униполярно-индукционных токов в ферромагнитных телах способом модельных опытов.

Основу моделирования, как известно, составляет теория подобия <sup>(4)</sup>, часто применяемая в форме анализа размерностей <sup>(5)</sup>. Условия подобия явлений магнитостатики сформулированы Кельвином <sup>(6)</sup> в виде так называемых теорем подобия. Критерий подобия для случаев периодических электромагнитных явлений выведены Брайном и Ньюфелдом <sup>(7)</sup>. Критерий подобия для униполярно-индукционных токов, поскольку нам известно, никем еще не приводился. Поэтому мы прежде всего ставим задачу — получить критерий подобия для униполярно-индукционных токов. Для вывода критерия подобия воспользуемся способом анализа размерностей <sup>(5)</sup>.

Плотность униполярно-индукционного тока, наводимого в ферромагнитном теле, зависит, в самом общем случае, от величины внутреннего поля  $H$ , представляющего собою геометрическую сумму полей внешнего, размагничивающего и поля униполярно-индукционных токов, от скорости  $v$  движения, например источника магнитного поля относительно контролируемого тела, от магнитной проницаемости  $\mu$  и электропроводности  $\sigma$  тела и, наконец, от геометрического размера  $l$  электромагнитной системы.

Если учесть размерность перечисленных переменных, например в системе CGSE, то, очевидно, можно написать такие произведения нулевой размерности:

$$j \cdot l H^{-1}; \quad j (H \mu \sigma v)^{-1}; \quad \mu \sigma v l.$$

Для плотности тока, следовательно, можно написать два таких внешне различных выражения:

$$j = \text{const} \frac{H}{l} \varphi_1(\mu \sigma v l), \quad (1)$$

$$j = \text{const} \mu \sigma v H \varphi_2 / \mu \sigma v l, \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  некоторые функции.

Предположим, что

$$\mu \sigma v l = \text{const}. \quad (3)$$

Тогда, если учесть, что в сходственных частях подобных систем магнитные поля одинаковы <sup>(6)</sup>, выражения (1) и (2) могут быть записаны таким образом:

$$j = c_1 \frac{1}{l}, \quad (4)$$

$$j = c_2 \mu \sigma v, \quad (5)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — постоянные.

Из выражения (4) следует, что плотности токов в подобных системах обратно пропорциональны линейным размерам систем, т. е. мы получили одну из теорем подобия магнитостатики <sup>(6)</sup>. Из выражения (5) следует, что плотности токов в подобных системах пропорциональны произведению из проницаемости, электропроводности и скорости. Выражения (4) и (5) с учетом (3), как нетрудно видеть, эквивалентны друг другу, что вполне естественно, так как для шести

переменных при трех независимых должно быть только два независимых произведения нулевой размерности. Очевидно, можно равноправно пользоваться как выражением (4), так и выражением (5), но при обязательном соблюдении условия (3). Выражение (3) представляет собою, как нетрудно видеть, критерий подобия для униполярно-индукционных токов.

Трудность моделирования электромагнитных явлений в ферромагнитных средах заключается в том, что характеризующая среду магнитная проницаемость имеет нелинейную зависимость от поля. Поэтому при моделировании униполярно-индукционных токов необходимо иметь тождественно одинаковые или, по крайней мере, весьма близкие в магнитном отношении материалы модели и натурального изделия. Если это условие выполнено, то, как это следует из критерия подобия (3), скорости движения в подобных системах должны быть обратно пропорциональны линейным размерам этих систем.

Изучение униполярно индукционных токов при больших скоростях движения, повидимому, наиболее удобно осуществить при наличии кольцевой модели тела, вращающейся под полюсами электромагнита. Так как движение относительно, то результаты, полученные при такой постановке опыта, одинаково справедливы как для случая движения тела относительно магнита, так и для случая движения магнита относительно тела.

Существенным недостатком кольцевой модели является то обстоятельство, что под магнит будут поступать участки модели, имеющие уже предварительную (остаточную) намагниченность. Вследствие этого в данном случае наблюдается ступенчатое намагничивание, подмеченное П. А. Халилеевым и В. В. Власовым<sup>(2)</sup>. Ступенчатое намагничивание можно, очевидно, избежать применением второго магнита, создающего в модели остаточную намагниченность, противоположную намагниченности от первого магнита.

