

УДК 621.314

Е.В. Калинин, А.И. Чивенков¹**ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТЕРЬ
В СТЫКАХ ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследования особенностей формирования потерь на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока $P_{вн}$ в зоне стыков шихтованных сердечников силовых трансформаторов. Актуальность их изучения обусловлена доминированием потерь $P_{вн}$ в общем приросте потерь в стыках. Цель – определение характера зависимости потерь $P_{вн}$ от различных параметров в условиях резкого поверхностного эффекта в пластинах сердечника для стыков внахлест типа «butt-lap». Задача решается методом физического моделирования в специальном намагничивающем устройстве электромагнитных процессов в стыках при воздействии равных встречных переменных магнитных потоков перпендикулярно плоскости прямоугольной проводящей пластины в двух узких крайних зонах. С использованием аналитических выражений для $\mu = \text{const}$ сравниваются результаты, полученные на физической модели для пластин из стали с нелинейной магнитной проницаемостью и меди с линейными свойствами. Определены реальные значения относительной магнитной проницаемости стали в перпендикулярном направлении к плоскости прокатки пластин. Рассчитаны значения коэффициента динамики, при которых протекает резкий поверхностный эффект в стыках. Экспериментально выявлен эффект частичной компенсации потерь на вихревые токи $P_{вн}$ в стыках внахлест типа «butt-lap».

Ключевые слова: шихтованный сердечник, потери в стыках, физическая модель, резкий поверхностный эффект, коэффициент динамики, нелинейная магнитная проницаемость.

Введение

В рамках общепринятой «классической» структуры потерь в стали [1] известными теоретическими исследованиями дополнительных потерь в стыках шихтованных сердечников [2, 3] не удалось выявить отличительных особенностей, связанных с переходами магнитного потока в соседние слои шихтовки. Потребовалось изменение подхода к формированию потерь на этих особых участках [4]. Использование структуры прироста удельных потерь: объединенных потерь на гистерезис и вихревые токи $\Delta P_{уд.гв}$ от основного (тангенциального) магнитного потока Φ_t и потерь на вихревые токи $P_{уд.вн}$ от действия потока Φ_n , нормального к плоскости пластин сердечника, позволило получить качественно новые результаты. В частности, экспериментами по разделению прироста потерь в широко используемых обычных косых стыках внахлест типа «butt-lap» шихтованных сердечников (ШС) [5, 6] установлено, что для современных текстурованных сталей доминирующая доля прироста удельных потерь приходится на $P_{уд.вн}$. Фактически для трансформаторов со стыковой шихтованной конструкцией магнитных систем (МС) это означает, что большая часть процессов формирования потерь в стыках происходит в условиях резкого поверхностного эффекта (РПЭ) [6, 7].

Нарастающая тенденция роста магнитных характеристик новых марок трансформаторных сталей в направлении прокатки [8, 9] и снижения удельных потерь при рабочих амплитуде средней по сечению индукции $B_m = 1,7$ Тл и частоте $f = 50$ Гц до $P_{1,7/50} = (0,82-0,57)$ Вт/кг при вынужденной необходимости уменьшения толщины пластин до $d = (0,23-0,15)$ мм ведет к увеличению относительного уровня $P_{уд.вн}$ в стыках – свыше 90% [6]. Еще большее усиление влияния потока Φ_n на прирост потерь в стыках наблюдается с внедрением в ШС перспективных ступенчатых косых стыков типа «step-lap» [10, 11].

Постановка задачи

В отношении действия потоков Φ_n в зоне стыков ШС при соблюдении неизменной технологии сборки все пластины находятся практически в одинаковых условиях. При этом на концах каждой пластины в узких областях, ограниченных зонами перекрытия соседних стыков – t , сосредоточены равные по величине, но противоположно направленные потоки Φ_n .

Для пояснения рассмотрим одну позицию шихтовки типа «butt-lap» на участке МС, шириной пластин b , толщиной d при шихтовке в m пластин. Как уже показано в [6], наибольшего значения магнитный поток Φ_{nm} , меньше или равной тангенциального потока позиции шихтовки Φ_{tm} :

$$\Phi_{nm} \leq (\Phi_{tm} = B_m \cdot m \cdot d \cdot b), \quad (1)$$

достигает в зоне перекрытия t , а за её пределами в зоне стыка вдвое меньше $\approx \frac{1}{2} \Phi_{nm}$. На рис. 1 изображена позиция шихтовки сердечника в пределах длины пластин стержня (или ярма) с условно «спрямленными» косыми стыками. Стрелками обозначены направления индукции и соответствующие им потоки Φ_n в зоне стыков в некоторый произвольный момент времени.

