

01;05.2

Роль упругой диссипации в формировании затухания прецессии намагниченности в магнитоупругой среде

© П.М. Ветошко, В.Г. Шавров, В.И. Щеглов

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

E-mail: vshcheg@cplire.ru

Поступило в Редакцию 17 декабря 2014 г.

В применении к задаче уменьшения шума ротационного магнетометра рассмотрено формирование затухания прецессии намагниченности за счет упругой диссипации в магнитоупругой среде. Показано, что при достаточно большой величине упругой диссипации эффективность ее вклада в магнитную резко падает.

Измерение слабых магнитных полей является важной задачей практики, в первую очередь для биомагнетизма и особенно магнитоэнцефалографии [1]. Среди конструкций магнетометров, работающих при комнатной температуре [1], высокой чувствительностью в сочетании с простотой реализации выделяется ротационный магнетометр (flux-gate magnetometer) [2-4], представляющий собой магнитный диск, намагниченный в плоскости вращающимся полем. Уровень чувствительности такого магнетометра, достигающий 10^{-9} Ое, в первую очередь определяется свойствами релаксации магнитных колебаний [3,4]. Однако основной механизм релаксации в магнитных средах, двухмагнетонное рассеяние [5], для полного описания магнитного затухания в этом случае недостаточен.

В работах [6,7] рассмотрен альтернативный механизм, состоящий в формировании магнитного затухания за счет упругой диссипации.

В работе [8] показано, что наибольший вклад упругого затухания в магнитное имеет место в резонансных условиях.

Во всех перечисленных работах предполагается, что магнитное затухание по мере роста упругой диссипации всегда только возрастает. Этот вывод нельзя признать бесспорным, так как рассмотренные модели упругой вязкости [6], магнитострикционной добавки к потенциалу [7], нераздельности магнитной и упругой диссипации [8] являются неполными.

В данной работе проведено рассмотрение вклада упругой диссипации в магнитную на основе последовательно развитого аппарата нелинейных магнитоупругих колебаний, в результате чего показано, что при достаточно большой величине упругой диссипации эффективность ее вклада в магнитную резко падает.

Геометрия задачи и используемый математический аппарат аналогичны принятым в работе [9]. Для изучения релаксации рассматривалось установление свободных колебаний намагниченности после начального отклонения [8]. Параметр затухания Гильберта [5] полагался равным нулю, а параметр затухания магнитных колебаний, вносимого за счет упругой диссипации, определялся по экспоненциальному спаду их амплитуды.

На рис. 1. показана зависимость таким образом определенного эффективного параметра магнитного затухания α_p от величины параметра затухания упругого β при различных значениях константы магнитоупругого взаимодействия V_2 .

Из рис. 1 видно, что исследуемая зависимость, вместо ожидаемого из работ [6–8] монотонного роста, имеет колоколообразный вид, т. е. по мере увеличения упругого затухания магнитное затухание увеличивается лишь до определенного критического значения, где достигает максимума, после чего уменьшается, далее стремясь к нулю. При уменьшении константы магнитоупругого взаимодействия значение максимума понижается, а сам он смещается в сторону меньших значений упругого затухания.

Для интерпретации спада наблюдаемой зависимости при увеличении параметра β воспользуемся аппаратом, предложенным А.П. Ивановым с соавторами, состоящим в замене исходной магнитоупругой системы из семи уравнений первого порядка [9] новой системой из двух уравнений второго порядка, описывающей связанные колебания двух осцилляторов — магнитного и упругого [10,11].

