

Инверсия виртуального размагничивающего коэффициента при локальном намагничивании

РЕУТОВ Ю.Я.

Экспериментально обнаружено изменение знака (инверсия) центрального коэффициента размагничивания ферромагнитного стержня, локально намагничиваемого двумя короткими катушками на начальном участке кривой намагничивания. Ранее аналогичное явление было обнаружено другими авторами при намагничивании стальных стержней в области насыщения. Приводятся результаты численного моделирования в программе Elcut и экспериментов с ферритовыми стержнями, намагничиваемыми переменным полем частотой 2 кГц посредством пары локальных катушек. Для ферритов использование такой частоты равносильно намагничиванию постоянным полем. При некотором расстоянии между намагничивающими катушками благодаря такой инверсии проницаемость стержня в центральном сечении существенно превысила как начальную проницаемость его материала, так и его проницаемость формы. Указанное явление объясняется влиянием подмагничивающего поля фиктивных магнитных зарядов, образующихся в стержне при локальном намагничивании и обсуждавшихся Р.И. Янусом еще в 1946 г. Поле этих зарядов убывает с расстоянием гораздо слабее, чем поле источника неоднородного поля, что и обуславливает обсуждаемое явление. Полученные результаты могут быть полезны для понимания процессов намагничивания ферромагнетиков неоднородным полем.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ферритовый стержень, приемная катушка, магнитные заряды, магнитная проницаемость, локальное намагничивание, размагничивающий коэффициент

Понятие размагничивающего коэффициента ферромагнитного предмета, введенное на заре развития учения о магнитных явлениях, успешно используется уже более века. Вкратце, суть явления сводится к учету размагничивающего поля магнитных зарядов, возникающих в намагниченном ферромагнитном предмете при наличии разрыва магнитной цепи.

Как известно, магнитные силовые линии выходят из северного магнитного полюса и входят в южный (см. рис. 1).

Но в таком случае внутри намагничиваемого ферромагнитного тела поле H_d от магнитных полюсов, возникших в результате действия внешнего однородного поля H_e , направленного слева – направо (на рис. 1), будет направлено в противоположную сторону, а значит, будет частично компенсировать в теле действие внешнего намагничивающего поля, т.е. оказывать размагничивающее влияние. В результате в каждой точке внутри намагничиваемого тела будет действовать не поле с напряженностью H_e , а поле с

$$H_i = H_e - H_d. \quad (1)$$

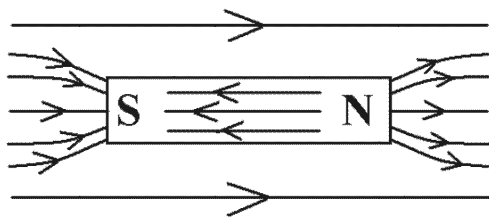


Рис. 1. Распределение силовых линий поля при намагничивании короткого стержня

Напряженность размагничивающего поля H_d пропорциональна намагниченности M ферромагнитного тела и связана с ней некоторым коэффициентом N , который принято именовать размагничивающим коэффициентом. Очевидно

$$H_d = NM, \quad (2)$$

и тогда

$$M = kH_i = k(H_e - NM), \quad (3)$$

где k – магнитная восприимчивость вещества ферромагнитного тела.

В таком случае, как нетрудно показать [1]:

$$M = \frac{k}{1 + kN} H_e. \quad (4)$$

В общем случае намагниченность тела обязательно одна и та же по всему его объему, так же как и магнитная восприимчивость материала, из которого оно изготовлено. По этой причине даже при условии первоначальной однородности внешнего намагничивающего поля размагничивающий коэффициент может варьироваться по объему тела, т.е. являться локальной характеристикой.

