

05
Свойства фонового электромагнитного поля вблизи проводников и диэлектриков, находящихся под механическим нагружением

© Е.П. Тетерин,¹ С.А. Анисимова,¹ П.Е. Тетерин,² В.К. Лукичева¹

¹ Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, 601915 Ковров, Владимирская обл., Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 115409 Москва
 e-mail: phys-ter@mail.ru

(Поступило в Редакцию 21 ноября 2012 г.)

Аналитически и экспериментально проанализировано фоновое электромагнитное поле вблизи проводников и диэлектриков как носителя информации о процессах, происходящих в веществе. Предложены методы обнаружения слабых детерминированных изменений электромагнитных сигналов, идущих от объекта, на фоне хаотических изменений много большей амплитуды фонового электромагнитного поля.

Все тела, расположенные у поверхности Земли, находятся в фоновом электромагнитном поле, образованном электромагнитными излучениями, приходящими из космического пространства, излучениями естественных процессов, протекающих в недрах планеты, и излучениями, являющимися результатом жизнедеятельности цивилизации. Попытки подавления фонового электромагнитного поля при изучении слабых сигналов, идущих от объектов, особенно в области низких частот, требуют значительных затрат. Авторами предложена идея использовать это поле как носитель информации о процессах, происходящих в веществе.

Любое тело представляет собой взаимообусловленную систему положительных и отрицательных зарядов, которые находятся в фоновом электромагнитном поле. Заряженные частицы вещества, взаимодействуя с этим фоном, сами становятся источниками электромагнитных полей с характеристиками, зависящими от состояния вещества. То есть вблизи каждого тела существует суперпозиция фонового электромагнитного поля и собственного электромагнитного поля этого тела. Анализируя результирующее поле, можно получить информацию о состоянии вещества интересующего нас тела.

Решая систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме в общем виде, приходим к известному уравнению

$$\Delta E = \varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu\mu_0 \frac{\partial j}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \text{grad}(\rho). \quad (1)$$

Решение уравнения (1) представим в виде суперпозиции двух полей

$$E = E_1 + E_2,$$

где E_1 — есть решение уравнения распространения электромагнитной волны фонового поля в вакууме:

$$\Delta E_1 = \varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2 E_1}{\partial t^2}, \quad (2)$$

а функция E_2 описывается дифференциальным уравнением (3)

$$\Delta E_2 = \varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2 E_2}{\partial t^2} + \mu\mu_0 \frac{\partial j}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \text{grad}(\rho) \quad (3)$$

и характеризует электромагнитное поле вблизи вещества. Таким образом, как следует из уравнений Максвелла, электромагнитные поля вблизи исследуемого объекта являются суперпозицией фонового электромагнитного поля E_1 и собственного электромагнитного поля объекта E_2 , создаваемого разнообразными внутренними процессами, свойства которых зависят от состояния вещества и от природы физического воздействия, например внешней силы, вызывающей упругую деформацию тела.

При дальнейшем анализе будем полагать, что в исследуемом нами диапазоне выполняется условие $\lambda \gg l_{\text{object}}$, следовательно, $\Delta E \approx 0$:

$$\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2 E_2}{\partial t^2} = -\mu\mu_0 \frac{\partial j}{\partial t} - \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \text{grad}(\rho). \quad (4)$$

Напряженность собственного электромагнитного поля объекта E_2 будем представлять в виде суммы постоянной E_3 и переменной E_4 составляющих

$$E_2(t) = E_3 + E_4(t). \quad (5)$$

Можно полагать, что сила упругости, возникающая при упругой деформации в металлическом стержне, приводит к искажению кристаллической решетки и возникновению градиента объемной плотности зарядов, а в стержне из диэлектрика — к возникновению градиента объемной плотности связанных зарядов [1]. В обоих случаях изменяется напряженность электростатического поля вблизи стержня E_3 , которую в первом приближении можно считать пропорциональной силе упругой деформации. Для разделения стационарного поля E_3 и хаотически меняющегося фонового электромагнитного поля E_1 много большей амплитуды применяются методы

обработки слабого сигнала в условиях повышенных помех [2]. При интегрировании за большой промежуток времени $\int_0^{t \rightarrow \infty} E_1 dt \rightarrow 0$, в то время как $\int_0^{t \rightarrow \infty} E_3 dt \propto F_{\text{elast}}$. Таким образом, слабый стационарный сигнал удается извлечь из хаотического шума.