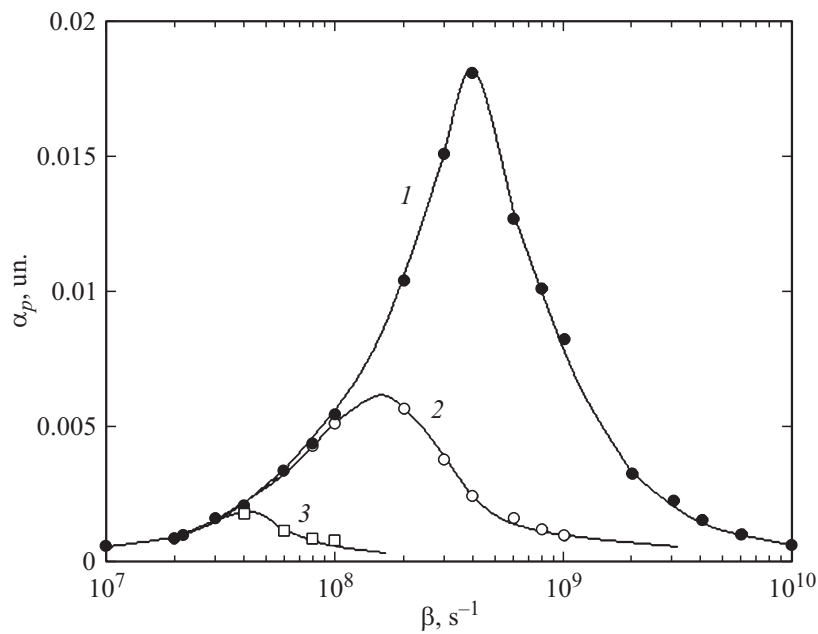


Рис. 1. Колоколообразный характер зависимости эффективного параметра магнитного затухания α_p от параметра упругой диссипации β (подмагничивающее постоянное поле $H_0 = 2750$ Ое, частота переменного поля $f = 2.8$ GHz; параметры материала соответствуют железо-иттриевому гранату (ЖИГ)). 1 — $B_2 = B_2$ (ЖИГ); 2 — $B_2 = 0.4B_2$ (ЖИГ); 3 — $B_2 = 0.1B_2$ (ЖИГ), где $B_2(\text{ЖИГ}) = 6.96 \cdot 10^6 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Упомянутая упрощенная система в случае, когда упругие колебания становятся релаксационными, имеет вид

$$\frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} + \omega_1^2 x_1 + \gamma_1 x_2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial t} + \frac{\omega_2^2}{2\beta} x_2 = -\frac{\gamma_2}{2\beta} x_1. \quad (2)$$

где β — параметр упругой диссипации, а явные выражения для остальных коэффициентов приведены в работах [10,11].