Ферромагнитные тела, ограниченные поверхностями второго порядка (шар, эллипсоид вращения, овоид), намагничиваются в однородном поле равномерно, и в таком случае размагничивающий коэффициент N такого тела при условии однородности магнитной восприимчивости материала по объему является постоянным по всему объему и зависит только от степени вытянутости тела вдоль направления намагничивающего однородного поля λ , т.е. от геометрической формы тела.

Если размер эллипсоида вращения (овоида) в направлении действия намагничивающего поля ничтожно мал по сравнению с его поперечным размером (тонкая пластина, намагничиваемая поперек плоскости), коэффициент $N=1$. В случае, когда поперечными размерами эллипсоида можно пренебречь, по сравнению с его длиной (или магнитная цепь вообще не имеет разрывов) размагничивающий коэффициент равен нулю.

По указанным причинам до недавних пор считалось, что размагничивающий коэффициент заключен именно в диапазоне

$$0 \leq N \leq 1. \quad (5)$$

Вместе с тем было известно [2], что ферромагнитные предметы, ограниченные поверхностями, не описываемыми уравнениями второго порядка (бруски, цилиндрические стержни и т.п.), намагничиваются даже в первоначально однородном внешнем поле неравномерно по объему и их размагничивающий коэффициент также варьируется по объему, т.е. имеет локальный характер. Вследствие этого он сложным образом зависит не только от степени вытянутости (формы) предмета, но и от его намагнитченности. По этой причине использование размагничивающего коэффициента как глобальной характеристики предмета заданной формы является не вполне корректным. Тем не менее, для приближенного описания процессов намагничивания предметов сложной формы были приняты к использованию магнитометрический и баллистический размагничивающие коэффициенты.

Магнитометрический коэффициент характеризует магнитный момент, приобретаемый предметом вследствие его намагничивания внешним однородным полем заданной напряженности, а баллистический — поток магнитной индукции, протекающий через центральное сечение предмета под действием того же поля. Для тел, ограниченных поверхностями второго порядка, оба эти коэффициента одинаковы, в то время как для всех других они могут отличаться на десятки процентов (для одного и того же тела). Тем не менее, было принято считать, что размагничивающий коэффициент все равно заключен в указанных пределах (5).

Положение изменилось после опубликования результатов исследований [3], где показано, что в области насыщения короткого стального стержня, намагничиваемого однородным внешним полем, его баллистический размагничивающий коэффициент оказался меньшим нуля, т.е. превратился из размагничивающего в «намагничивающий». При сравнении баллистических кривых намагничивания стержней из стали 3, обладающих одинаковым (около 24) относительным удлинением (эллипсоид вращения, круговой цилиндр, тороид) в полях напряженностью более 100 А/см, было обнаружено,

что кривая намагничивания цилиндра была выше не только кривой эллипсоида, но и тороида.

Авторы [3] полагают, что причиной такого аномального поведения кривой намагничивания разомкнутого цилиндра в области насыщения является дополнительный вклад потока индукции от областей цилиндра, расположенных по его краям (концам), в то время когда его центральная часть уже насытилась. Ведь цилиндр содержит больше ферромагнитного материала, чем эллипсоид тех же габаритов. Как бы то ни было, в [3] было установлено, что баллистический размагничивающий коэффициент тела, намагничиваемого однородным полем, в области насыщения может принимать значения меньше нуля (претерпевать инверсию).

В статье показывается, что баллистический размагничивающий коэффициент может принимать отрицательные значения и в гораздо меньших полях при намагничивании ферромагнитного тела резко неоднородным полем.

Следует сразу заметить, что в классическом понимании коэффициент размагничивания применим только для случая намагничивания однородным полем. В противном случае можно говорить о виртуальном или эффективном размагничивающем коэффициенте. Тем не менее, его использование может оказаться полезным для понимания и описания процессов такого варианта намагничивания.

