

К. А. ГОРОНИНА

К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СПЛАВОВ ТИПА ПЕРМАЛЛОЯ ОТ ЧАСТОТЫ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 23 V 1948)

1. Речь идет о проницаемости μ в линейной области, т. е. при амплитуде поля H достаточно малой для того, чтобы можно было считать, что μ не зависит от H . Как было установлено еще в 1912 г. В. К. Аркадьевым⁽¹⁾ на железе и подтверждено рядом авторов, экспериментировавших с различными ферромагнитными материалами, μ , вообще говоря, комплексно и зависит от частоты (дисперсия).

Относительно сплавов типа пермаллоя нам известно следующее. О. И. Велецкая и В. М. Гойтанников⁽²⁾, а также А. И. Пильщиков⁽³⁾, измерявшие на различных звуковых частотах активную и реактивную составляющие импеданса тороида с сердечником из отожженного пермаллоя (у Пильщикова ленты), приходят к заключению, что для малых полей выполняется соотношение:

$$\mu = m + \frac{m_1}{1 + (\nu/\nu_k)^2} + im_2 \frac{\nu/\nu_k}{1 + (\nu/\nu_k)^2}, \quad (1)$$

где m и m_1 — постоянные, ν — частота магнитного поля, а ν_k — некоторая характеристическая частота. Для исследованных образцов Велецкая и Гойтанников нашли $\nu_k = 1100$ Hz, Пильщиков — 2300 Hz. С другой стороны, Эпельбойм⁽⁴⁾, производивший аналогичные опыты, не обнаружил в области звуковых частот дисперсии в отожженной пермаллоевой ленте и закаленной ленте из мюметалла, но обнаружил ее в закаленной ленте из пермаллоя. В более позднем кратком сообщении того же автора⁽⁵⁾ содержится указание на наличие дисперсии у отожженного пермаллоя в области более высоких частот. Но Уэбб⁽⁶⁾, измерявший активную составляющую импеданса пермаллоевой проволоки, по которой шел ток частоты, варьировавшей в интервале от 200 до 1500 kHz, сделал заключение об отсутствии дисперсии μ . То же утверждение делают Смит, Григори и Линн⁽⁷⁾, измерявшие активную составляющую импеданса пермаллоевой полоски, по которой шел ток от 1,5 до 6 MHz. Заметим, однако, что вывод о наличии или отсутствии дисперсии, основанный на измерении только одной составляющей импеданса, является необоснованным.

Другие известные нам исследования импеданса проволок^(8,9) из сплавов типа пермаллоя были проведены при столь сильных токах, что по ним трудно, вследствие влияния гистерезиса, судить о дисперсии проницаемости.

Нами измерялись на проволоках из материала типа пермаллоя обе составляющие импеданса (активная и реактивная), на основании чего однозначно определялись путем вычисления при различных частотах

действительная и мнимая части проницаемости. Результаты определенно устанавливают комплексность μ и наличие дисперсии. Нами исследована также зависимость μ от частоты при наличии постоянного

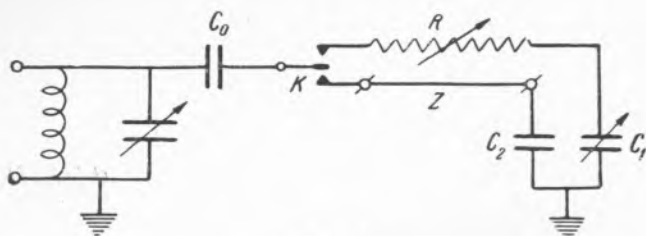


Рис. 1

ражается формулой

$$\frac{Z}{R_0} = \frac{R + iX}{R_0} = \sqrt{2} \xi \frac{J_0(\xi \sqrt{8})}{J_1(\xi \sqrt{8})}, \quad (2)$$

где $\xi = \pi a \sqrt{-\mu \nu \sigma}$, R_0 — сопротивление на постоянном токе, a — радиус проволоки, ν — частота, σ — электропроводность. Измерив R/R_0 и X/R_0 ,