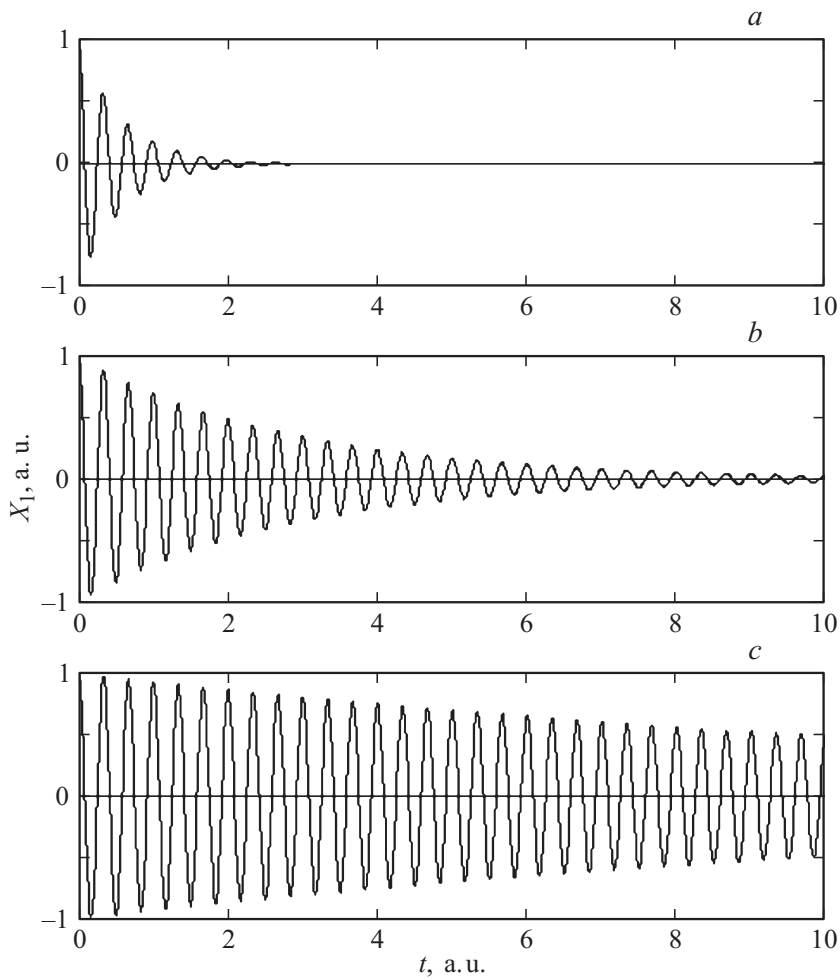


Рис. 2. Увеличение времени затухания колебаний магнитного осциллятора при увеличении параметра упругой диссипации ($\omega = 18.8496$, $f = 3.0$; $\gamma_{1,2} = 100$). *a* — $\beta = 4$; *b* — $\beta = 20$; *c* — $\beta = 100$.

Разрешая второе уравнение относительно x_2 и подставляя в первое, получаем уравнение третьего порядка для x_1 . Полагая $x_1 = \exp(\lambda t)$ и разрешая соответствующее характеристическое уравнение методом Кардано, получаем два комплексно сопряженных корня

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2}(A_1 + A_2) \pm i \frac{\sqrt{3}}{2}(A_1 - A_2), \quad (3)$$

где

$$A_{1,2} = \pm \sqrt[3]{\sqrt{\frac{\omega^6}{27} + \frac{\gamma_1^2 \gamma_2^2}{16\beta^2}} \pm \frac{\gamma_1 \gamma_2}{4\beta}}, \quad (4)$$

определяющих колебательные решения.

Общий ход развития во времени решений системы (1)–(2) иллюстрируется рис. 2. В соответствии с (3)–(4) решение имеет вид синусоиды, амплитуда которой экспоненциально спадает. При увеличении параметра первые слагаемые уменьшаются, т. е. спад экспоненты замедляется.

Таким образом, увеличение затухания упругого осциллятора выше определенного предела приводит к уменьшению его вклада в затухание осциллятора магнитного, т. е. при достаточно большой величине упругой диссипации эффективность ее вклада в магнитную резко падает.

Исходя из этого можно полагать, что для уменьшения уровня шума ротационного магнетометра следует выбирать материал с достаточно большим параметром упругой диссипации, превышающим значение, соответствующее максимуму кривой на рис. 1.

Работа выполнена при финансовой поддержке за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00279).

Список литературы

- [1] *Robbes D.* // Sens. Actuators A. 2006. V. 129. P. 86–93.
- [2] *Ветошко П.М.* Магнитометр. Патент РФ № 2100819. Классы: G01R33/00, G01R33/02, G01R33/03. Приоритет от 30.09.1996.
- [3] *Vetoshko P.M., Valeiko M.V., Nikitin P.I.* // Sens. Actuators. A. 2003. V. 106. N 1–3. P. 270–273.
- [4] *Dufay B., Saez S., Cordier C., Dolabdjian C., Dubic C., Hristoforou E., Ubizskii S.* // IEEE Sens. J. 2011. V. 11. N 12. P. 3211–3215.

- [5] Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994.
- [6] Suhl H. // IEEE Trans. Magn. 1998. V. 34. N 4. P. 1834–1838.
- [7] Vittoria C., Yoon S.D., Widom A. // Phys. Rev. B. 2010. V. 81. N 1. P. 014 412(6).
- [8] Ветошко П.М., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // Электронный „Журнал радиоэлектроники“. 2014. № 11. С. 1–56. (<http://jre.cplire.ru/jre/nov14/1/text.html>, <http://jre.cplire.ru/jre/nov14/1/text.pdf>).
- [9] Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // РЭ. 2009. Т. 54. № 7. С. 863–874.
- [10] Власов В.С., Иванов А.П., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // Электронный „Журнал радиоэлектроники“. 2013. № 11. С. 1–38 (<http://jre.cplire.ru/jre/nov13/3/text.html>, <http://jre.cplire.ru/jre/nov13/3/text.pdf>).
- [11] Власов В.С., Иванов А.П., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // Электронный „Журнал радиоэлектроники“. 2014. № 1. С. 1–42 (<http://jre.cplire.ru/jre/jan14/11/text.html>, <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/11/text.pdf>).