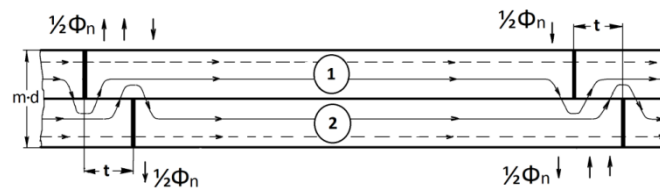


Рис. 1. Нормальная составляющая потока Φ_n в зоне стыков при шихтовке типа «butt-lap»

С использованием условий нечетной симметрии распределения магнитного потока для произвольного значения m выделены два слоя пластин половинной толщины – $(m \cdot d)/2$, обозначенных цифрами 1 и 2, в пределах толщины одной позиции шихтовки ($m \cdot d$). Под действием РПЭ контуры вихревых токи в слоях 1 и 2 вытесняются к наружным границам пластин [12]. Поэтому в пределах одной зоны стыка возможно суммирование нормальных потоков стыков Φ_n . Так, в слое 1 – слева и в слое 2 – справа результирующий нормальный поток будет направлен вверх $+1/2 \Phi_n$. В слое 1 – справа и в слое 2 – слева нормальный поток направлен вниз $-1/2 \Phi_n$. Такая картина распределения нормальных составляющих магнитных потоков Φ_n характерна практически для всех пластин пакета ШС.

В работе [7] обосновывается независимость процессов формирования $\Delta P_{уд.гв}$ и $P_{уд.вн}$ в стыках. Это делает возможным рассмотрение исследования влияния различных параметров на величину потерь $P_{уд.вн}$, в качестве самостоятельной задачи. Для этого на крайние противоположно расположенные участки прямоугольной проводящей пластины необходимо воздействовать равными, но разнонаправленными потоками переменными Φ_n , при обеспечении условия РПЭ в пластине. При доминирующем влиянии потерь $P_{уд.вн}$ в стыках такая постановка, в виде задачи физического моделирования, представляется особенно интересной и значимой.

Условия формирования потерь на вихревые токи в пластинах шихтованного сердечника со стыками

Динамика перемагничивания в пластинах сердечника от магнитных потоков Φ_τ и Φ_n принципиально отличается [6]. В монографии Й. Ламмеранера и М. Штафля [13] предлагается аналитическое решение одномерной пространственной задачи проникновения равномер-

ного синусоидального электромагнитного потока с частотой f в проводящую пластину с постоянной магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$, один из поперечных размеров которой много меньше другого. Выводится формула удельных потерь на вихревые токи $P_{\text{уд.в}}$ в зависимости от обобщенного параметра – коэффициента динамики ξ .

Значение коэффициента динамики ξ определяется выражением:

$$\xi = l \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma} \quad (2)$$

где l – меньший из линейных поперечных размеров пластины; $\mu = \mu' \cdot \mu^0$ – произведение относительной магнитной проницаемости материала μ' на проницаемость вакуума μ^0 , γ – удельная электропроводность материала.

Формула для потерь $P_{\text{уд.в}}$ [13] имеет вид:

$$P_{\text{уд.в}} = \pi^2 / (6\sigma) \cdot B_m^2 \cdot \gamma \cdot l^2 \cdot f^2 \cdot F(\xi), \quad (3)$$

где функция $F(\xi)$ равна:

$$F(\xi) = 3/\xi \cdot (\text{sh } \xi - \sin \xi) / (\text{ch } \xi - \cos \xi) \quad (4)$$

На рис. 2а показаны особенности изменения функции $F(\xi)$. При $\xi \leq (1,5 - 2)$ значения $F(\xi)$ близки к единице (поверхностный эффект практически отсутствует). Это соответствует режимам перемагничивания электротехнических сталей от тангенциального магнитного потока Φ_τ . В качестве меньшего поперечного размера l в формуле (2) для потока Φ_τ выступает толщина пластин d .

