

УДК 621.314:621.318

Е.В. Калинин

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В АНИЗОТРОПНОМ ШИХТОВАННОМ СЕРДЕЧНИКЕ.**Ч. 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧИВАНИЯ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Известна необходимость в проведении сравнительного анализа результатов расчета магнитного поля при использовании векторных характеристик намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей с данными экспериментального определения распределения вектора магнитной индукции \mathbf{B} в анизотропном шихтованном сердечнике.

Методология: Для сталей 3413 и 2412 с одинаковым химическим составом, но существенно отличающимися доменной структурой и анизотропией магнитных свойств проведен цикл совместных магнитных измерений полосовых образцов и кольцевых шихтованных сердечников с отношением радиусов $r=2,1$. На частотах $f=50$ и 400 Гц получены экспериментальные зависимости амплитуды индукции $B_m(\rho)$ от радиальной координаты ρ кольцевых сердечников при различных значениях средней по сечению индукции B_m в двух угловых положениях, совпадающих с осями магнитной анизотропии $\alpha=0$ и 90° . Для обеих марок сталей на частоте $f=50$ Гц экспериментально определены угловые характеристики магнитной анизотропии $\psi(B_m, \alpha)$.

Результаты: Описана методика эксклюзивного подхода к экспериментам, позволяющая без нарушения целостности шихтованного сердечника производить локальные магнитные измерения.

Значение исследования: Хорошее согласие результатов расчета и эксперимента при различных значениях степени магнитной анизотропии K сталей доказывает правильность выбранной концепции используемых векторных характеристик магнитной анизотропии.

Новизна/ценность: Получено экспериментальное подтверждение особенностей перераспределения магнитного поля в анизотропном шихтованном сердечнике в ненасыщенных режимах, связанных с величинами степени анизотропии $K(f)$, пространственного угла $\psi(\mathbf{B})$ между векторами магнитного поля \mathbf{B} и \mathbf{H} , а также коэрцитивной силы используемой стали $H_c(f)$.

Ключевые слова: векторные характеристики намагничивания, холоднокатаные электротехнические стали, кольцевой анизотропный сердечник, локальные измерения, магнитная индукция, сравнение эксперимента с расчетом.

Свойственная холоднокатаным электротехническим сталям магнитная анизотропия характеризуется наличием пространственного угла ψ между векторами индукции \mathbf{B} и напряженности \mathbf{H} магнитного поля в плоскости прокатки, кроме намагничивания вдоль осей анизотропии, где $\psi=0$. В отечественной и зарубежной справочной литературе [1-5] в качестве характеристик намагничивания анизотропных сталей приводятся амплитудные зависимости $H_{ам}(B_m, \alpha)$, полученные на полосовых испытательных образцах при согласованном способе шихтовки в аппарате Эпштейна. При этом $H_{ам}$ – проекция вектора \mathbf{H}_m на направление вырубки α , кроме направлений $\alpha=0$, $\alpha=90^\circ$ (и $\alpha=55^\circ$ - при насыщении). Неполнота таких характеристик очевидна, однако получение более полной информации для анизотропных сталей ГОСТом [6] не предусматривается.

Нами опубликованы материалы по экспериментальному определению векторных характеристик намагничивания (ВХН) текстурованной стали 3413 в виде семейств $H_{ам}(B_m, \alpha)$ и $\psi(B_m, \alpha)$ [7], их математическому описанию [8, 9] и использованию при расчетах магнитного поля шихтованного анизотропного сердечника кольцевой формы в функции насыщения и отношения радиусов r [10-12]. Показано принципиальное отличие распределения магнитной индукции \mathbf{B} анизотропного сердечника от изотропного при учете угловых зависимостей $\psi(B_m, \alpha)$. Установлено, что использование в качестве характеристик анизотропного материала семейства справочных (скалярных) кривых намагничивания $H_{ам}(B_m, \alpha)$ [1-5], то есть с

принятием дополнительного условия $\psi(B_m, \alpha) = 0$, приводит к такому же распределению вектора \mathbf{B} в кольцевом сердечнике, как и при отсутствии магнитной анизотропии.

Результаты исследований апробированы и подтверждены актами внедрения Всесоюзного проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ВИТ) (г. Запорожье), Всесоюзного проектно-конструкторского и технологического института электромашиностроения (ВНИПТИЭМ) (г. Владимир), Института электродинамики АН УССР (ИЭД) (г. Киев). При этом экспертами высказывались пожелания об экспериментальном подтверждении результатов моделирования. Необходимость экспериментальной проверки результатов расчета магнитного поля анизотропного шихтованного сердечника с учетом ВХН обусловлена и разным пониманием характеристик магнитной анизотропии [8, 9, 14-20].

Так, в работе [16] измерения характеристик произведены при несогласованной шихтовке полосовых образцов в пакет с ошибочным предположением, что при этом вектор \mathbf{H} будет совпадать с направлениями вырубki полосовых образцов. В [15] приводятся ВХН для стали марки М6 в статике ($f=0$). В то же время в [8, 9] показано, что степень анизотропии магнитных свойств K холоднокатаных сталей, равная отношению максимальных магнитных проницаемостей по осям анизотропии материала

$$K = \mu_{\max} / \mu_{\min}, \quad (1)$$

зависит от частоты перемагничивания f . Поэтому при расчетах рекомендуется применять ВХН, полученные при соответствующей f . В публикациях [17, 18] при расчетах фактически использовано семейство скалярных кривых намагничивания текстурованной стали.