Рассмотрим уравнение (4) с целью определения фазового сдвига φ между собственным электромагнитным полем объекта E_2 и фоновым электромагнитным полем E_1 :

$$\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2 E_2}{\partial t^2} = -\mu\mu_0\gamma \frac{\partial E_1}{\partial t} - \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \beta F_{\text{elast}}.$$

Если искать решение в виде

$$E_1(t) = A_1 \sin(\omega t),$$

$$E_2(t) = E_3 + A_4 \sin(\omega t + \varphi),$$

то получаем выражение для сдвига фаз

$$\varphi \approx \frac{\beta F_{\text{elast}}}{(\varepsilon\varepsilon_0)^2 \omega^2 \mu\mu_0 A_4}. \quad (6)$$

Таким образом, сила упругой деформации вносит изменения в сдвиг фаз между фоновым электромагнитным полем и полем объекта, и эта зависимость в первом приближении линейная.

Для проверки сформулированной идеи была разработана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из двух идентичных каналов, каждый из которых включает в себя: датчик электромагнитного поля 1, широкополосный усилитель 2, аналого-цифровой преобразователь 3, цифровую память 4. Выходы блоков памяти через USB-порт связаны с компьютером, который по соответствующей программе осуществляет обработку поступающей информации. В экспериментах был применен широкополосный усилитель с полосой пропускания 0–200 МГц. Аналого-цифровой преобразователь осуществлял оцифровку поступающего сигнала с частотой 10^9 Hz. Исследуемое тело помещалось вблизи

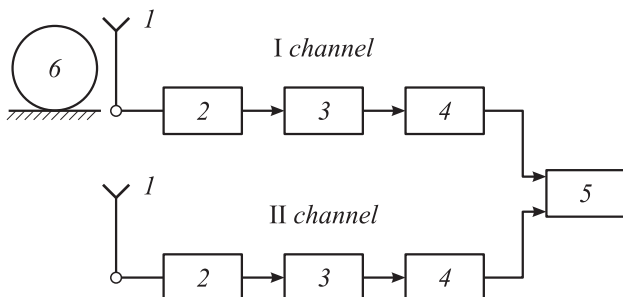


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — датчик электромагнитного поля, 2 — широкополосный усилитель, 3 — аналого-цифровой преобразователь, 4 — цифровая память, 5 — компьютер, 6 — исследуемое тело.