Для потерь на вихревые токи $P_{\text{уд.вт}}$ от потока Φ_τ формула (3) принимает известный вид [14]:

$$P_{\text{уд.вт}} = \pi^2 / (6\sigma) \cdot B_m^2 \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot f^2 \quad (5)$$

В работе [15] представлены результаты проведенного в нормализованном виде численного моделирования электромагнитного поля и удельных потерь $P_{\text{уд.в}}$ в нелинейной ферромагнитной пластине ($\mu = \text{var}$) при заданном синусоидальном потоке. Расчеты показывают, что при $\xi \leq (1,5 - 2)$ с ростом нелинейности магнитных свойств поверхностный эффект развивается медленнее, чем при $\mu = \text{const}$, а потери $P_{\text{уд.вт}}$ возрастают по отношению к классическим (5). Это подтверждается в [13, 14] расчетами для предельного случая нелинейности – идеальной прямоугольной характеристики, когда потери в (1,5 - 1,7) раза больше, чем по формуле (3) при $\mu = \text{const}$.

С ростом динамики функция $F(\xi)$ постепенно переходит в асимптотическую зависимость (рис. 2а). Точка $\xi = 4$ считается границей ПЭ [13]. При значении $\xi \geq 4$:

$$F(\xi) \approx 3 / \xi. \quad (6)$$

Проведенный в [16] анализ результатов численного расчета электромагнитного поля в ферромагнитной пластине при заданном синусоидальном токе и значительном проявлении динамики ($\xi > 10$) свидетельствует, что в отличие от случая $\xi \leq (1,5 - 2)$ при РПЭ нелинейный поверхностный эффект (при $\mu = \text{var}$) развивается быстрее и удельные потери меньше, чем при $\mu = \text{const}$. Это соответствует выводам [14], где потери в пластине с прямоугольной магнитной характеристикой при РПЭ меньше, чем рассчитанные по формуле (3).

Для магнитного потока Φ_n , нормального к плоскости пластин, минимальным линейным размером, реально ограничивающим действие вихревых токов, является ширина пластин сердечника b [6], а не ширина перекрытия t , как это полагается в [2, 3, 10]. При этом перемагничивание происходит при малых индукциях, соответствующих слабой нелинейности μ [6]. Исследованиями [6, 7] показано, что для нормального потока в сердечниках силовых трансформаторов значения коэффициента динамики $\xi > 10$. Контуры вихревых токов при этом будут вытесняться к поверхности по периметру пластин (рис. 2в).

Формула (3) удельных потерь на вихревые токи $P_{\text{уд.вн}}$ для потока Φ_n с учетом (6) принимает вид:

$$P_{\text{уд.вн}} = \pi^{1.5} / (2\sigma) \cdot B_m^2 \cdot b \cdot f^{1.5} \cdot \sqrt{\gamma/\mu} \quad (7)$$

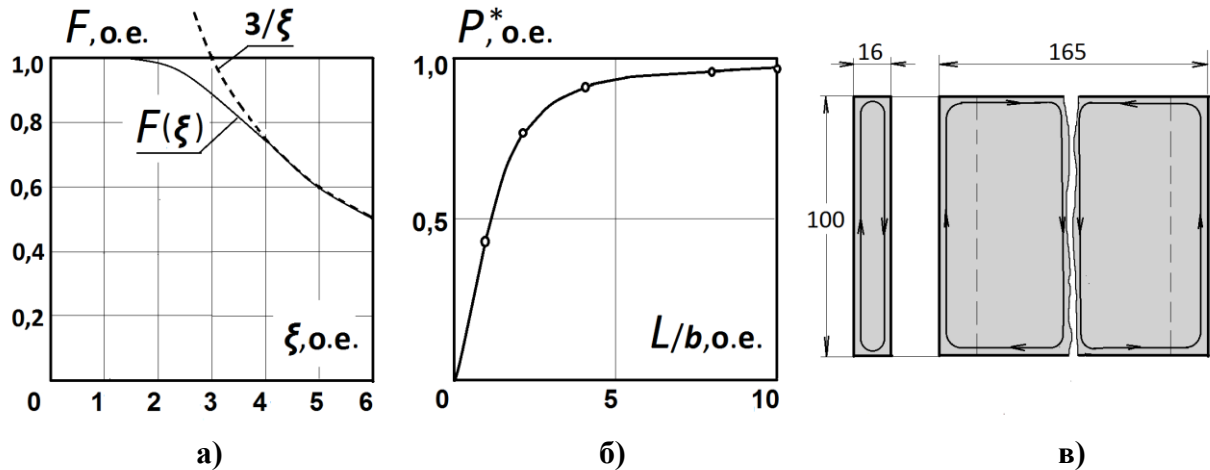


Рис. 2. а – Зависимость $F(\xi)$; б – зависимость $P^*(L/b)$; в – контуры вихревых токов образцов (16x100) мм и (100x165) мм в намагничивающем устройстве (границы полюсов – пунктиром)