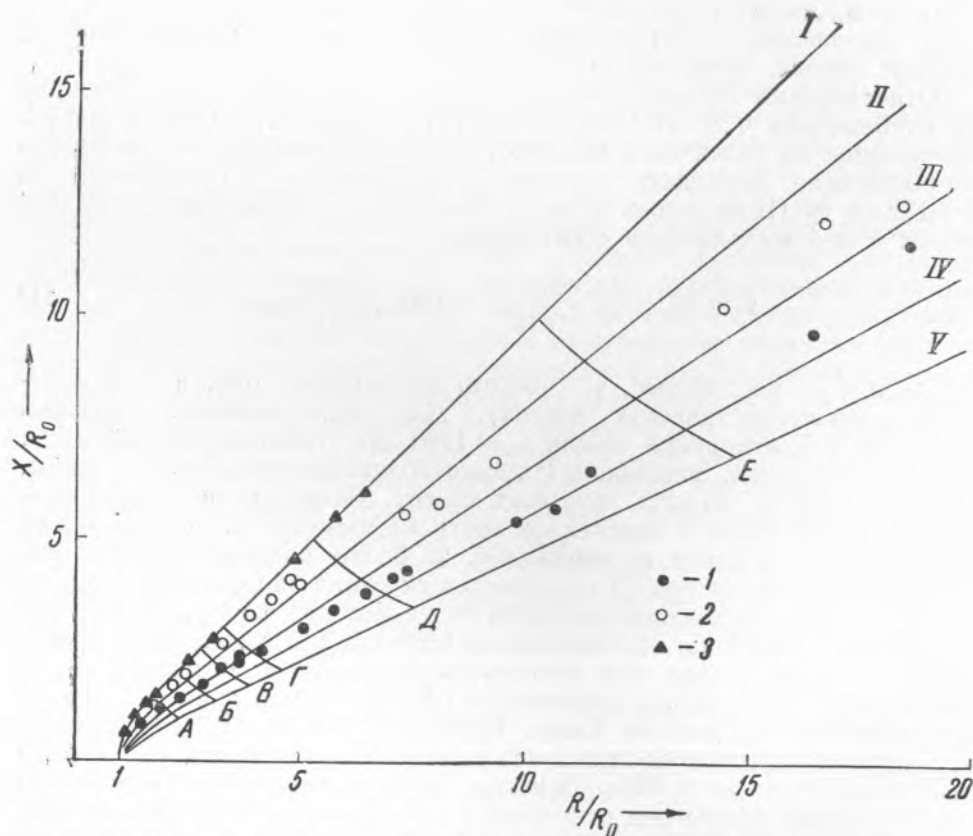


Рис. 2. 1 — $H = 0$; 2 — $H = 2$ Ое, 3 — $H = 30$ Ое. I — $\operatorname{tg} \varphi = 0$; II — $\operatorname{tg} \varphi = 0,2$; III — $\operatorname{tg} \varphi = 0,4$; IV — $\operatorname{tg} \varphi = 0,6$; V — $\operatorname{tg} \varphi = 0,8$. A — $k = 1,4$; Б — $k = 2$; В — $k = 2,5$; Г — $k = 3$; Д — $k = 5$; Е — $k = 10$.

можно с помощью таблиц Введенского и Шиллерова ⁽¹⁰⁾ найти μ_1 и $\operatorname{tg} \varphi = \mu_2 / \mu_1$ где μ_1 и μ_2 , соответственно, действительная и мнимая части проницаемости. Если проволока находится в постоянном продольном поле, то под μ нужно понимать отношение B_φ / H_φ , где H_φ —

амплитуда магнитного поля тока, B_φ — амплитуда создаваемой им индукции.