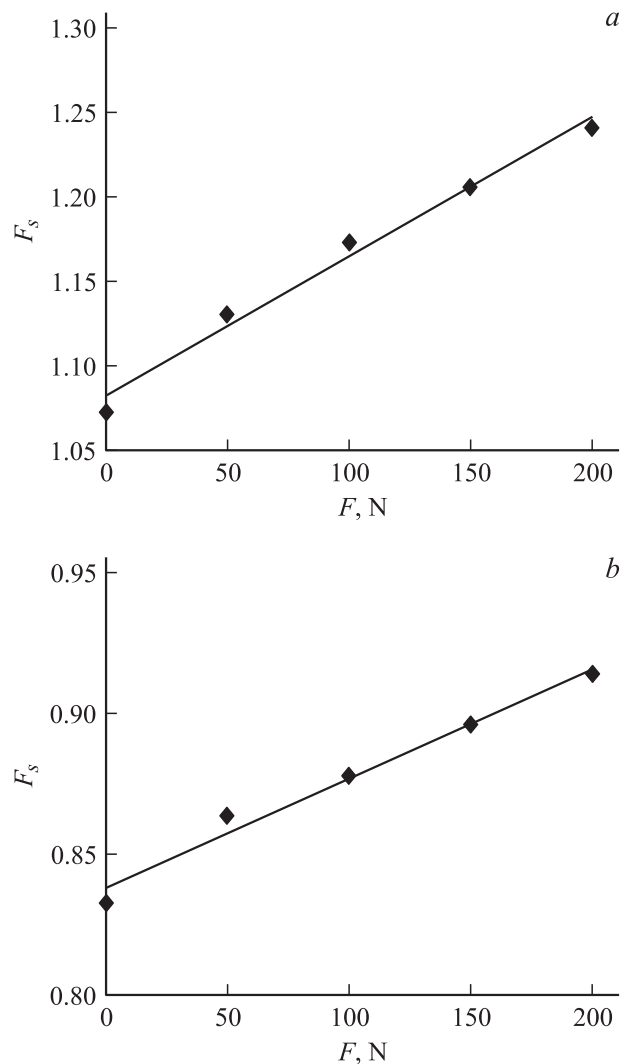


Рис. 2. Экспериментальные зависимости F_s от нагрузки (N) для стержня из углепластика (a) и стали 40X (b).

датчика электромагнитного поля первого канала. Экспонирование сигналов от первого и второго каналов одновременно осуществлялось от 5 до 50 мин.

Полагаем, что первый и второй каналы регистрируют функции, пропорциональные в первом канале $f_1(t) = E_1(t)_{\text{phon}} + E_2(t)_{\text{object}}$, во втором канале $f_2(t) = E_1^*(t)_{\text{phon}}$, где $E_1(t)_{\text{phon}}$ и $E_1^*(t)_{\text{phon}}$ — напряженности фонового электромагнитного поля в первом и втором канале соответственно, $E_2(t)_{\text{object}}$ — возмущение электромагнитного поля, вносимое объектом в первом канале. После фурье-преобразования результатов измерений на фиксированной частоте рассматриваем отношение фурье-трансформант в первом и втором каналах

$$F = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{F_1^*(t)}. \quad (7)$$

Величина $F_1(t)/F_1^*(t)$ характеризует отношение амплитуды электромагнитного фона в первом канале к ам-

