

И. С. ЖУКОВА

О СПЕКТРЕ ЭДС ПОПЕРЕЧНОЙ ИНДУКЦИИ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 18 I 1949)

1. Под эдс поперечной индукции мы понимаем эдс, наводимую в катушке с ферромагнитным сердечником переменным током, текущим вдоль сердечника (плоскость витков перпендикулярна направлению тока). Существование такой эдс было замечено И. Л. Берштейном, К. А. Горониной и мною при работе с ферромагнитными проволоками высокой проницаемости (игравшими роль сердечника) и использовано для измерения небольших магнитных полей (¹, ²). Первый набросок теории этого явления дал И. Л. Берштейн (¹), основываясь на нелинейности зависимости B от H . Считая магнитные свойства не зависящими от направления и пренебрегая гистерезисом, Берштейн получил результаты, правильно передающие, в первом приближении, основные черты явления в незакрученной проволоке, в частности следующие: эдс поперечной индукции существует лишь при наличии продольного (по отношению к проволоке) магнитного поля; если это поле постоянно во времени, ее основная частота равна удвоенной частоте тока в ферромагнитной проволоке. Г. С. Горелик (³) обратил внимание на то, что в практически важном случае, когда проволока закручена (она при этом уже не изотропна в магнитном отношении), эдс поперечной индукции не должна исчезать в отсутствие продольного поля и ее основная частота при этом должна быть равна частоте первичного тока.

Здесь приводятся результаты дальнейшего, более детального теоретического анализа спектра эдс поперечной индукции в постоянном продольном поле с учетом закручивания и гистерезиса, а также краткое изложение экспериментального исследования этого спектра и сравнение его результатов с теорией.

Главные результаты работы: 1) эдс поперечной индукции имеет (при синусоидальном первичном токе) сложный спектр, состоящий из четных и нечетных гармоник частоты первичного тока; четная и нечетная части спектра обусловлены в основном различными физическими факторами: четная — продольным магнитным полем, нечетная — закручиванием; 2) некоторые черты спектра могут быть объяснены магнитными и упругими неоднородностями в ферромагнитной проволоке и наличием в ней постоянного циркулярного намагничивания. Таким образом, изучение спектра эдс поперечной индукции может позволить судить о некоторых свойствах ферромагнитных материалов.

2. Обозначим H_x, B_x — продольные, H_y, B_y — поперечные компоненты поля и индукции в некоторой точке проволоки, σ — величину главного напряжения в этой точке, обусловленного закручиванием

провода. Будем рассматривать H_x и σ как постоянные параметры, B_x и H_y — как периодические функции времени, причем $H_y = H_{y0} \cos \Omega t$. Изображающая точка на плоскости B_x, H_y описывает петлю гистерезиса, которая может быть представлена аналитически с помощью двузначной функции. Из соображений симметрии следует, что эта функция имеет следующий вид:

$$B_x = \sum \alpha_{mnp} H_x^{2m+1} H_y^{2n} \sigma^{2p} + \sum \beta_{mnp} H_x^{2m} H_y^{2n+1} \sigma^{2p+1} \pm \sum \gamma_{mnp} H_x^{2m+1} H_y^{2n+1} \sigma^{2p} \pm \sum \delta_{mnp} H_x^{2m} H_y^{2n} \sigma^{2p+1} \quad (1)$$

(+ при $\dot{H}_y > 0$, — при $\dot{H}_y < 0$), причем α, β, γ и δ , вообще говоря, зависят от истории изменения H_x и σ . При $\sigma = 0$ имеем

$$B_x = \sum \alpha_{mn0} H_x^{2m+1} H_y^{2n} \pm \sum \gamma_{mn0} H_x^{2m+1} H_y^{2n+1}. \quad (2)$$

Это четная функция H_y и нечетная функция H_x . Отсюда следует, что в незакрученной проволоке эдс поперечной индукции содержит только четные гармоники частоты $2\Omega, 4\Omega, \dots$ (фазы гармоник — нечетные функции H_x).