3. Измерения производились на проволоках из железо-никелевого сплава, близкого по составу к пермаллою, содержащего примеси меди и молибдена, $a = 0,25$ мм, длина 40 см, отожженных в атмосфере водорода по следующему режиму: нагрев от 20 до 1050°С со скоростью 80° в 1 мин., выдержка 5,5 час. при 1050°, охлаждение со скоростью 1° в 1 мин. На частотах от 500 Hz до 100 kHz измерения

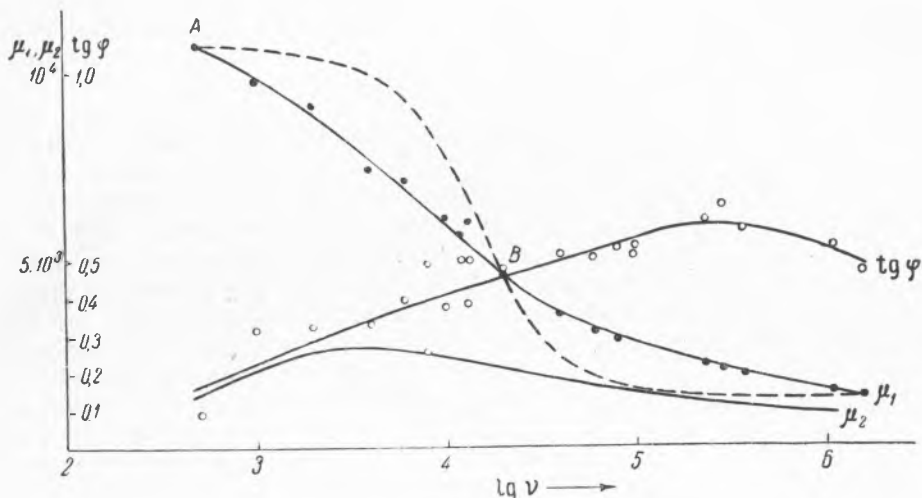


Рис. 3

производились по методу, описанному в работе И. Л. Берштейна, Г. С. Горелика и др. (9), но при гораздо меньшей амплитуде тока — порядка 0,3 мА, чем обеспечивалась линейность. На частотах 100—2000 kHz измерения производились по схеме, изображенной на рис. 1.

Параллельно контуру лампового генератора приключается либо исследуемая проволока Z , последовательно с конденсатором известной емкости C_2 , либо переменное, проградуированное на постоянном токе омическое сопротивление, соединенное последовательно с переменной емкостью C_1 . Величины омического сопротивления и емкости C_1 подбираются такими, чтобы при переключении ключа K частота генератора и напряжение на его контуре не изменялись. Напряжение на контуре измеряется вольтметром ВКС-7, а частота колебаний в контуре фиксируется по частоте генератора стандартных сигналов с помощью фигур Лиссажу на электронном осциллографе. Активное сопротивление проволоки равно найденному таким образом омическому сопротивлению, ее реактивное сопротивление вычисляется по известным ν , C_1 , C_2 . С помощью конденсатора C_0 подбиралась нужная амплитуда тока в проволоке (того же порядка, что на звуковых частотах).

4. На рис. 2 даны результаты измерений R/R_0 и X/R_0 при различных частотах и продольных полях. Здесь же приведены теоретические кривые, построенные по формуле (2) для различных постоянных $k = \pi a \sqrt{\mu_1 \nu \sigma}$ и $\text{tg } \varphi = \mu_2 / \mu_1$. Из рис. 2 видно, что при малых полях вдоль проволоки μ комплексно, при больших полях μ действительно (при всех значениях поля рост абсолютной величины импеданса соответствует росту частоты).

На рис. 3 дана построенная на основании тех же данных зависимость от логарифма частоты действительной и мнимой частей проницаемости и $\text{tg } \varphi$ при нулевом поле вдоль проволоки. Пунктирная кривая построена по формуле (1) при значении $m = 1200$; константы

m_1 и ν_k подобраны так, чтобы кривая совпадала с экспериментальной в точках А и В.

На рис. 4 дана зависимость R/R_0 и X/R_0 от $\sqrt{\nu}$ при нулевом поле вдоль проволоки и при поле 30 Ое.