Авторами более поздних работ [19, 20] остались непонятыми результаты наших исследований по анализу, математическому описанию ВХН, обобщению их для других холоднокатаных сталей [8, 9] и не замечены выводы по экспериментальному определению распределения индукции в кольцевом анизотропном сердечнике [13]. В отмеченных работах вместо реальных ВХН используется векторная модель намагничивания $\mathbf{H}(\mathbf{B})$ на основе введения потенциальной функции $F(\mathbf{B})$. Приведенные результаты моделирования, представленные семействами характеристик намагничивания для сталей марок 3405 и Э320, не соответствуют действительности и противоречат экспериментальным данным [7-9, 14, 15]. Как следствие, в [19] для случая линейной анизотропии с отношениями проницаемостей по осям $K=10$ делаются выводы о незначительном влиянии анизотропии на распределение \mathbf{B} в кольцевом образце с отношением радиусов $r = 1,67$. Выводы противоречат нашим результатам [8, 10, 12], где при меньших значениях $r = 1,4$ и степени анизотропии $K=7$ наблюдается существенное перераспределение индукции \mathbf{B} .

В связи с неоднозначностью подходов к определению ВХН, а также противоречивостью выводов разных авторов о результатах их использования при расчетах появляется потребность в подробном описании экспериментальных исследований, отдельные результаты которых представлены в [13].

При проведении экспериментов приняты следующие рекомендации.

1. Для определения фактического характера распределения \mathbf{B}_m предложено использовать анизотропный шихтованный сердечник кольцевой формы с тем, чтобы обеспечить:

- равномерное намагничивание по периметру;
- минимум влияющих геометрических и технологических факторов;
- удобство при расчетах магнитного поля в полярных координатах (ρ, φ).

По результатам таких расчетов [10, 11] ранее установлено, что кольцевой анизотропный сердечник имеет наибольшие аномалии распределения магнитного поля вдоль радиальной координаты ρ в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° , соответствующих осям анизотропии материала $\alpha=0$ и 90° , где направления векторов магнитного поля совпадают, при этом $\mathbf{B} = B_\varphi$, $\mathbf{H} = H_\varphi$ [11]. Указанные угловые положения φ и рекомендованы для проведения измерений.

2. Для определения зависимостей $B_m(\rho)$ по радиальной координате в интервале радиусов $\rho \in [R_n; R_v]$ (где R_n , R_v - наружный и внутренний радиусы) требуется проведение локальных измерений. Сверление отверстий в исследуемых зонах сердечника для размещения локальных измерительных обмоток индукции недопустимо, так как приведет к искажению исходной картины магнитного поля.

В [21] предложен метод, основанный на измерении локальным индукционным датчиком-зондом тангенциальной составляющей напряженности H_t в воздухе на поверхности пластин сердечника в разных точках с учетом принципа непрерывности этой составляющей на границе сталь - воздух.

Суть метода состоит в определении значений $B_{fm}(\rho)$ по измеренным $H_{fm}(\rho)$ с использованием достоверных экспериментальных характеристик $H_m(B_m)$ стали, из которой изготовлен испытуемый сердечник, для угловых положений $\alpha = 0$ и 90° . Для получения указанных характеристик проводятся дополнительные экспериментальные исследования на вырубленных под различными углами к прокатке пакетов стандартных полосовых испытательных образцов [14, 15] или на специальных кольцевых образцах по методике [22, 23].

В нашем эксперименте шихтованный кольцевой сердечник для повышения качества измерений H_{fm} разделён на два полупакета с воздушным промежутком для размещения датчика-зонда. В угловых положениях $\varphi = 0$ и 90° для доступа к боковой поверхности предусмотрены радиальные каналы, поперечные размеры которых допускают свободное перемещение датчика- зонда вдоль радиальной координаты ρ , а сам датчик сориентирован так, что $H_{tm} = H_{fm}$. Шихтовка отдельных пластин сердечника осуществлена согласованным способом, чтобы направления прокатки соседних колец пакета совпадали.

3. Расчет магнитного поля сердечника с целью сопоставления результатов с экспериментом также требует достоверные ВХН материала кольцевого сердечника. Поэтому совместно с кольцевым сердечником из одного и того же рулона холоднокатаной стали изготовлены и подвергнуты восстановительному отжигу пакеты полосовых образцов для различных угловых положений вырубки $\alpha \in [0; 90^\circ]$ к направлению прокатки.

4. Выбраны холоднокатаные электротехнические стали с разными уровнями анизотропии. С ними произведен полный цикл запланированных экспериментальных исследований в расширенном частотном диапазоне f (для более полной информации), а измерения выполнены на высоком метрологическом уровне.