Образцы. Исследования выполнялись на трех ферритовых стержнях марки М 400 НН (длиной 140 мм, диаметром 8 мм) с номинальной начальной проницаемостью вещества $\mu_a = 400$. Относительное удлинение такого стержня $\lambda = 17,5$. Согласно [2] его расчетный баллистический размагничивающий коэффициент $N_B = 0,0066$, а проницаемость формы (баллистическая) $\mu_\Phi = 151$. Измерения проводились в гармоническом поле частотой 2 кГц, что для феррита равноценно измерениям в статике.

Далее приводятся результаты измерений, полученные усреднением по трем образцам. При этом разброс показаний на разных экземплярах не превышал 2–3%.

Измерение проницаемости тела при намагничивании однородным полем. Для выяснения того, насколько фактическая проницаемость материала используемых ферритовых стержней соответствует их марке, были выполнены измерения в однородном поле. Стержень размещался посередине соленоида длиной 500 мм с постоянной 10 м^{-1} и намагничивался им вдоль длины. Посередине стержень охватывался измерительной катушкой средним диаметром 14 мм и длиной 10 мм, содержащей 2290 витков. Наводимая в катушке переменной индукцией ЭДС измерялась электронным милливольтметром ВЗ-38.

Процедура измерения проницаемости тела в простейшем случае сводится к измерениям ЭДС в приемной катушке с размещенным в ней стержнем

и без него. Отношение этих двух значений ЭДС и должно было бы равняться относительной проницаемости тела стержня. Однако это было бы справедливо, если бы диаметр приемной катушки в точности равнялся диаметру обследуемого ферромагнитного стержня [4]. В нашем случае это не так: средний диаметр приемной (измерительной) катушки в 1,75 раза больше диаметра стержня. Рассмотрим действующие при этом соотношения.

Рассмотрим ферромагнитный стержень радиусом r_0 , намагничиваемый вдоль оси первоначально однородным магнитным полем напряженностью H_0 . Стержень охвачен круговой измерительной катушкой средним радиусом r_m .

Если бы стержень отсутствовал, то поток индукции намагничивающего поля через катушку

$$\Phi_m = \mu_0 \pi r_m^2 H_0. \quad (6)$$

При этом поток через сечение катушки, которое будет впоследствии занято ферромагнитным телом,

$$\Phi_{0m} = \mu_0 \pi r_0^2 H_0 \quad (7)$$

или

$$\Phi_{0m} = \Phi_m \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^2. \quad (8)$$

При наличии ферромагнитного тела поток индукции через катушку

$$\begin{aligned} \Phi_{mf} &= \Phi_m + \Phi_{0m} \mu_T = \\ &= \Phi_m + \Phi_m \mu_T \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^2 = \Phi_m \left(1 + \mu_T \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Отношение потока через катушку при наличии ферромагнитного тела к потоку в его отсутствие

$$\frac{\Phi_{mf}}{\Phi_m} = 1 + \mu_T \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^2, \quad (10)$$

и тогда относительная магнитная проницаемость тела

$$\mu_T = \left(\frac{\Phi_{mf}}{\Phi_m} - 1 \right) \left(\frac{r_m}{r_0} \right)^2. \quad (11)$$

В нашем случае $r_m / r_0 = 1,75$, а $(r_m / r_0)^2 = 3,06$. Это значит, что без учета соотношения (11) можно ошибаться в определении проницаемости более чем в 3 раза.

Измерения, выполненные с учетом (11), показали, что баллистическая проницаемость тела ферритового стержня $\mu_T = 102$. Амплитуда внешнего намагничивающего поля при измерениях равнялась 20 А/м, что соответствует начальному участку кривой намагничивания ферритового стержня.

Используя известную связь между проницаемостью тела, вещества и размагничивающим фактором [2]

$$\mu_T = \frac{\mu}{N \left(\mu + \frac{1}{N} - 1 \right)} \quad (12)$$

и учитывая, что $N_B = 0,0066$, находим $\mu = 318$.

Сравнив измеренное значение проницаемости материала феррита с его номинальным значением, убеждаемся, что фактическая проницаемость материала на 20 % меньше заявленной, что вероятно вполне допустимо. Именно это значение проницаемости феррита и будем использовать при дальнейших расчетах.