Ширина b и длина пластин L сердечников силовых трансформаторов всегда соизмеримы по размеру и обе оказывают влияние на потери. На рис. 2б представлена зависимость коэффициента снижения удельных потерь $P^* = P_{\text{уд. вл}2} / P_{\text{уд. вл}1}$ от отношения линейных размеров L/b в стальной пластине прямоугольного сечения с нелинейными магнитными свойствами, полученная в [12] численными расчетами электромагнитного поля и потерь на вихревые токи при одномерной – $P_{\text{уд. вл}1}$ и двухмерной – $P_{\text{уд. вл}2}$ постановках задачи.

Представленные в [6] результаты характера зависимости от частоты $P_{\text{уд. вл}}(f)$ в стыках коррелируют с имеющейся зависимостью от f в формуле (7) и подтверждают наличие РПЭ. В то же время существуют отличия формирования потерь $P_{\text{уд. вл}}$ от потоков Φ_n , действующих в двух крайних областях проводящей прямоугольной пластины. Подобные условия по динамике перемещения должны быть созданы и у физической модели.

Описание физической модели

Физическая модель для исследования потерь на вихревые токи $P_{\text{вл}}$ в стыках от потоков Φ_n представляет намагничивающее устройство (НУ) в виде разрезанного на два полукольца ленточного яма шириной $b = 100$ мм и наружным диаметром $D_n = 165$ мм (рис. 3а) со сменными образцами. Образцы имеют форму прямоугольных пластин шириной – b , такой же, как длина полюсов яма, и длиной $L = D_n$ в соответствии с продольным размером НУ (рис. 3б). Образцы помещаются в плоскости разреза яма между полюсами, имеющими ширину $L_{\text{пол}} = 16$ мм. Нижняя часть яма закреплена, верхняя – подвижная, с зажимом для фиксации испытуемого образца.

НУ питается от регулируемого автотрансформатора (Латр) на частоте $f = 50$ Гц. Намагничивающая обмотка НУ выполнена медным проводом с числом витков $W_n = 660$ с сопротивлением $R_m = 3,96$ Ом (на ток I до 5 А), состоит из четырех секций с согласованным соединением и создает в НУ кольцевой синусоидальный магнитный поток.

Таким образом, на концах образца действуют нормальные к плоскости пластины равные по величине, но разнонаправленные магнитные потоки Φ_n . Величина потоков контролируется с помощью локальной обмотки с числом витков $W_l = 3$ (рис. 3).

Для испытаний подготовлены основные образцы размерами (100x165) мм из двух материалов: с линейными свойствами – электротехническая медь марки М1, $d = 0,5$ мм, $\mu' = 1$, $\gamma \geq 5 \cdot 10^7$ См/м; и нелинейными магнитными свойствами – сталь марки Ст. 3, $d = 1,5$ мм, $\mu' \gg 10$, $\gamma = 1 \cdot 10^7$ См/м. Для обеспечения условия $\zeta \geq 10$ материал пластин выбран с желаемыми свойствами.

тельно большими значениями произведения $(\mu \cdot \gamma)$, а толщина пластин d – для достаточных значений потерь при проведении измерений ваттметровым способом.