Исследования проводились в лаборатории физических методов испытаний (ФМИ) Центральной заводской лаборатории Верх-Исетского металлургического завода (ВИЗ) на комплекте магнитно-измерительной аппаратуры производства Японии под руководством старшего инженера лаборатории Малыгина М.А. В процессе подготовки были отобраны две марки холоднокатаной стали с одинаковым химическим составом, но с разной технологией прокатки: текстурованная трансформаторная сталь с полосовой доменной структурой марки 3413 толщиной $d=0,35$ мм и динамная сталь с мелкой доменной структурой марки 2412 толщиной $d=0,5$ мм. Из одного отрезка рулона каждой марки стали нарублены пакеты стандартных полосовых образцов 280×30 мм в шести угловых положениях к направлению прокатки ($\alpha = 0; 20^\circ; 30^\circ; 55^\circ; 75^\circ; 90^\circ$) и изготовлены пакеты кольцевых образцов с наружным диаметром $D_n=231,2$ мм и внутренним - $D_v=110$ мм (то есть с отношением радиусов $r = D_n/D_v = 2,1$). В соответствии с требованиями ГОСТ [6] и условиями эксперимента, все изготовленные образцы подверглись совместному восстановительному отжигу в проходной печи. Кольцевые пакеты обеих марок сталей выполнены с воздушным промежутком по середине размером 2,5 мм и двумя радиальными каналами в требуемых угловых положениях с шириной 20 мм, в соответствии с габаритными размерами датчика - зонда. Сам датчик H_f с поперечными размерами 10×10 мм, числом витков $W_h = 2500$ на частоте $f = 50$ Гц имел коэффициент напряженности магнитного поля $Kh = 191$ [A/(м·мВ)], заранее установленный путем тарирования в эталонном магнитном поле. Амплитуда напряженности магнитного поля

$H_m = H_{\text{фм}}$ в точке измерения связана при этом со средним значением э.д.с. $E_{\text{ср}}$ датчика, измеренной в [мВ], равенством $H_{\text{фм}} = K_h \cdot E_{\text{ср}}$ [А/м].

Кольцевые пакеты, уложенные согласованным способом шихтовки, для исключения влияния механических напряжений от стягивающих усилий собраны путем фиксации между собой соседних пластин в нескольких точках клеем «Момент». Массы кольцевых сердечников из сталей 3413 и 2412 с $r=2,1$ равны $m = 674$ и 719 г при соответствующих числах пластин $N = 8$ и 6 . При этом ограничение по массе стали пакетов до 1000 г связано с требованиями по синусоидальности питающего напряжения источника Т-1000 измерительного комплекта. После изоляции пакетов снаружи электротехническим картоном на сердечники равномерно по периметру намотаны измерительная и намагничивающая обмотки с одинаковыми числами витков W и $W_n = 100$. На сердечнике из текстурованной стали 3413 в угловых положениях $\varphi = 0; 55^\circ$ и 90° дополнительно размещены три локальные по угловой координате измерительные обмотки для контроля амплитуды средней по сечению магнитной индукции $B_{\text{мс}}$ с одинаковым числом витков $W_{\text{л}}=10$.

На рис. 1 представлен кольцевой шихтованный сердечник из стали 3413 с двумя радиальными каналами и всеми обмотками, подготовленный для проведения измерений.

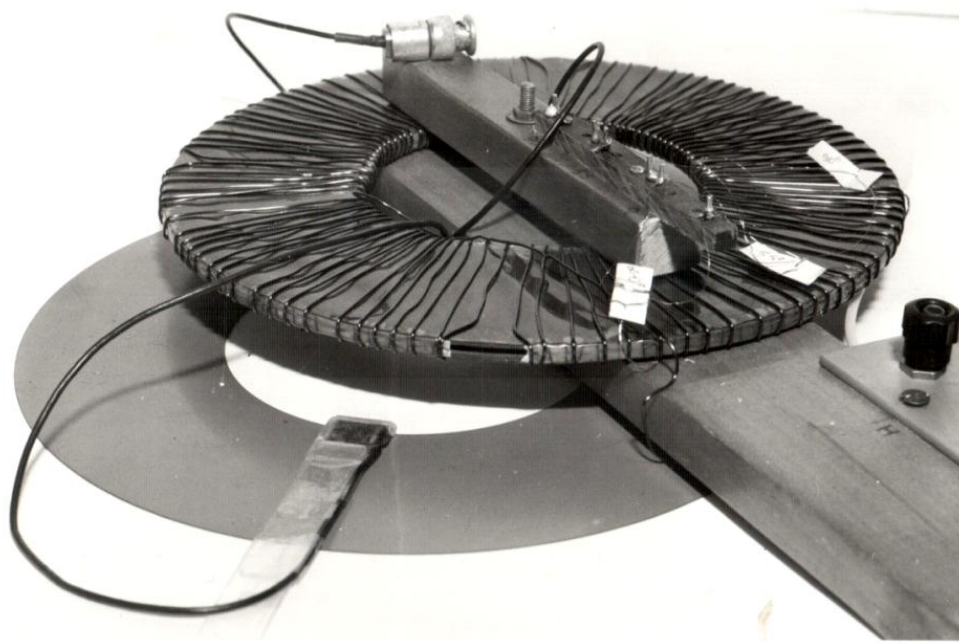


Рис. 1. Кольцевой шихтованный сердечник из стали 3413 с отношением радиусов $r=2,1$ (внизу отдельная кольцевая пластина сердечника и датчик-зонд в положении для локальных измерений в точке -1, ближайшей к внутреннему радиусу)

При частоте $f=50$ Гц на установке ESS-2S с двухобмоточным аппаратом Эпштейна на пакетах полосовых образцов, уложенных согласованно, для различных углов α измерены составляющие напряженности магнитного поля $H_{\text{ам}}$ и $H_{\text{нм}}$ при фиксированных значениях B_m . Каждый пакет также делился на два полупакета и между ними в свободных от обмоток ярямах сердечника размещались локальные индукционные датчики напряженности магнитного поля. По измеренным зависимостям составляющих $H_{\text{нм}}(B_m, \alpha)$ и $H_{\text{ам}}(B_m, \alpha)$ и формуле $\psi = \arctg(H_{\text{нм}}/H_{\text{ам}})$ рассчитаны значения ψ в точках измерения B_m при различных α . На рис. 2, а, б сплошными линиями представлены зависимости $\psi(\alpha)$ при различных $B_m = \text{const}$ и $\psi(B_m)$ при различных $\alpha = \text{const}$ сталей 3413 и 2412, согласующиеся с результатами [8, 9]. В угловых положениях $\alpha=0$ и 90° , являющихся осями магнитной анизотропии, вектора \mathbf{B} и \mathbf{H} совпадают по направлению и угол $\psi(B_m)=0$.