Измерения проницаемости при локальном намагничивании. Измеряем баллистическую проницаемость стержня при его локальном намагничивании. На рис. 2 показана схема эксперимента.

В данном случае ферритовый стержень намагничивается пропусканием переменного тока частотой 2 кГц через две симметрично размещенные одинаковые намагничивающие катушки, включенные последовательно – согласно. Катушки длиной 20 мм, внутренним диаметром 22 мм, внешним 38 мм содержат по 7400 витков. Амплитуда напряженности поля в центре такой катушки составляла 160 А/м. Расстояние между центрами катушек x варьировалось в ходе эксперимента. Индукция поля в средней части стержня измерялась с помощью описанной приемной катушки.

Баллистическая (центральная) проницаемость намагничиваемого таким образом стержня измерялась и вычислялась так же, как и при намагничивании однородным полем. На рис. 3 приведены результаты эксперимента.

При компьютерном моделировании диаметр виртуальной измерительной катушки был принят точно равным диаметру ферритового стержня, а длина ее пренебрежимо мала. Этим, по-видимому, и объясняется существенное (до 2 раз) расхождение результатов моделирования и эксперимента при малых расстояниях между намагничивающими катушками. При расположении намагничивающих катушек в непосредственной близости от приемной катушки потоки индукции, действующие на нее, резко неоднородны, вследствие чего выражение (11) неприменимо. При возрастании x соответствие

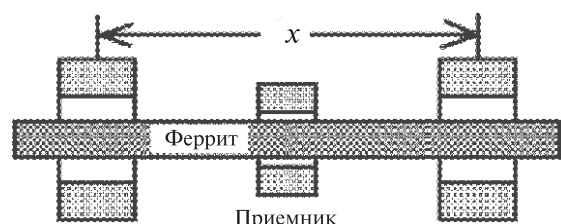


Рис. 2. Схема опыта по локальному намагничиванию ферритового стержня

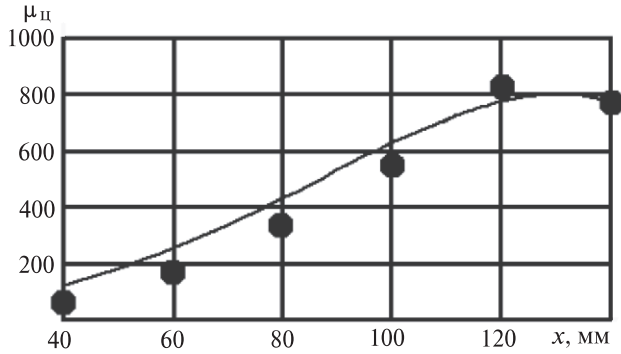


Рис. 3. Зависимость проницаемости тела стержня в центральном сечении от расстояния между намагничивающими катушками (по горизонтали – расстояние между центрами намагничивающих катушек, мм; по вертикали – относительная проницаемость тела стержня в центральном сечении); ● – эксперимент; — — численное моделирование в программе ELCUT [5]

результатов моделирования и эксперимента вполне удовлетворительное. Именно при больших x и проявляется необычное «поведение» проницаемости тела в центральном сечении. Она становится в несколько раз (более пяти) больше проницаемости формы, вычисляемой по классическим формулам. Если учесть, что проницаемость материала $\mu = 318$ и не может заметно возрасти от намагничивания слабым полем (в особенности при больших значениях x), то аномально высокие значения $\mu_{ц}$ могут быть объяснены только если предположить, что коэффициент размагничивания N_B имеет отрицательное значение, т.е. претерпел инверсию.

Используя выражение (12), нетрудно (при известных μ и μ_T) вычислить баллистический размагничивающий коэффициент:

$$N_B = \frac{\mu - \mu_T}{\mu_T(\mu - 1)}. \quad (13)$$

На рис. 4 приведен вычисленный по (13) график зависимости коэффициента N_B от расстояния x между намагничивающими катушками.