На рис. 4 приведена электрическая схема для определения полных потерь P_{Π} состоящая из автотрансформатора, измерительного комплекта К505 (КТ = 0.5) с амперметром, ваттметром и вольтметром, контрольного милливольтметра Ц4311 (КТ = 1,0) и НУ с образцом. Уравнение баланса мощностей при такой схеме намагничивания образца в НУ имеет вид:

$$P_{\Pi} = P_M + P_{ст} + P_{вл} \tag{8}$$

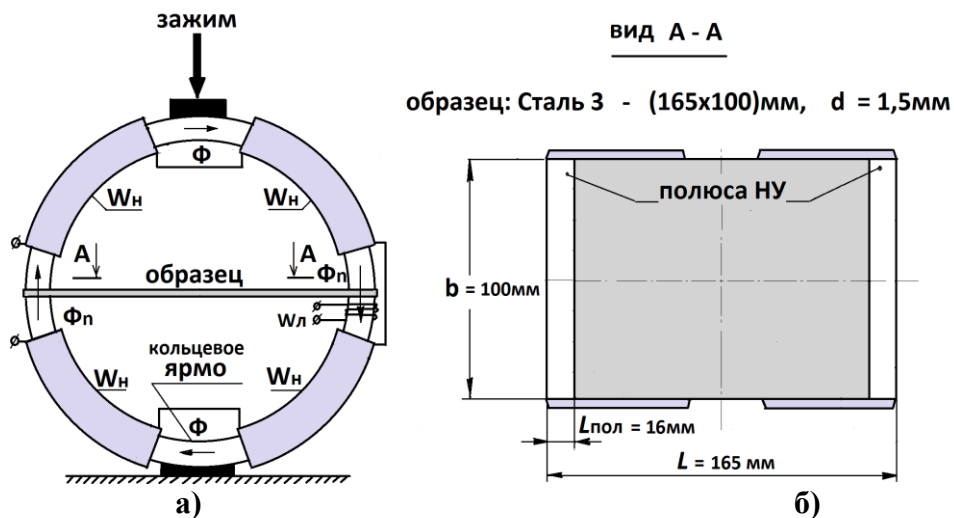


Рис. 3. а – НУ с кольцевым потоком $\Phi_{л}$ – с образцом между полюсами; б – образец из Ст.3 для исследования $P_{вл}$

где $P_M = I^2 (R_M + R_W)$ – потери в меди; I – ток в цепи намагничивания; R_W – сопротивление токовой цепи ваттметра; $P_{ст} = P_{ст}(B_{м.ср})$ – потери в стали НУ; $B_{м.ср}$ – средняя по сечению амплитуда магнитной индукции, равная: $B_{м.ср} = E / (4,44 \cdot f \cdot W_{л} \cdot S_{пол})$; E – действующее значение э.д.с. датчика $W_{л}$, $S_{пол}$ – площадь сечения полюса в зоне локальной обмотки $W_{л}$.

Потери $P_{ст}$ для различных $\Phi_{л}$ находятся по формуле (8) из опыта холостого хода НУ (при отсутствии образца) при $P_{вл} = 0$ как разность:

$$P_{ст} = P_{\Pi} - P_M \tag{9}$$

Искомые потери $P_{вл}$ в образце определяются из (3) как:

$$P_{вл} = P_{\Pi} - (P_M + P_{ст}) \tag{10}$$

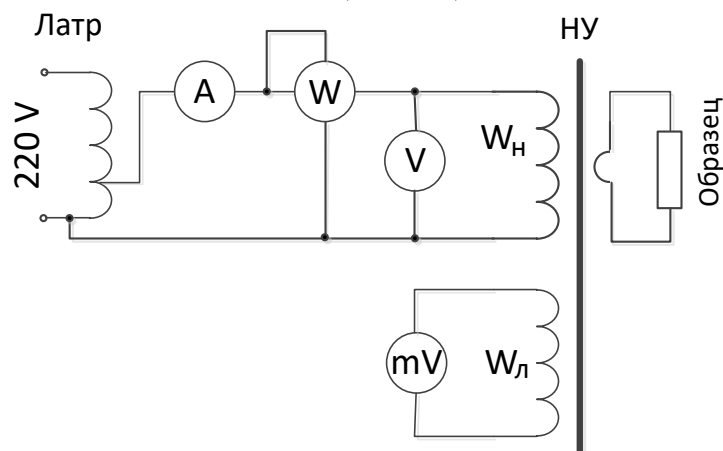


Рис. 4. Электрическая схема измерения потерь в НУ с испытуемым образцом

Величины потерь $P_{ст}$ определены экспериментально с использованием формулы (9) при различных значениях индукции $B_{м.ср}$ (соответствующих значениям $E_{W=3}$) и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость $P_{ст}$ ($B_{м.ср}$) из опыта холостого хода НУ

$E_{W=3}$, мВ	$B_{м.ср}$, Тл	I , А	$P_{п}$, Вт	$P_{м}$, Вт	$P_{ст}$, Вт
300	0,282	0,095	1,34	0,036	1,3
400	0,375	0,19	2,3	0,150	2,15
500	0,469	0,227	3,5	0,208	3,32
600	0,563	0,312	5,3	0,392	4,86
700	0,657	0,436	7,6	0,766	6,84

Последние необходимы для расчета по измеренным значениям $P_{п}$ потерь $P_{вл}$ в испытуемых образцах по формуле (10).