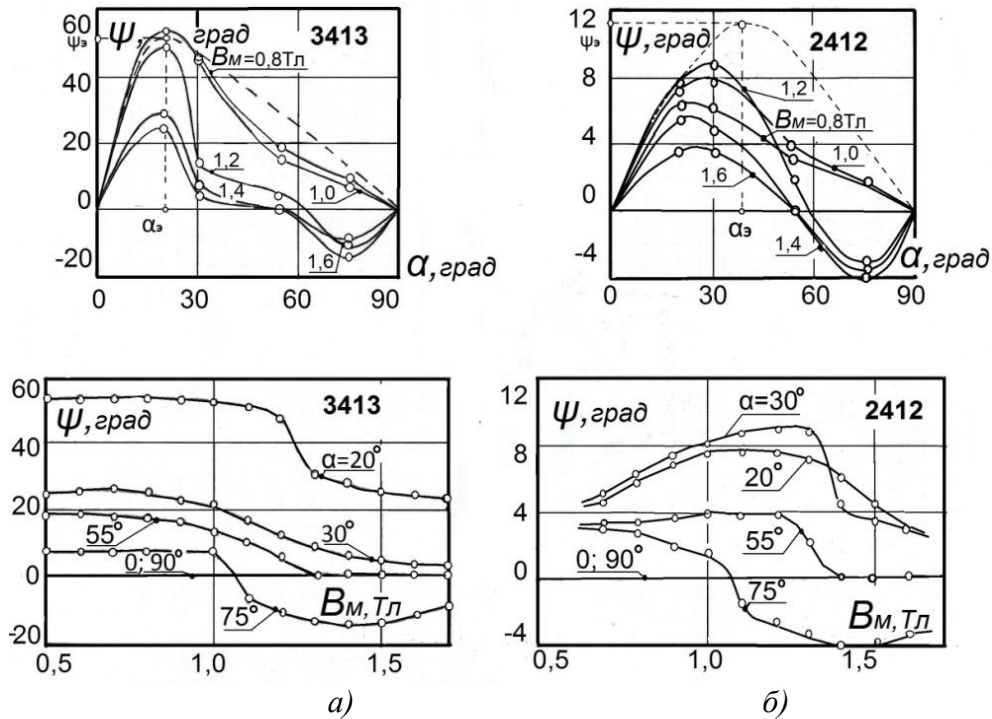


Рис. 2. Угловые характеристики магнитной анизотропии сталей 3413 – (а) и 2412 – (б):
 — экспериментальные зависимости $\psi(\alpha)$ при $B_m = (0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6)$ Тл
 и зависимости $\psi(B_m)$ при $\alpha = (0; 20^\circ; 30^\circ; 55^\circ; 75^\circ; 90^\circ)$ и расчетные для линейной анизотропии,
 - - - - - для $B_m = 0,8$ Тл

Как отмечено [8, 9], угловые характеристики являются универсальными для сравнения магнитной анизотропии различных текстурованных сталей, нахождения и обобщения закономерностей. Кривые $\psi(B_m)$ при различных $\alpha = \text{const}$ позволяют анализировать характер изменения угла ψ с ростом насыщения, а $\psi(\alpha)$ при различных $B_m = \text{const}$ - особенности изменения от угла α . Из рис. 2, а, б видно, что для обеих сталей угол ψ достигает наибольших значений в ненасыщенных режимах, когда магнитные свойства сталей близки к линейным.

В линейной среде с 90-градусной магнитной анизотропией для угла ψ в интервале $\alpha \in [0; 90^\circ]$ справедливо аналитическое выражение [8]

$$\Psi = \arctg(K \operatorname{tg} \alpha) - \alpha, \tag{5}$$

с экстремальным значением $\psi_{\text{э}}$ и его угловым положением $\alpha_{\text{э}}$:

$$\psi_{\text{э}} = 90^\circ - 2 \arcsin(1/\sqrt{1+K}); \quad \alpha_{\text{э}} = \arcsin(1/\sqrt{1+K}). \tag{6}$$

В части 1 работы [24] предложен способ определения K с необходимым для этого набором экспериментальных магнитных характеристик, выявлены основные причины снижения K с ростом динамики перемагничивания, произведен расчет их значений при $f=0; 50$ и 400 Гц. При рабочей для этих марок сталей частоте $f=50$ Гц: у стали 3413 $K=6,8$; у стали 2412 - $K=1,5$ (соответствующих применению в задачах магнитостатики [24]). На рис. 2, а, б на зависимостях $\psi(\alpha)$ пунктиром обозначены зависимости $\psi(\alpha)$, рассчитанные при названных значениях K по формуле (5). Для стали 3413 с большим уровнем анизотропии наблюдается их хорошее согласие с экспериментом в ненасыщенных режимах (в том числе значений $\psi_{\text{э}}=48^\circ$ и $\alpha_{\text{э}}=21^\circ$) в диапазоне углов α от 0 до $\alpha_{\text{э}}$ - слева от максимума ψ . Поведения кривых $\psi(\alpha)$ справа от максимума до $\alpha=90^\circ$ отличается от рассчитанных по (5) из-за влияния третьей оси анизотропии, хотя имеет качественно схожий характер.