Из рис. 4 видно, что при локальном намагничивании стержня его центральный размагничивающий коэффициент не только существенно зависит от расстояния между намагничивающими катушками, но и, начиная с некоторого его значения, становится меньше нуля. При этом результаты реального и виртуального (расчетного) экспериментов становятся близки.

Очевидно, что в этом случае понятие проницаемости формы как величины обратной размагничивающему коэффициенту теряет физический смысл, поскольку она испытывает скачок от плюс бесконечности до минус бесконечности (разрыв) без веских на то оснований. Да и сам размагничивающий коэффициент становится виртуальным, не подпадающим под классическое определение.

Возможное объяснение явления. Для выяснения причин аномального поведения размагничивающе-

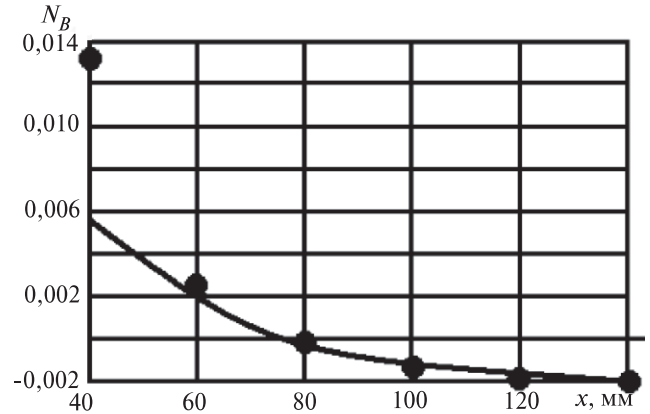


Рис. 4. Зависимость баллистического размагничивающего коэффициента стержня от расстояния между намагничивающими катушками (по горизонтали – расстояние между центрами намагничивающих катушек, мм; по вертикали – баллистический размагничивающий коэффициент); ● – эксперимент; — — численное моделирование

го фактора обратимся к рис. 5, где изображен ферромагнитный стержень с двумя одинаковыми витками с током, отстоящими друг от друга на расстоянии x .

В случае отсутствия ферромагнитного стержня витки создают в центре системы индукцию магнитного поля [6]:

$$B_0 = \frac{\mu_0 r^2 I}{(r^2 + 0,25x^2)^{1,5}}, \quad (14)$$

где I – ток в витке; r – радиус витка.

При появлении ферромагнитного стержня в нем образуются магнитные виртуальные заряды m_1, m_2, m_3, m_4 (южный и северный полюсы), равные между собой по абсолютному значению. На рис. 5 они для простоты изображены расположенными на оси стержня, хотя на самом деле находятся на его поверхности в виде колец. При указанной на рис. 5 полярности токов в витках намагничивающее поле направлено слева направо. В таком случае магнитные силовые линии входят в заряды m_1 и m_3 и выходят из зарядов m_2 и m_4 . По этой причине в ферромагнитном стержне (в центральной части) поле зарядов m_2 и m_3 усиливает поле намагничивающих витков, а поле зарядов m_1 и m_4 его ослабляет.

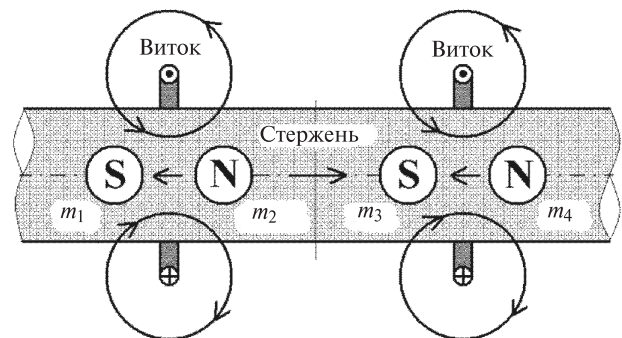


Рис. 5. Схема расположения фиктивных магнитных зарядов при локальном намагничивании

