

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

И. М. КИРКО

**КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ ЯВЛЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА
В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛАХ**

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 19 X 1953)

П. М. Белаш⁽¹⁾ и В. А. Веников⁽²⁻⁴⁾ рассматривали подобие электромагнитных процессов. Методом анализа размерности уравнений Максвелла вводятся следующие определяющие критерии⁽⁵⁾ подобия из электромагнитных величин для тел, помещенных в пустоте:

$$\Pi_1 = \frac{j\sqrt{2\mu}l}{i}; \quad \Pi_2 = \frac{V\bar{\lambda}\mu l}{V'i}; \quad \epsilon; \quad \mu.$$

Для подобия явлений поверхностного эффекта в проводящих телах могут иметь значение только второй и четвертый из этих критериев, причем Π_2 пропорционален отношению характеристического размера l к эквивалентной глубине проникновения электромагнитного процесса в металл, а магнитной проницаемостью μ можно пренебречь в линейной области намагничивания. Действительно, как показали опыты В. Г. Витол и автора⁽⁶⁾ по измерению эффективной магнитной проницаемости $\bar{\mu}'$ конечных ферромагнитных цилиндров, имеющих одинаковую относительную длину $\bar{\lambda}$, но разную магнитную проницаемость, в определенной области значений существует однозначная зависимость:

$$\frac{\bar{\mu}'}{\mu_0} = f(\bar{\lambda}, x), \quad 2 < \bar{\lambda} < 25, \quad 5 < x < 30, \quad (1)$$

где $\bar{\mu}'_0$ — эффективная магнитная проницаемость тороида⁽⁷⁾ из того же материала и того же диаметра, что и конечные цилиндры, а $x = r/2z_1$ — параметр Ценнека, частный случай критерия Π_2 .

Таким образом, приближенное подобие явлений поверхностного эффекта позволяет отказаться от равенства магнитных проницаемостей тел, как необходимого условия подобия, в следующих случаях:

1) при направлении внешнего поля параллельном к поверхности тела (отсутствие или малость участка поверхности, где наблюдается преломление магнитных силовых линий);

2) при больших значениях магнитной проницаемости тела по сравнению с магнитной проницаемостью окружающей среды или вообще при явлениях сильного поверхностного эффекта, когда можно считать магнитные силовые линии идущими параллельно поверхности намагничиваемого тела.

В нелинейной области намагничивания, в сущности, надо учитывать значение μ как фактор нелинейности процесса. Используя теорию

поверхностного эффекта Неймана (8), следует ввести определяющий критерий:

$$\frac{H}{H_k} = \text{idem}, \quad (2)$$

где H_k — напряженность магнитного поля при максимальной проницаемости ферромагнитного вещества. Так как в электрических цепях со сталью очень часто пользуются приборами, измеряющими эффективные значения величин тока и напряжения, то важно строить кри-

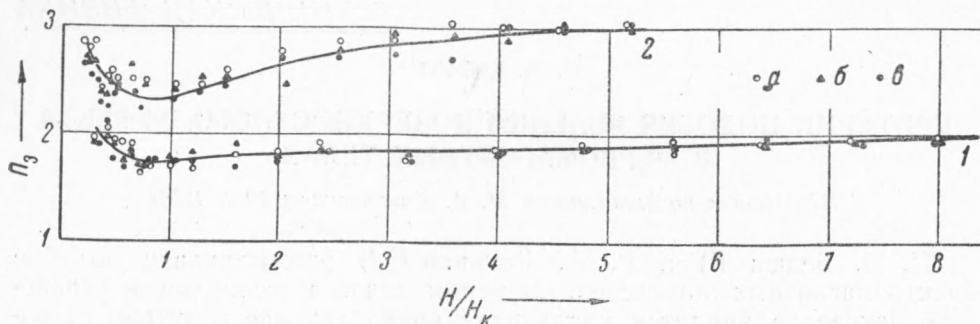


Рис. 1. Зависимость критерия Π_3 от критерия H/H_k при намагничивании тороидов из железа армко (1) и стали 3 (2) в переменных полях (сильный поверхностный эффект). a — частота 50 гц, b — 100 гц, v — 200 гц

терии подобия из эффективных величин. Из уравнений Максвелла получается неопределяющий критерий

$$\Pi_3 = \frac{E}{H} \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}} = \text{idem}, \quad (3)$$

строгое осуществление которого является очень редким случаем подобия поверхностного эффекта в ферромагнитных телах (подобие гармонического состава F и H).