При $H_y = 0$ имеем

$$B_x = \sum \beta_{0np} H_y^{2n+1} \sigma^{2p+1} \pm \sum \delta_{0np} H_y^{2n+1} \sigma^{2p+1}. \quad (3)$$

Это нечетная функция H_y и σ , следовательно, эдс содержит только нечетные гармоники $\Omega, 3\Omega, \dots$, их амплитуды — нечетные функции σ и при малых σ пропорциональны σ . В общем случае в спектре эдс поперечной индукции имеются как четные, так и нечетные гармоники, причем амплитуды четных гармоник — нечетные функции H_x и четные функции σ , амплитуды нечетных — наоборот. При малых H_x и σ амплитуды четных гармоник пропорциональны $H_x(1 + a\sigma^2)$, а амплитуды нечетных $\sigma(1 + bH_x^2)$, где a и b — постоянные.

Сказанное о четности — нечетности амплитуды можно сформулировать и так: при коммутации H_x четные гармоники только меняют фазу на π , нечетные не меняются вовсе; при замене σ на $-\sigma$ дело обстоит наоборот.

3. Исследование проводилось на проволоках из сплава типа пермаллоя, длины 40 см, диаметром 0,5 мм. Частота первичного тока менялась от 1 до 20 kHz, его амплитуда — от 50 до 200 ма. Обмотка индукционной катушки состояла из 10 секций по 2 тыс. витков в каждой секции. Для уменьшения паразитной связи между проволокой и катушкой были приняты специальные меры.

Спектральный анализ эдс поперечной индукции проводился следующим образом. Напряжение

$$u = \sum U_q \cos(q\Omega t - \varphi_q), \quad (4)$$

снимаемое с катушки (отличие его от эдс поперечной индукции, вызванное падением напряжения в катушке, для нас несущественно), подавалось вместе с напряжением $U \cos \omega t$ от генератора стандартных сигналов на смесительную лампу. Возникающее модулированное колебание вида

$$a \cos \omega t + \sum b U U_q \cos[(\omega t \pm q\Omega) t - \varphi_q]$$

подавалось затем на кварцевый фильтр, настроенный на фиксированную частоту 100 kHz. Плавно меняя ω , можно было поочередно выде-

для компонентов колебания (4). С помощью лампового вольтметра измерялись их амплитуды U_q . Кроме того, гетеродинируя их с колебанием $U \cos \omega t$, что дает напряжение, пропорциональное $U_q \cos(\Omega t - \varphi_q)$,

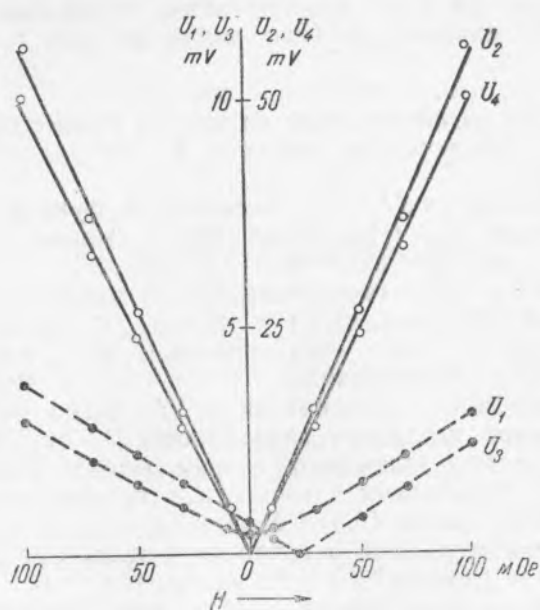


Рис. 1

можно было по фигуре Лиссажу, образуемой этим напряжением и первичным током на экране осциллографа, следить за изменением фазы φ_q .