Кроме основных образцов – (100x165) мм, из тех же материалов изготовлены малые образцы с размерами (16x100) мм (рис. 2в), равными размерам полюсов НУ, для обеспечения условия равномерного магнитного потока по всему сечению образцов [13]. Образцы таких размеров предназначены для калибровки модели с уточнением значений γ меди и μ стали. При этом использовались теоретические положения раздела 3. При измерениях два малых образца размещаются в воздушных зазорах НУ строго под полюсами.

Результаты исследования потерь $P_{вл}$ на образцах (16x100) мм

С целью проверки применимости формул (3) – (7) к работе физической модели первоначально проведены измерения на образцах из меди М1. Результаты сведены в табл. 2. Потери $P_{вл}$ при разных значениях индукции $B_{м.ср}$ определены по методике, описанной в разделе 4.

Таблица 2

Потери $P_{вл}$ в образцах из меди М1 (16x100) мм, $d = 0,5$ мм при различных $B_{м.ср}$

$E_{W=3}$, мВ	$B_{м.ср}$, Тл	I , А	$P_{п}$, Вт	$P_{м}$, Вт	$P_{ст}$, Вт	$P_{вл}$, Вт	$P_{вл}$, Вт
							Эксперимент
300	0,282	0,49	8,5	0,98	1,3	6,2	6,19
400	0,375	0,65	15,1	1,69	2,15	11,3	11,0
500	0,469	0,82	23,4	2,69	3,32	17,4	17,1
600	0,563	1,02	33,3	4,16	4,86	24,3	24,6
700	0,657	1,25	46,5	6,25	6,84	33,4	33,6

По результатам измерений и формуле (3) рассчитано фактическое значение удельной электропроводности образцов из меди М1:

$$\gamma = 5,2 \cdot 10^7 \text{ См/м.}$$

Для полученного значения γ коэффициент динамики (2) для малых медных образцов (16x100) мм равен $\zeta = 1,6$. Из равенства (4) находим – $F(\zeta) = 0,99$. Расчетные удельные потери по формуле (3) при $b = 0,016$ м и верхнем значении индукции (табл. 2) $B_{м.ср} = 0,657$ Тл равны:

$$P_{уд.вл} = 3,14^2 / (6 \cdot 8900) \cdot 0,657^2 \cdot 5,2 \cdot 10^7 \cdot 0,016^2 \cdot 50^2 \cdot 0,99 = 2629 \text{ [Вт/кг]}.$$

По имеющейся зависимости $P^*(L/b)$ (рис. 2б) определяется коэффициент снижения удельных потерь P^* из-за влияния соотношения линейных размеров образца. При $L/b = 100/16 = 6,25$ он имеет значение: $P^* = 0,92$. Расчетные потери $P_{вл}$ определяются как:

$$P_{вл} = P_{уд.вл} \cdot P^* \cdot M, \quad (11)$$

и при массе двух медных образцов $M = 0,0139$ кг равны:

$$P_{\text{вл}} = 2629 \cdot 0,92 \cdot 0,0139 = 33,6 \text{ [Вт]}.$$

Потери $P_{\text{вл}}$, рассчитанные при различных $B_{\text{м.ср}}$, соответствуют экспериментальным во всем диапазоне индукций (табл. 2).

После экспериментального подтверждения справедливости формул при исследовании в НУ потерь медных образцов с линейными свойствами проведены измерения потерь на образцах (16x100) мм из стали Ст. 3 ($M = 0,0397$ кг). Результаты сведены в табл. 3.

Формулы (3) – (7), полученные при условии $\mu = \text{const}$, применимы и для исследования процессов в стальных пластинах при малых насыщениях от потока Φ_n , характерных для режимов силовых трансформаторов [6]. Это дает возможность расчетным путем определить значения μ' стали в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки пластины.