У стали 2412 с минимальными значениями K и $\psi_{\text{э}}$ в ненасыщенных режимах также наблюдается сходство характера $\psi(\alpha)$ с 90-градусной магнитной анизотропией ($\psi_{\text{э}}=11,5^\circ$ и

$\alpha = 39^\circ$), но относительное влияние присутствия третьей 55-градусной оси анизотропии [8] здесь значительно выше, чем у стали 3413. В работах [8, 9] предлагается математическое описание векторных характеристик намагничивания текстурованных сталей, в основу которого заложено использование зависимостей (5), (6). Проведенный анализ результатов измерения магнитных характеристик холоднокатаных сталей 3413 и 2412 также подтверждает правомерность применения для них математического описания ВХН [8, 9].

Для обоих кольцевых сердечников на частотах $f=50$ и 400 Гц в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° в шести точках по радиальной координате ρ датчиком-зондом экспериментально определены значения амплитуды $H_{\text{ФМ}}$ в функции индукции $B_{\text{мс}}$. По кривым намагничивания $H_{\text{ам}}(B_{\text{м}})$ каждой стали, измеренным на полосовых образцах для соответствующих частоты f и углового положения вырубки α к направлению прокатки, найдены значения $B_{\text{ФМ}}$ и построены зависимости $B_{\text{ФМ}}(\rho)$ при различных $B_{\text{мс}}=\text{const}$.

На рис. 3, а представлены экспериментальные кривые распределения амплитуды магнитной индукции по радиальной координате кольцевых сердечников $B_{\text{ФМ}}(\rho)$ с отношением радиусов $r=2,1$ из стали 3413 при перемагничивании на частотах $f=50$ Гц, $K=6,8$ и $f=400$ Гц, $K=2,6$ [24] в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° , совпадающих с осями магнитной анизотропии сталей $\alpha=0$ и 90° , при $B_{\text{мс}}=(0,3; 0,5; 0,8; 1,2; 1,4)$ Тл. На рис. 3, б аналогичные зависимости для стали 2412 при $K=1,5$ и $1,2$ [24]. При верхних значениях $B_{\text{мс}}=1,2$ и $1,4$ Тл условие неизменности магнитного потока по угловой координате не выполняется, что для стали 3413 показывают результаты измерений при $f=50$ Гц по локальным обмоткам $W_{\text{л}}=10$ в угловых положениях $\varphi=0; 55^\circ$ и 90° , сведенные в табл. 1. При этом значения δB_{max} показывают относительную величину наибольшего изменения магнитного потока по угловой координате φ при различных $B_{\text{мс}}$, ср, измеренных по охватывающей обмотке $W_{\text{и}}=100$.