Если принять, что заряды (полюсы) отстоят от плоскости создавшего их витка на расстоянии a (по абсолютному значению), то нетрудно показать, что создаваемая ими индукция в центре системы будет:

$$B_{\text{зар}} = \mu_0 \mu \frac{m}{2\pi} \left(\frac{1}{(x-a)^2} - \frac{1}{(x+a)^2} \right). \quad (15)$$

Здесь $m = |m_1| = |m_2| = |m_3| = |m_4|$.

Поскольку рассматривается линейный случай, то окончательно индукция в центральном сечении

$$B_{\text{стер}} = \mu_0 \mu \frac{m}{2\pi} \left(\frac{1}{(x-a)^2} - \frac{1}{(x+a)^2} \right) + \mu_0 \mu \frac{r^2 I}{(r^2 + 0,25x^2)^{2,5}}. \quad (16)$$

В данном случае важны не абсолютные значения $B_{\text{стер}}$ и B_0 , а лишь изменение их отношения с изменением расстояния между намагничивающими витками, т.е. $\mu_T(x)$.

На рис. 6 приведен рассчитанный по (14) и (16) график, характеризующий ход функции $\mu_T(x)$ (расчет выполнен для $r = 15$ мм и $a = 10$ мм); по горизонтали – расстояние между намагничивающими витками, по вертикали – проницаемость тела в центральном сечении, деленная на нормирующий коэффициент α .

Из рис. 6 видно, что при увеличении расстояния между намагничивающими контурами проницаемость тела ферромагнитного стержня растет. Происходит это потому, что поле, создаваемое витками при отсутствии ферромагнитного стержня, убывает с расстоянием между ними быстрее, чем подмагничивающее поле виртуальных полюсов (созданных этими же витками) при наличии стержня.

Автору статьи не удалось найти в известной ему литературе указаний на существование инверсии размагничивающего коэффициента в слабых полях. В [7] теоретически исследовалась взаимная индукция между витками, находящимися на ферромагнитном сердечнике. Возможно, что, используя результаты выполненных в ней выкладок, внимательному исследователю удалось бы обнаружить аномальное поведение взаимной индукции. Однако выведенные в ней и дополненные в [8] аналитические зависимости оказались столь сложными, что даже авторы исследования [9], выполненного тридцать лет спустя, были вынуждены применять численное моделирование, чтобы получить реальные картины распределения магнитной индукции вдоль ферромагнитного стержня, намагничиваемого локальной катушкой.

В [4, 10, 11] было отмечено образование в ферромагнитном стержне магнитных полюсов за края

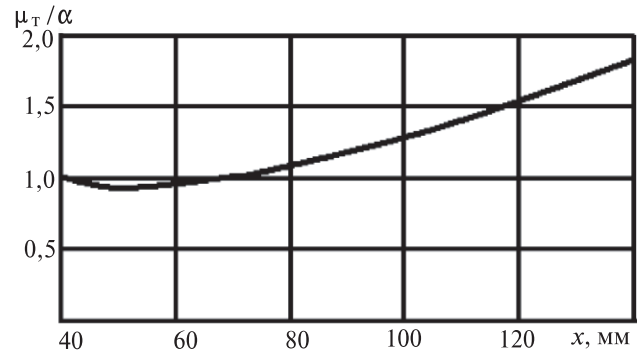


Рис. 6. Расчетная зависимость проницаемости тела в центральном сечении от расстояния между намагничивающими катушками (по горизонтали – расстояние между центрами намагничивающих катушек, мм; по вертикали – расчетная проницаемость тела в центральном сечении (нормированное значение))

ми локальных намагничивающих катушек, но там внимание исследователей было сосредоточено на поле внутри части стержня, охваченной намагничивающей катушкой, где инверсии размагничивающего коэффициента не происходит.