Применяя принципы интегрального подобия, рассматриваемого В. М. Брейтманом (9), мгновенные значения E и H можно заменить эффективными

$$\Pi_3 = \frac{E_{\text{эф}}}{H_{\text{эф}}} \sqrt{\frac{\lambda}{\mu f}}, \quad (4)$$

причем с точностью до несущественного постоянного множителя при поверхностном эффекте в ферромагнитной цилиндрической проволоке

$$\Pi_3 = \frac{Z}{xR_0}, \quad (5)$$

где Z и R_0 — сопротивление провода переменному и постоянному току.

При намагничивании ферромагнитного тороида или бесконечно длинного цилиндра в однородном поле

$$\Pi_3 = j \frac{\bar{\mu}'}{\mu} x, \quad (6)$$

где $j = \sqrt{-1}$.

При пропускании переменного тока по пучку проводов, заложенных в цилиндрическом канале в массивном ферромагнитном теле,

$$\Pi_3 = \frac{Z - R_0}{k} \sqrt{\frac{\lambda}{\omega \mu_e}}, \quad (7)$$

где Z — импеданс пучка; R_0 — его сопротивление постоянному току; $k = N^2 l / r$; N — число витков; l — длина канала; r — его радиус; μ_e — магнитная проницаемость в постоянном поле, полученная из статической кривой намагничивания, если на ней обозначения напряженности магнитного поля считать равными эффективной напряженности.

На рис. 1 и 2 показана зависимость критерия Π_3 от определяющего критерия H/H_k для случая ферромагнитного цилиндра с продольным магнитным полем и для случая пучка проводов в ферромагнитном канале. Эти зависимости получены на основании измерений, проведенных Тютиним, Витол и автором.

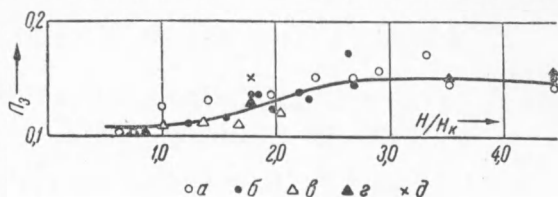


Рис. 2. Зависимость критерия Π_3 от критерия H/H_k при прохождении переменного тока по цилиндрическому каналу в ферромагнитном массивном теле (газовая труба в виде кольца, сильный поверхностный эффект). a — частота 500 гц, $б$ — 1000 гц, $в$ — 1500 гц, $г$ — 2000 гц, $д$ — 4000 гц

Таким образом, методами теории подобия можно расширить возможности инженерных расчетов поверхностного эффекта на все значения H (теория Неймана дает возможность вести эти расчеты лишь при $H \gg H_k$ и $H \ll H_k$).

Обработка измерений поверхностного эффекта при различных f и H и сравнительно большой разброс точек в области малых H/H_k заставляют сделать вывод, что дисперсия магнитной проницаемости ферромагнитного вещества, существующая в области слабых полей и звуковых частот, значительно уменьшается в области сильных полей. Причина этого лежит, повидимому, в различных механизмах намагничивания ферромагнитных тел в сильных и слабых полях.

Институт физики
Академии наук Латвийской ССР

Поступило
18 X 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ П. М. Белаш, *Электричество*, № 9, 46 (1939).
- ² В. А. Веников, *Применение подобия в электротехнике*, 1949.
- ³ В. А. Веников, *Изв. АН Арм.ССР*, № 2, 6 (1949).
- ⁴ В. А. Веников, *Докторская диссертация*, МЭИ, 1953.
- ⁵ М. В. Кирпичев, П. К. Конаков, *Математические основы теории подобия*, 1949.
- ⁶ В. Г. Витол, И. М. Кирко, *Изв. АН Латв.ССР*, № 4 (1953).
- ⁷ В. К. Аркадьев, *Электромагнитные процессы в металлах*, ч. II, 1936.
- ⁸ Л. Р. Нейман, *Поверхностный эффект в ферромагнитных телах*, 1949.
- ⁹ В. М. Брейтман, *ЖТФ*, № 22, 4 (1952).