Диссипация энергии в системе проводящих однодоменных частиц с равномерным распределением направлений их легких осей

Педченко Б.А., *студ.*; Лютый Т.В., *докторант*;
Денисов С.И., *проф.*
Сумский государственный университет, г. Сумы

Целью данной работы является нахождение мощности тепловых потерь в системе проводящих ферромагнитных наночастиц, находящихся под действием слабого вращающегося магнитного поля $\mathbf{h}(\mathrm{t})$. Предполагается, что частицы между собой не взаимодействуют, распределение направлений $\boldsymbol{e}_a$ их легких осей является равномерным, а динамика вектора намагниченности $\mathbf{M} = \mathbf{M}(t)$ каждой частицы описывается уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта

$$\dot{\mathbf{M}} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\mathrm{eff}} + \frac{\alpha}{M} \mathbf{M} \times \dot{\mathbf{M}}. \qquad (1)$$

Здесь $\gamma (> 0)$ – гиромагнитное отношение, α – параметр затухания, включающий вклад вихревых токов, знак $\times$ обозначает векторное произведение, $M = |\mathbf{M}| = \mathrm{const}$, и $\mathbf{H}_{\mathrm{eff}}$ – эффективное магнитное поле, действующее на $\mathbf{M}$. Рассматривается случай, когда $\mathbf{H}_{\mathrm{eff}}$ включает в себя лишь вклад $(H_a/M)(\mathbf{M} \cdot \boldsymbol{e}_a)\boldsymbol{e}_a$, проистекающий от одноосной магнитной анизотропии, и вращающееся поле $\mathbf{h}(\mathrm{t}) = h(\boldsymbol{e}_x \cos \omega t + \boldsymbol{e}_y \sin \omega t)$, где H_a – поле анизотропии, h и ω – амплитуда и частота вращающегося поля, $\boldsymbol{e}_x$ и $\boldsymbol{e}_y$ – орты декартовой системы координат.

Используя выражение $q = V\mathbf{H}_{\mathrm{eff}} \cdot \dot{\mathbf{M}}$ (V – объем частицы, точка между векторами обозначает их скалярное произведение) для мощности потерь в одной частице, с помощью уравнения (1) мощность потерь в единице объема системы можно представить в виде $Q = (\alpha n V/\gamma M)\langle \dot{\mathbf{M}}^2 \rangle$. Здесь n – концентрация частиц, а угловые скобки обозначают усреднение по направлениям их легких осей. Отсюда, полагая, что $h \ll H_a$, решая уравнение (1) в линейном по h приближении и проводя процедуру усреднения, находим

$$Q = \frac{2}{3} \alpha n V \gamma M h^2 \frac{\omega^2 \left[(1+\alpha^2)\omega^2 + \omega_r^2 \right]}{\omega^2 \left[(1+\alpha^2)^2 \omega^2 - 2(1-\alpha^2)\omega_r^2 \right] + \omega_r^4}, \qquad (2)$$

где $\omega_r = \gamma H_a$. Согласно этой формуле мощность потерь Q как функция ω при $\alpha \ll 1$ имеет резкий максимум вблизи резонансной частоты ω_r, приближенно равный $Q|_{\omega=\omega_r} = nV\gamma M h^2/3\alpha$.

Полученные аналитические результаты подтверждены численно.