Следует отметить, что существование подмагничивающего поля полюсов, обусловленного локальным намагничиванием, было предсказано и объяснено еще известным магнитологом профессором Р.И. Янусом [13]. Однако там (и в его последующих трудах) вопрос о размагничивающем коэффициенте не затрагивался. Наиболее близким к обнаружению инверсии коэффициента размагничивания было исследование [12], когда в ходе вычислительного эксперимента было обращено внимание на усиление (вместо ослабления) магнитного поля локального источника при прохождении через стенку ферромагнитной трубы. Однако соответствующих выводов в [12] сделано не было.

Таким образом, имеются основания для утверждения, что в статье впервые сообщается об экспериментальном обнаружении инверсии виртуального размагничивающего коэффициента ферромагнитного стержня, локально намагничиваемого слабым полем.

Заключение. Явление инверсии виртуального коэффициента размагничивания ферромагнитного стержня при его локальном намагничивании слабыми полями обусловлено подмагничивающим действием магнитных полюсов, образующихся на поверхности стержня вблизи концов локальных намагничивающих катушек.

При локальном намагничивании понятие проницаемости формы как величины, обратной размагничивающему коэффициенту (как и само понятие размагничивающего коэффициента в его классическом понимании), теряет физический смысл, поскольку она испытывает скачок от плюс бесконечности до минус бесконечности (разрыв).

Полученные результаты могут быть полезны для понимания процессов локального намагничивания

ферромагнитных изделий, а также для практического применения в магнитных измерениях и при контроле произведенных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 1. — М.: НКТП, 1934.
2. Чечерников В.И. Магнитные измерения. — М.: Изд-во Московского государственного университета, 1963, 285 с.
3. Захаров В.А., Ульянов А.И., Чулкина А.А. Коэффициент размагничивания ферромагнитных стержней при намагничивании. — Электричество, 2001, № 10, с. 61—67.
4. Попов Г.Н., Зацепин Н.Н. Комплексная магнитная проницаемость участков протяженных стальных стержней. — Изв. АН БССР, сер. физ.-тех. наук, 1981, № 2, с. 112—116.
5. Реутов Ю.Я., Гобов Ю.Л., Лоскутов В.Е. О возможностях использования программы ELCUT в расчетах по дефектоскопии. — Дефектоскопия, 2002, № 6, с. 34—40.
6. Яновский Б.М. Земной магнетизм. — М.: ГИТТЛ, 1953, 591 с.
7. Лебедев Н.Н. Коэффициент взаимной индукции между витками, надетыми на круглый сердечник с магнитной проницаемостью μ . — ЖТФ, 1936, т. VI, вып. 3, с. 530—536.
8. Лившиц Н.А. — Труды Военной Краснознаменной Академии связи, 1947, № 16, с. 35.

9. Попов Э.И., Янус Р.И. О намагничивании длинных цилиндров короткой катушкой. — Труды ИФМ АН СССР (Свердловск), 1965, вып. 24, с. 140—143.

10. Попов Г.М., Зацепин Н.Н. Влияние длины намагничивающих катушек на динамическую и статическую магнитные проницаемости протяженных ферромагнитных стержней. — Изв. АН БССР, сер. физ.-тех. наук, 1985, № 2, с. 90—95.

11. Попов Г.М. Закономерность изменения магнитной проницаемости цилиндрических стержней в неоднородном поле катушек произвольной длины. — Дефектоскопия, 1992, № 4, с. 81—88.

12. Реутов Ю.Я., Лоскутов В.Е. Проникновение магнитного поля маркера, расположенного внутри газопровода через стенку стальной трубы. — Дефектоскопия, 2007, № 11, с. 15—22.

13. Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. — М.; Л.: ОГИЗ ГИТТЛ, 1946, 172 с.