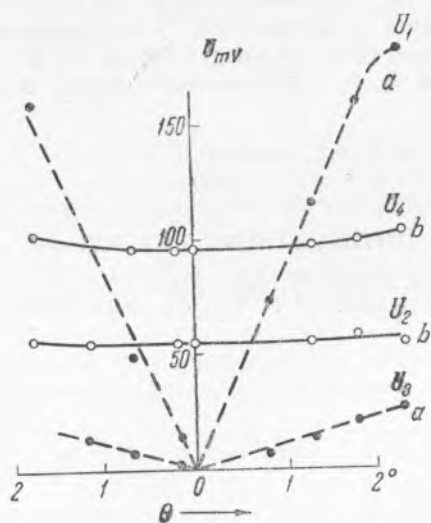


Рис. 2

4. Основные экспериментальные результаты представлены на рис. 1 и 2 (пунктирные кривые относятся к нечетным гармоникам, сплошные — к четным). На рис. 1 изображены зависимость амплитуд U_1, U_2, U_3, U_4 для раскрученной проволоки от H_x при амплитуде первичного тока 200 ма и частоте 5 kHz. Рис. 2 изображает зависимость U_1, U_2, U_3, U_4 от угла закручивания одного из концов проволоки

(другой конец неподвижен) при двух продольных полях (частота и амплитуда первичного тока прежние): $H_x = 0$ (кривые *a*) и $H_x = 97,5$ мОе (кривые *b*). Угол закручивания θ менялся плавно в одну и ту же сторону. За $\theta = 0$ (закрученная проволока) принят угол, при котором U_1 минимальна (как видно из рис. 1, при этом $U_1 = 0,5$ мВ).

Из них видно, что, в согласии с теорией:

1) Продольное магнитное поле влияет на четные гармоники гораздо сильнее, чем на нечетные (масштаб по оси ординат для них увеличен в 5 раз).

2) При малых полях U_2 и U_4 — линейные функции, а U_1 — квадратичная функция H_x . (Изменение фаз гармоник с полем также согласуется с теорией.)

3) Закручивание проволоки очень сильно влияет на нечетные гармоники и слабо на четные.

4) При небольших углах закручивания U_1 и U_3 — линейные функции θ , а U_2 и U_4 — квадратичные.

Кроме гистерезисной зависимости от H_x , легко объяснимой учетом гистерезисного характера зависимости B_x от H_x (продольный гистерезис), за рамки изложенной теории выходят следующие факты:

1) U_2 , U_4 не обращаются в точности в нуль ни при каком H_x (при $H_x = 0$ имеем * $U_2 = 5$ мВ, $U_4 = 0,5$ мВ).

2) U_1 , U_3 не обращаются в точности в нуль при $H_x = 0$ ни при каком θ (при $\theta = 0$ имеем * $U_1 = 80$ мВ, $U_3 = 40$ мВ).

3) U_1 не вполне симметрично, а U_3 сильно несимметрично по отношению к обоим знакам H_x .

Первые два факта могут быть, повидимому, удовлетворительно объяснены тем, что ферромагнитная проволока не вполне однородна в упругом и магнитном отношении, причем B_x в различных областях проволоки обращается в нуль при несколько различных значениях продольного поля H_x , третий — тем, что, кроме неоднородности, существует остаточное намагничение в направлении H_y .

Выражаю глубокую благодарность проф. Г. С. Горелику за внимание к этой работе и А. А. Грачеву за помощь в проведении эксперимента.

Физико-технический институт
при Горьковском государственном университете

Поступило
30 XI 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ И. Л. Берштейн, ДАН, 43, 400 (1944). ² И. Л. Берштейн, Изв. АН СССР, сер. физ., 8, 189 (1944). ³ Г. С. Горелик, Изв. АН СССР, сер. физ., 8, 172 (1944).

* Эти значения не могут быть показаны на чертежах из-за грубости масштаба.