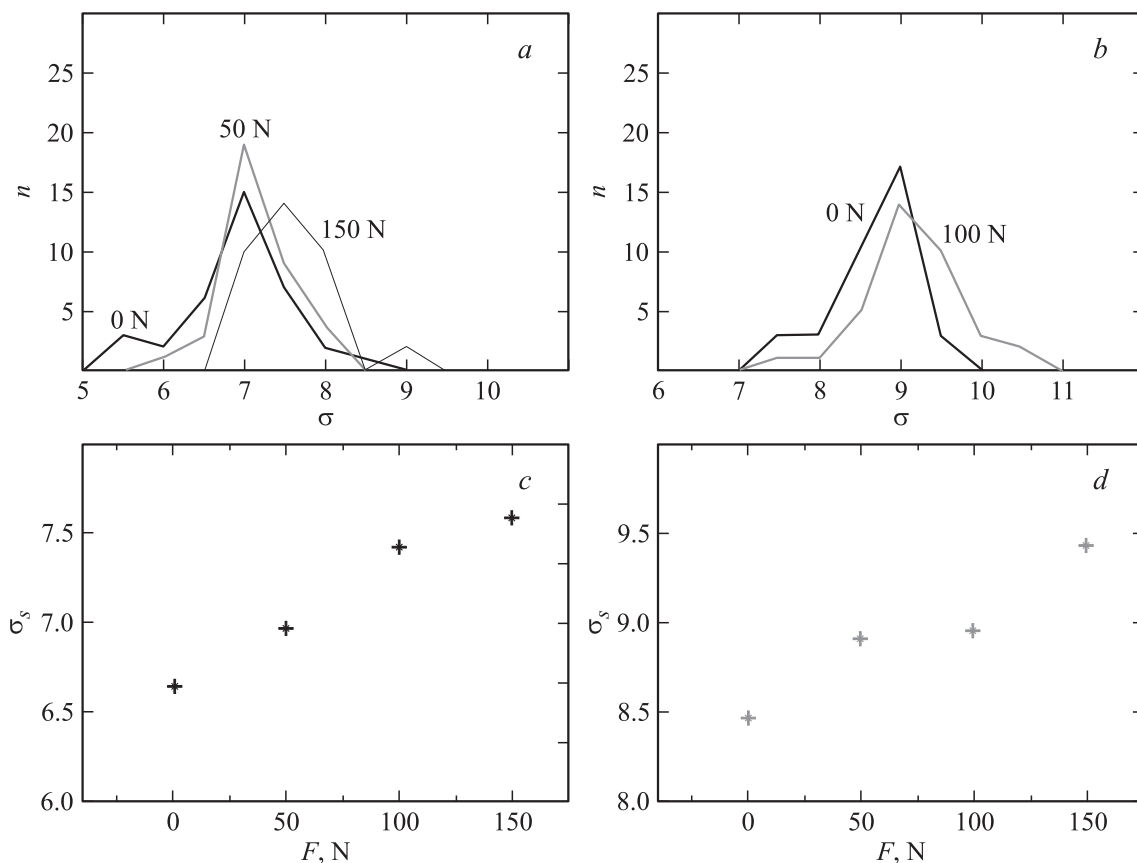


Рис. 3. Экспериментальные зависимости сдвига фаз между электромагнитными полями вблизи исследуемого вещества и контрольного пустого канала (функция σ пропорциональна сдвигу фаз): *a* — гистограмма распределения функции σ для стали, *b* — для углепластика, *c* — зависимость среднего значения σ_s от величины нагрузки на стержень для стали, *d* — для углепластика.

плитуде фона во втором канале. Второе слагаемое $F_2(t)/F_1^*(t)$ несет информацию об электромагнитных волнах, переизлученных объектом, помещенном в первый канал. Для того чтобы разделить слагаемые в (7), введем интегральное среднее функции F_s

$$F_s = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} F dt. \quad (8)$$

При наличии внешнего воздействия (например, создании нагрузки на стержень) хаотическое поведение первого слагаемого, отвечающего за электромагнитный фон, остается прежним, а второе слагаемое детерминированно меняется. Изменения незначительны, но при интегрировании выражения (8) за достаточно большой промежуток времени их удастся зафиксировать. Таким образом, изменение F_s несет информацию об изменении состояния объекта.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости F_s от нагрузки (сила F в N) для стержня из углепластика (рис. 2, *a*) и стали 40X (рис. 2, *b*). Вид нагружения — деформация изгиба при приложении поперечной силы F к центру стержня, лежащего на двух опорах на его концах. Линейная зависимость F_s от

нагрузки наблюдается в обоих случаях и подтверждает предположение, что напряженность электромагнитного поля вблизи вещества прямо пропорциональна силе упругой деформации. Наблюдается практически мгновенное изменение F_s при создании нагрузки.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости сдвига фаз между электромагнитными полями вблизи исследуемого вещества и контрольного пустого канала. Измеряемая функция σ пропорциональна сдвигу фаз. Хаотическое поведение электромагнитного фонового поля диктует необходимость построения гистограмм распределения функции σ при проведении достаточно большого количества измерений (рис. 3, *a* — сталь и *b* — углепластик). Снятые в различные моменты времени гистограммы распределения σ говорят о стабильном характере электромагнитного фона вблизи исследуемого объекта в спокойном состоянии и под нагрузкой. И для стали (рис. 3, *a*), и для углепластика (рис. 3, *b*) четко прослеживается сдвиг распределения σ при увеличении нагрузки на стержень. По распределению определяется среднее значение σ_s . В условиях слабого нагружения (до 200 N) во всех случаях наблюдается линейная зависимость среднего значения σ_s от величины нагрузки на стержень (рис. 2, *c* — сталь

и d — углепластик), как это и ожидалось теоретически (формула (6)).

Представленный материал позволяет сделать следующее заключение. Фоновое электромагнитное поле вблизи проводников и диэлектриков является носителем информации о процессах, происходящих в веществе. Аналитически и экспериментально установлено изменение характеристик фонового электромагнитного поля радиодиапазона вблизи исследуемого объекта при создании нагрузки. Предложены методы обнаружения слабых детерминированных изменений электромагнитных сигналов, идущих от объекта, на фоне хаотических изменений много большей амплитуды фонового электромагнитного поля. Предложенные методы позволяют бесконтактно диагностировать величину нагрузки, обладают хорошей воспроизводимостью результатов, отличаются простой технической реализацией и могут быть положены в основу пассивной дистанционной диагностики материалов любой природы.

Список литературы

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005. 651 с.
- [2] Карпенков А.С. Программно-зависимое радио. Спектральная обработка сигнала. LAP LAMBERT Academic Publishing. GmbH&Co.KG, 2011. 112 с.