[09.09.14]

Автор: Реутов Юрий Яковлевич окончил Уральский государственный университет в 1962 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию, посвященную разработке научных основ конструирования индукционных устройств селективного обнаружения оружия. Ведущий научный сотрудник Института физики металлов Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург).

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 12, pp. 44–49.

Inversion Virtual Demagnetization Factor at Local Magnetization

REUTOV Yurii Yakovlevich (*Institute of Metal Physics, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*) — *Leading scientific researcher*

The change of a mark (inversion) of central factor of demagnetization ferromagnetic rod, locally magnetization by two short coils on an initial site of a curve of magnetization is experimentally revealed. Earlier similar phenomenon was revealed by other authors at magnetization of steel cores in the field of saturation. Result of numerical modeling in the program Elcut and experiments with ferrite cores, magnetization by a variable field by frequency 2 kHz by means of pair of local coils. For ferrite use of such frequency is equivalent to magnetization by a constant field. At some distance between magnetization by coils, due to such inversion, the permeability of a core in the central section essentially has exceeded both initial permeability of his(its) material, and his(its) permeability of the form. The specified phenomenon is explained by influence of a magnetization field of fictitious magnetic charges formed in a core at local magnetization and discussed R.I. Yanus in 1946. The field of these charges decreases with distance much more poorly, than the field of a source of a non-uniform field, as causes the discussed phenomenon. The received results can be useful to understanding of processes of magnetization ferromagnetics by a non-uniform field.

Key words: *ferrite core, reception coil, magnetic charges, local magnetization, demagnetization factor*

REFERENCES

1. Arkad'yev V.K. *Elektromagnitnye protsessy v metallakh. Ch. 1.* (Electromagnetic processes in metals). Moscow, Publ. NKTP, 1934.
2. Chechernikov V.I. *Magnitnye izmereniya* (Magnetic measurements). Moscow, Publ. Moscow State University, 1963, 285 p.
3. Zakharov V.A., Ul'yanov A.I., Chulkina A.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2001, pp. 61—67.
4. Popov G.N., Zatsepin N.N. *Izvestiya AN BSSR, Ser. Fiziko-tehnicheskikh nauk (News of BSSR. Ser. Physical and Technical Sciences)*, 1981, No. 2, pp. 112—116.
5. Reutov Yu.Ya., Gobov Yu.L., Loskutov V.Ye. *Defektoskopiya — in Russ. (Flaw Detection)*, 2002, No. 6, pp. 34—40.
6. Yanovskii B.M. *Zemnoi magnetizm* (Terrestrial magnetism). Moscow, Publ. GITTL, 1953, 591 p.
7. Lebedev N.N. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki — in Russ. (Journal of Technical Physics)*, 1936, vol. VI, iss. 3, pp. 530—536.

8. Livshits N.A. *Trudy Voennoi Krasnoznamennoi Akademii svyazi — in Russ. (Proc. of the Red Banner Military Academy of Communications)*, 1947, No. 16, p. 35.

9. Popov E.I., Yanus R.I. *Trudy IFM AN SSSR — in Russ. (Proc. Institute of Physics of Metals of the USSR Academy of Sciences)* (Sverdlovsk, 1965, iss. 24, pp. 140—143.

10. Popov G.M., Zatsepin N.N. *Izvestiya AN BSSR, Ser. fiz.-tehn. nauk — in Russ. (News Academy of sciences of BSSR, ser. of phys.-techn. sciences)*, 1985, No. 2, pp. 90—95.

11. Popov G.M. *Defektoskopiya — in Russ. (Fault Detection)*, 1992, No. 4, pp. 81—88.

12. Reutov Yu.Ya., Loskutov V.E. *Defektoskopiya — Russ. (Fault Detection)*, 2007, No. 11, pp. 15—22.

13. Yanus R.I. *Magnitnaya defektoskopiya* (Magnetic fault detection). Moscow, Leningrad, OGIz; GITTL, 1946, 172 p.