Для качественной оценки интенсивности униполярно-индукционных токов можно воспользоваться измерением магнитного поля близ модели при отсутствии и при наличии движения. Для количественной оценки плотности тока можно воспользоваться, например, измерением разности потенциалов. Очевидно, при этом наиболее просто может быть определена плотность тока по поверхности модели с помощью скользящих контактов.

При этом следует учесть, что на все заряды, находящиеся внутри вращающейся модели, действует сила Лорентца. Следовательно, в общем случае разность потенциалов между двумя произвольно выбранными точками будет определяться таким выражением:

$$U = \rho \int_a^b (\mathbf{j} \cdot d\mathbf{l}) - \frac{1}{c} \int_a^b ([\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}] dl), \quad (6)$$

где  $U$  — разность потенциалов,  $\mathbf{j}$  — плотность тока,  $\rho$  — удельное сопротивление модели изделия,  $\mathbf{v}$  — скорость движения, например модели относительно источника магнитного поля,  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции,  $d\mathbf{l}$  — вектор элемента длины,  $C$  — электродинамическая постоянная.

Второй член в выражении (6), определяемый силой Лорентца, по порядку величины не меньше первого и, следовательно, им нельзя пренебречь. Таким образом, в общем случае, для определения плотности тока необходимо, помимо измерения разности потенциалов, определить еще величину и направление вектора индукции относительно скорости. В том случае, когда измерение разности потенциалов производится вдоль направления скорости, т. е. когда элемент  $d\mathbf{l}$

параллелен скорости  $v$ , второй член в выражении (6), как нетрудно видеть, обращается в нуль, независимо от направления индукции относительно скорости. Таким образом, продольная относительно скорости, составляющая плотности индукционного тока может быть довольно просто определена из выражения:

$$U = \rho \int_a^b j_{||} dl.$$

Экспериментальное изучение униполярно-индукционных токов производилось следующим образом. Стальное кольцо прямоугольного сечения, диаметром 1 м, вращалось под полюсами двух П-образных электромагнитов, расположенных с внешней стороны кольца противоположно по диаметру. Расстояние между центрами полюсов магнита составляло 1/10 от диаметра кольца. Электромагниты устанавливались в положение для продольного намагничивания участков кольца во взаимно противоположных направлениях. Измерение разности потенциалов производилось с помощью милливольтметра и скользящих щеток, сделанных из бронзового канатика диаметром около 1 мм, при расстоянии между центром щеток 10 мм.

Как показали эксперименты, продольная относительно скорости составляющая плотности тока возрастает как с ростом скорости при данном значении внешнего намагничивания, так и при возрастании интенсивности внешнего намагничивания при данной скорости, достигая при соответствующих условиях значительной величины. Так например, при 7000 ампервитков и 400 об/мин. продольная относительно скорости составляющая плотности тока на поверхности достигает 1000 а/см<sup>2</sup>.

Приближенная оценка глубины проникновения тока производилась по формуле Н. М. Шилова<sup>(8)</sup>, для чего в районе токообразования — у поверхности тела, близ полюса — измерялось магнитное поле и по нему, с помощью кривой намагничивания, находилось соответствующее среднее значение дифференциальной проницаемости.

В заключение считаю своим долгом выразить благодарность проф. Р. И. Янус за просмотр рукописи и некоторые указания.

Институт физики металлов  
Уральского филиала Академии наук СССР

Поступило  
19 VIII 1949

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Р. И. Янус, Тр. Ин-та физики металлов УФАН, 7, 5 (1949). <sup>2</sup> П. А. Халилеев и В. В. Власов, Зав. лабор., 7—8, 695 (1945); Тр. Ин-та физики металлов УФАН, 7, 81 (1948). <sup>3</sup> К. М. Поливанов, Проблемы ферромагнетизма и магнетодинамики, изд. АН СССР, 1946, стр. 147. <sup>4</sup> М. В. Кирпичев, Изв. АН СССР, ОТН, № 4—5, 333 (1935); А. А. Гухман, Физические основы теплопередачи, Л.—М., 1934, стр. 40—80. <sup>5</sup> П. Б. Бриджмен, Анализ размерностей, Л.—М., 1934, стр. 60—92. <sup>6</sup> В. К. Аркадьев, Электромагнитные процессы в металлах, ч. 1, Л.—М., 1935, стр. 38—140. <sup>7</sup> J. C. Brainerd and J. Neufeld, El. Eng., 54, 268 (1935). <sup>8</sup> Н. М. Шиллов, ЖТФ, 9, 7, 633 (1939).