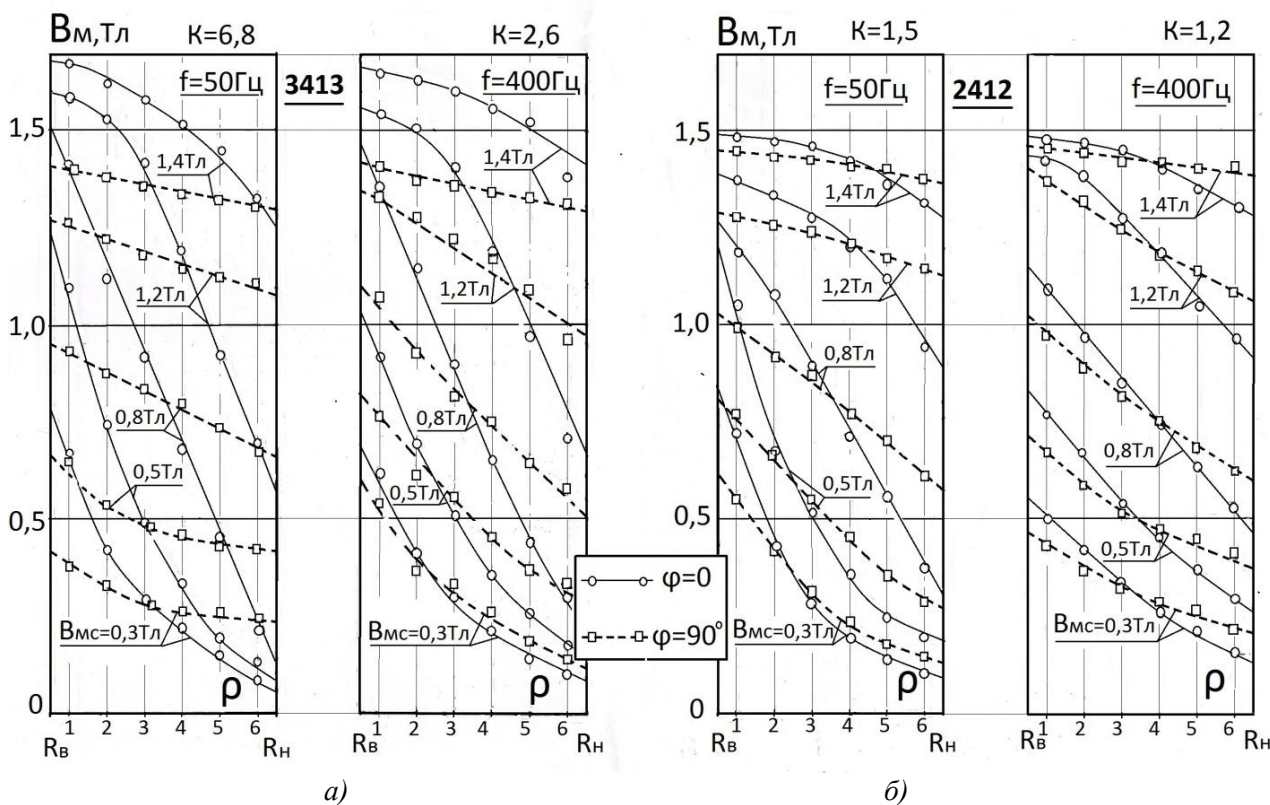


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $B_{\text{ФМ}}(\rho)$ в угловых положениях $\varphi=0; 90^\circ$ при частотах $f=50; 400$ Гц для различных значений средней по сечению магнитной индукции $B_{\text{мс}}=\text{const}$ кольцевых сердечников с отношением радиусов $r=2,1$ из стали 3413 (а) и из стали 2412 (б)

Таблица 1

Распределение средней по сечению магнитной индукции $B_{м.ср}$ в кольцевом сердечнике из стали 3413 по угловой координате ($\varphi=0; 55$ и 90)

$B_{м.ср}, \text{Тл}$	Магнитная индукция - по охватывающей обмотке $W_i=100$						
	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5
	Магнитная индукция по локальным обмоткам $W_l=10$						
$\varphi = 0$	0,303	0,503	0,802	1,003	1,209	1,458	1,606
$\varphi = 55^\circ$	0,300	0,500	0,800	1,000	1,198	1,356	1,442
$\varphi = 90^\circ$	0,298	0,498	0,797	0,998	1,196	1,386	1,453
$\delta B_{\max}, \%$	1,6	1,0	0,6	0,5	1,1	7,5	11,4

Сравнительный анализ экспериментальных зависимостей на рис. 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Магнитная анизотропия приводит к перераспределению магнитного поля в кольцевом сердечнике и тем выше, чем больше значение K . Наибольших значений эффект достигает в кольцевом сердечнике из стали 3413 на частоте $f=50$ Гц ($K=6,8$), наименьших – из стали 2412 на частоте $f=400$ Гц ($K=1,2$).

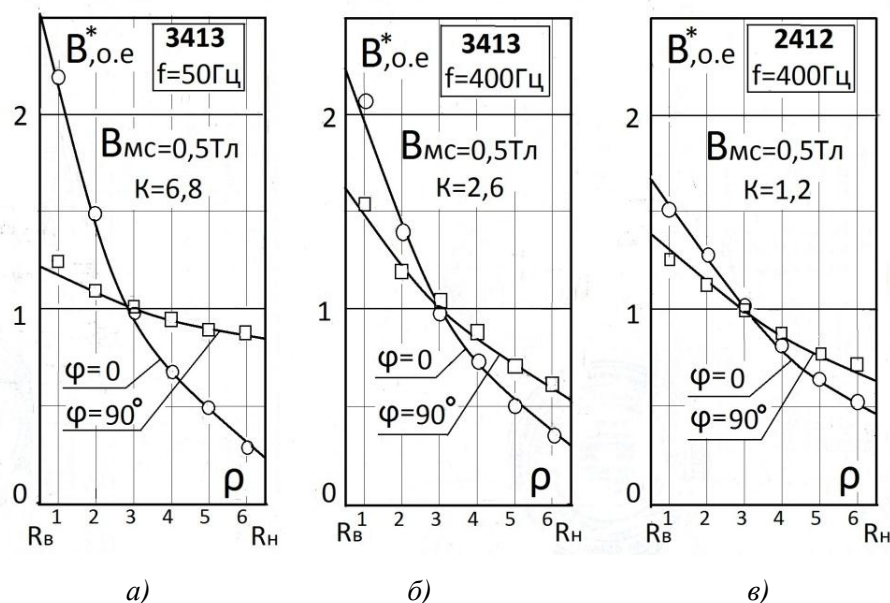


Рис. 4. Экспериментальные значения (точки) и расчетные кривые (сплошные линии) распределения по радиальной координате ρ магнитной индукции в относительных единицах $B^*_{o.e}(\rho)$ в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° кольцевых сердечников с отношением радиусов $r=2,1$ при отсутствии насыщения ($B_{м.ср}=0,5\text{Тл}$) для различных значений степени магнитной анизотропии K :
 а – 6,8; б – 2,6; в – 1,2

2. Максимальное перераспределение магнитной индукции $B_{фм}(\rho)$ наблюдается при $B_{м.ср} < 0,8$ Тл в угловом положении кольцевого сердечника $\varphi = 0$, совпадающем с направлением оси легкого намагничивания стали $\alpha=0$, минимальное - в положении $\varphi = 90^\circ$, совпадающем с направлением оси трудного намагничивания стали $\alpha=90^\circ$.

3. В режимах перемагничивания кольцевого сердечника, прилегающих на характеристиках намагничивания к области Релея ($B_{м.ср} < 0,5$ Тл), аномальное влияние магнитной анизотропии дополнительно усиливается. Особенно это проявляется у стали 2412 на $f=50$ Гц из-за большей величины коэрцитивной силы H_c , увеличивающей длину начального пологого участка кривой намагничивания [24].

4. С ростом насыщения неравномерность распределения магнитного поля $B_{\text{фм}}(\rho)$ в кольцевом сердечнике по осям $\varphi = 0$ и $\varphi = 90^\circ$ заметно снижается.