Используя формулы (3) для расчета $P_{\text{уд. вл}}$ и (11) – для $P_{\text{вл}}$, находим соотношение для определения $F(\xi)$ при $B_{\text{м.ср}} = 0,657$ Тл:

$$P_{\text{вл}} = 3,14^2 / (6 \cdot 7800) \cdot 0,657^2 \cdot 1 \cdot 10^7 \cdot 0,016^2 \cdot 50^2 \cdot 0,92 \cdot 0,0397 \cdot F(\xi) = 21,3 \cdot F(\xi).$$

В соответствии с экспериментальным значением $P_{\text{вл}} = 15,3$ Вт в табл. 3 имеем:

$$F(\xi) = 15,3 / 21,3 = 0,718.$$

Из условия (6) вычисляем величину коэффициента динамики ξ :

$$\xi = 3 / F(\xi) = 3 / 0,718 = 4,18.$$

Из формулы (2) устанавливаем значение относительной магнитной проницаемости μ' стали Ст. 3 в перпендикулярном направлении к плоскости прокатки:

$$\mu' = (\xi / b)^2 / (\pi \cdot f \cdot \mu^0 \cdot \gamma);$$

$$\mu' = 34,6.$$

Рассчитанные значения μ' для различных $B_{\text{м.ср}}$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Потери $P_{\text{вл}}$ в образцах из стали Ст. 3 (16x100) мм, $d = 1,5$ мм при различных $B_{\text{м.ср}}$

$E_{W=3}$, мВ	$B_{\text{м.ср}}$, Тл	I , А	$P_{\text{п}}$, Вт	$P_{\text{м}}$, Вт	$P_{\text{ст}}$, Вт	$P_{\text{вл}}$, Вт	μ'
300	0,282	0,21	3,6	0,18	1,3	2,15	59,2
400	0,375	0,28	7,0	0,31	2,15	4,50	42,4
500	0,469	0,38	11,3	0,52	3,32	7,43	38,3
600	0,563	0,45	16,7	0,81	4,86	11,0	36,8
700	0,657	0,59	23,5	1,39	6,84	15,3	34,6

Использование результатов измерения потерь намагничивающего устройства с малыми образцами (16x100) мм позволило рассчитать реальные значения удельной электропроводности меди $M1$ γ и относительной магнитной проницаемости μ' стали Ст. 3. При этом проницаемость μ' в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки, вообще является слабо изученной величиной [17], и её уровень оказался на порядок ниже, чем ожидалось.

Таким образом, формулы (3), (4), (6) не только дают возможность оценивать достоверность результатов экспериментов, но и рассчитывать неизвестные параметры испытуемых материалов γ и μ' через энергетический отклик образцов при воздействии на них переменного электромагнитного поля. При определении μ' обязательным условием является наличие резкого поверхностного эффекта.

Исследования потерь $P_{\text{вл}}$ на образцах размером (100x165) мм

По результатам исследований раздела 5 рассчитаны реальные значения коэффициентов динамики ξ образцов (100x165) мм.

Определение потерь $P_{\text{вн}}$ в основных образцах размерами (100x165) мм с потоками Φ_n по крайним областям проведено также по результатам измерений с использованием формулы (10). Расположение испытуемого образца при измерениях в НУ показано на рис. 3б.

Полученные экспериментальные значения потерь $P_{\text{вн}}$ для образца из стали Ст.3 ($\xi \approx 28$) представлены в табл. 4 (графа 2); для образца из меди М1 ($\xi = 10$) – в табл. 5 (графа 2).

Отличительной особенностью действия РПЭ в стыках – внахлест типа «butt-lap» является наличие встречных потоков Φ_n (рис. 1). С целью экспериментальной проверки на физической модели возможности компенсации вихревых токов образцы (100x165) мм разрезали поперек на две равные части. При этом исключается возможность протекания вихревых токов с контурами, замыкающимися по всему периметру пластин.

Таблица 4

Потери $P_{\text{вн}}$ в образце из стали Ст. 3 (100x165) мм, $d = 1,5$ мм при различных $V_{\text{м.ср}}$

$V_{\text{м.ср}}$, ТЛ	$P_{\text{вн}}$, Вт	$P_{\text{вн}}$, