

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
И ПОЛУПРОВОДНИКОВ НАН БЕЛАРУСИ



***МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ***

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ  
II Международной научной конференции  
2–4 октября 2002 г., Минск**

Минск  
Издательский центр БГУ  
2002

# ПЕРЕМЕННОЕ АЗИМУТАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ

Соболь В.Р.<sup>1,2</sup>, Мазуренко О.Н.<sup>1</sup>, Устинович Д.Ф.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики твердого тела и полупроводников НАНБ  
ул. П.Бровки, 17, 220072 Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет  
ул. Свердлова, 13а, 220050, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Физико-технический институт НАНБ  
ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Беларусь

Возникновение вихревых токов в образцах из проводящих магнитных материалов представляет собой одну из причин, обуславливающих сдвиг фазы между намагниченностью и внешним полем, уменьшение амплитуды поля в глубине металла из-за экранирующего воздействия, а также дополнительную диссипацию энергии при перемагничивании. В работе оценена мощность диссипативных сил, сопровождающих генерацию вихревых токов для образца в форме сплошного цилиндра, который находится в переменном магнитном поле. Такая ситуация имеет место при протекании переменного тока по образцу, при позиционировании элементов вдоль силовых кабелей, а также, с определенными оговорками, при вращательном движении детали во внешнем постоянном магнитном поле, перпендикулярном оси цилиндра.

Рассмотрение основано на макроскопических уравнениях поля в приближении нормального скинирования. Образец рассматривается как бесконечный цилиндр, находящийся в изменяющемся во времени по гармоническому закону азимутальном магнитном поле. В этих условиях решение следует из волнового уравнения, которое фактически является уравнением Бесселя нулевого порядка для аксиальной компоненты вектора электрического поля:  $\nabla^2 E + k^2 E = 0$ , здесь  $E$  – аксиальная компонента напряженности электрического поля,  $k$  – волновой вектор. В цилиндрических координатах с учетом требования симметрии решение такого уравнения имеет вид  $E = AJ_0(kr)$ , где  $J_0(kr)$  – цилиндрическая функция нулевого порядка первого рода,  $r$  – координата,  $A$  – константа. Для нахождения  $A$  используется условие связи между компонентами на поверхности

внешнего магнитного поля  $H^s$  и электрического поля  $E^s$  вида  $kE^s = \mu_0 \mu \omega H^s$ , где  $\omega$  – циклическая частота,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu$  – магнитная проницаемость материала. Количество диссипируемой в объеме образца джоулевой энергии за единицу времени  $W'$  можно определить методом суммирования потерь  $W' = \int \sigma E^2 dV$ , ( $V$  – объем детали,  $\sigma$  – проводимость материала). В результате мощность сил электромагнитного рассеяния на единицу длины образца как уровень потерь энергии от вихревых токов за один период можно представить в виде выражения  $W = (\mu B^2 \pi R^2 / i \mu_0) [1 + I_1^2(kR) / I_0^2(kR)]$ . Здесь  $B$  – амплитуда магнитного поля,  $R$  – внешний радиус цилиндра,  $I_0$  и  $I_1$  – функции Бесселя нулевого и первого порядка. Множитель перед квадратной скобкой характеризует величину магнитной энергии в объеме в статическом поле с индукцией  $B$ . Комплексный характер выражения свидетельствует, что для определения джоулевых потерь следует разграничить вещественную и мнимую части полученного выражения, которые возникают из произведения комплексной магнитной проницаемости и отношения квадратов функций Бесселя комплексных аргументов.

Анализ показывает, что в зависимости от величины  $kR$  эффективность рассеяния изменяется. Для конкретного материала рассеяние будет определяться магнитной проницаемостью материала, удельным сопротивлением и частотой поля. Для двух предельных случаев  $kR \ll 1$  и  $kR \gg 1$  рассеяние энергии стремится к нулю. При промежуточном значении  $kR$  величина потерь определяется объемом из-за большой величины скин-слоя. Малая эффективность рассеяния при  $kR \gg 1$  означает, что для материала, обладающего бесконечно большой проводимостью, внешнее электромагнитное поле экранируется и не может проникнуть в объем, вихревые токи попросту не участвуют в выделении мощности. При  $kR \ll 1$  сопротивление столь велико, что скинирование отсутствует, но вихревые токи в объеме ничтожны. С увеличением частоты поля диссипация, стимулированная вихревыми токами, уменьшается. Характер влияния магнитной проницаемости на процесс неупругого рассеяния энергии более сложен, поскольку с увеличением проницаемости, с одной стороны, возрастает уровень скинирования, а с другой стороны, амплитудный множитель магнитной энергии в объеме увеличивается.