Произведено сопоставление экспериментальных данных с результатами расчётов магнитного поля в кольцевом анизотропном сердечнике путем решения плоской задачи магнитостатики [10, 11]. При этом предложена улучшенная математическая модель ВХН, основанная на описании [8, 9], с использованием экспериментальных данных сталей 3413 и 2412. Изучению особенностей распределения магнитного поля в кольцевом сердечнике при изменении основных параметров модели ВХН холоднокатаных сталей будет посвящена третья часть настоящей работы.

В качестве примера на рис. 4 приведены расчетные кривые $B_{\text{фм}}(\rho)$ для различных значений K при $B_{\text{мс}}=0,5$ Тл с максимальным перераспределением индукции в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° ; аналогичные экспериментальным зависимостям, представленным на рис. 3. Для наглядности результаты приведены к нормализованному виду (в относительных единицах) $B^*=B_{\text{фм}}/B_{\text{мс}}$. Экспериментальные значения на рис. 4 отмечены точками.

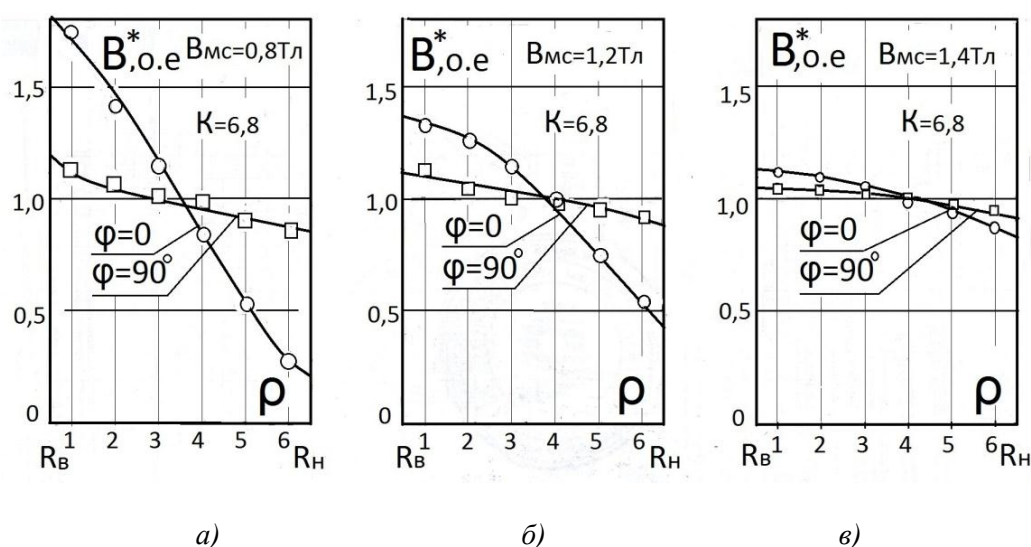


Рис. 5. Экспериментальные значения (точки) и расчетные кривые (сплошные линии) распределения по радиальной координате ρ магнитной индукции в относительных единицах $B^*_{\text{o.e.}}(\rho)$ в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° кольцевого сердечника из стали 3413 при $f=50$ Гц ($K=6,8$) для значений $B_{\text{мс}}$: а – 0,8Тл; б – 1,2Тл; в – 1,4Тл

На рис. 5 подобные сравнения расчетных и экспериментальных данных проведены в функции насыщения $B_{\text{мс}}=0,8; 1,2; 1,4$ Тл для наибольшей степени анизотропии $K=6,8$. Для $B_{\text{мс}}=1,4$ Тл экспериментальные значения B^* рассчитывались с учетом фактических величин $B_{\text{мс}}$ в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° (табл. 1).

Представленные на рис. 4, рис. 5, результаты расчетов на математической модели показывают хорошее соответствие с экспериментом, подтверждая правильность подхода к описанию ВХН по угловым характеристикам магнитной анизотропии. Как показано в первой части исследования [24], особое внимание при этом следует обращать на правильность определения степени анизотропии K и необходимость наличия достоверных экспериментальных данных на используемые холоднокатаные стали.

Библиографический список

1. Grain-oriented electrical steel. – Armco (USA). – 1957. – 57 p.
2. Cold rolled oriented electrical steel strip. – River brand. – RG-Core (Japan). – 1961. – 100 p.
3. Orient Cor. Grain-oriented electrical sheet steels. – Nippon Steel Corporation (Japan). – 1970. – 88 p.