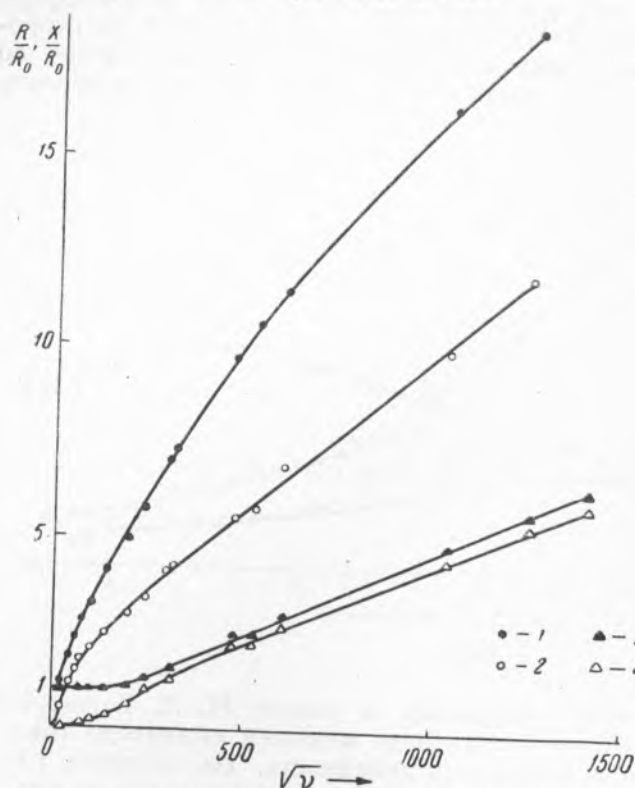


Рис. 4. 1 — R/R_0 , $H=0$; 2 — X/R_0 , $H=0$; 3 — R/R_0 , $H=30$ Ое; 4 — X/R_0 , $H=30$ Ое

При поле вдоль проволоки, равном 30 Ое, ход кривых во всем интервале частот совпадает с теоретическим, полученным по формуле (2) при действительном $\mu = 240$. При нулевом поле вдоль проволоки в интервале частот $3 \cdot 10^4$ — $1,5 \cdot 10^6$ Hz R/R_0 зависит от $\sqrt{\nu}$ линейно. Линейная зависимость R/R_0 от частоты наблюдалась также во всем исследованном нами интервале частот Смитом и др. (7). Именно на основании этого факта указанные авторы сделали заключение об отсутствии дисперсии μ . Но, как видно из рис. 3, проницаемость комплексна и меняется с частотой.

Отметим еще, что, как показывает сравнение теоретической и экспериментальной кривых на рис. 3, существует, при качественном согласии, заметное количественное расхождение экспериментальной кривой для μ_1 с формулой (1).
Выражаю благодарность проф. Г. С. Горелику за внимание к этой работе, а также С. И. Боровицкому и Н. М. Забавиной за помощь в проведении экспериментов.

Физико-технический институт
Горьковского государственного университета

Поступило
20 V 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. К. Аркадьев, ЖРФХО, 44, 4, 165 (1912); Ann. d. Phys., 58, 105 (1919).
- ² О. И. Велецкая и В. М. Гойтанников, Сб. Практические проблемы электромагнетизма, изд. АН СССР, М. — Л., 1939.
- ³ А. И. Пильшиков, Сб. Проблемы ферромагнетизма и магнетодинамики, изд. АН СССР, М. — Л., 1946.
- ⁴ J. Erelboim, Rev. Gén. de l'Electricité, 55, 310 (1946).
- ⁵ J. Erelboim, C. R., 221, 535 (1947).
- ⁶ J. S. Webb, Proc. I. R. E., 26, 433 (1938).
- ⁷ Alva W. Smith, J. H. Gregory and J. T. Lunn, J. Appl. Phys., 17, 38 (1946).
- ⁸ E. P. Harrison, G. L. Turner, M. Rowe and H. Gollor, Proc. Roy. Soc., 157, 651 (1937).
- ⁹ И. Л. Берштейн, Г. С. Горелик, К. А. Горонина, И. С. Жукова, Г. Н. Кутейников и А. Г. Любина, ЖТФ, 55, 505 (1946).
- ¹⁰ Б. А. Введенский, ЖРФХО, 58, 241 (1926); Z. f. Phys., 34, 309 (1925).