4. Orient-Cor. HI-B. Grain-oriented electrical steel. – Nippon Steel Corporation (Japan). – 1972. – 26 p.
5. Холоднокатаные электротехнические стали: справочник / под ред. Б.В. Молотилова. – М.: Металлургия, 1989. – 168 с.
6. ГОСТ 12119.1-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.- Взамен ГОСТ 12119-80. Введ.01.07.99. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 4 с.
7. **Любивый, В.И.** Исследование характеристик магнитной анизотропии трансформаторной электротехнической стали / В.И. Любивый, Н.И. Дианова // Электрические машины: сб. научн. тр. – Чебоксары. – 1982. – С. 52–57.
8. **Любивый, В.И.** Анализ и математическое описание характеристик намагничивания анизотропных холоднокатаных электротехнических сталей / В.И. Любивый [и др.] // Электричество. – 1985. – №10. – С. 34–37.
9. **Калинин, Е.В.** Экспериментальное исследование и математическое описание векторных характеристик намагничивания анизотропных листовых электротехнических сталей // Электротехника. – 2000. – Вып. 2. – С. 27–35.
10. **Любивый, В.И.** Расчет магнитного поля в магнитно – анизотропных средах // Электромагнитные методы контроля качества материалов и изделий: тез. докл. IV Всесоюзной межвуз. конф. – Омск. – 1983. – Ч. 2. – С. 44–47.
11. **Вагапов, Ю.Ф.** Математическая модель магнитного поля в магнитно – анизотропных сталях // Актуальные проблемы электроэнергетики: тез. докл. XVIII научно-технич. конф. НГТУ. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 1999. – С. 52–64.
12. **Калинин, Е.В.** Влияние анизотропии магнитных свойств холоднокатаных электротехнических сталей на статические магнитные характеристики кольцевых образцов / Е.В. Калинин [и др.] // Электротехническая промышленность. Сер. Электротехнические материалы. – 1984. – Вып. 3. – С. 5–6.
13. **Калинин, Е.В.** Магнитное поле в кольцевом анизотропном седечнике // Электрооборудование промышленных установок: межвуз. сборн. научн. тр. – Н.Новгород. – 1998. – С. 127–132.
14. **Дружинин, В.В.**, Изучение нормальных составляющих индукции в текстурованной электротехнической стали // Физика металлов и металловедение. – 1973. – Т. 35. – Вып. – С. 973–977.
15. **Колесников, Э.В.** Экспериментальное исследование и математическое моделирование планарного перемагничивания холоднокатаной стали // Изв. вузов. Электромеханика. – 1983. – № 6. – С. 23–30.
16. **Дорожко, Л.И.** Характеристики анизотропной стали под разными углами к направлению прокатки // Электричество. – 1972. – №3. – С. 88–90.
17. **Дойников, Н.Р.** Численное моделирование магнитостатических полей с учетом магнитной анизотропии стали // Журнал технической физики. – 1975. – Т. 45. – Вып. 11. – С. 2204–2206.
18. **Тенетко, Н.И.** Приближенные аналитические выражения семейств характеристик намагничивания холоднокатаных анизотропных электротехнических сталей // Техническая электродинамика. – 1990. – №3. – С. 18–23.
19. **Рожненко, Ж.Г.** Особенности магнитных свойств и характеристик намагничивания листовых электротехнических сталей // Электротехника и электромеханика. – 2010. – №2. – С. 37–41.
20. **Толмачев, С.Т.** Некоторые проблемы построения векторных математических моделей нелинейных анизотропных ферромагнетиков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №4. – С. 32–37.
21. **Любивый, В.И.** Анализ и расчет магнитного поля изотропного статора асинхронного двигателя // Вентильные преобразователи с улучшенными энергетическими показателями: тез. докл. Горьковской областной науч.-технич. конф. – Горький. – 1977. – С. 54.
22. **А.С. № 1553930** Устройство для измерения магнитных характеристик материалов / Е.В. Калинин [и др.]. Зарег. 20.10.1986.
23. **Вагапов, Ю.Ф.** Определение векторных характеристик намагничивания анизотропных электротехнических сталей на кольцевых образцах // Методы и средства измерения физических величин: тез. докл. V Всерос. научно-технич. конф. – Н. Новгород. – 2000. – Ч. 4. – С. 11.

24. **Калинин, Е.В.** Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Ч. 1. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей // Труды НГТУ им. П.Е.Алексеева. – 2018. – №2(121).

*Дата поступления
в редакцию 20.06.2018*

E.V. Kalinin

**MAGNETIC FIELD IN AN ANISOTROPIC LAMINATED MAGNETIC CORE.
PART 2. EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF APPLICATION AT
CALCULATIONS OF MAGNETIC FIELD OF THE VECTOR MAGNETIZATION
CHARACTERISTICS OF COLD-ROLLED ELECTRICAL STEELS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Purpose: The necessity of comparative analysis of magnetic field calculation results using the vector characteristics of magnetization of cold-rolled electrical steels with the data of experimental determination of magnetic induction vector distribution in an anisotropic laminated core is known.

Methodology: For steels 3413 and 2412 with the same chemical composition but significantly different domain structure and anisotropy of magnetic properties, a series of joint magnetic measurements of strip samples and annular laminated cores with a ratio of radii $r = 2,1$ is carried out.

At frequencies $f = 50$ and 400Hz the experimental dependences of the induction amplitude $B_m(\rho)$ of radial coordinate ρ at different values of the average cross-section of the induction of the $B_m(\rho)$ are obtained in two angular positions coinciding with the axes of magnetic anisotropy $\alpha = 0$ and 90° . Angular characteristics of magnetic anisotropy $\psi(B, \alpha)$ are experimentally determined for both steels at the frequency $f = 50\text{Hz}$.

Results: The technique of an exclusive approach to the experiments is described, which allows to perform local magnetic measurements without disturbing the integrity of the laminated core.

The value of research: Good agreement of the results of calculation and experiment proves the correctness of the chosen concept of the used vector characteristics of magnetic anisotropy.

Novelty / value: The experimental confirmation of the features of the redistribution of the magnetic field in the anisotropic magnetic circuit in unsaturated conditions associated with a change in frequency f , as well as the presence of the initial flat area in the characteristics of magnetization of electrical steels.

Key words: vector characteristics of magnetization, cold-rolled electrical steels, annular anisotropic core, local measurements, magnetic induction, comparison of experiment with calculation.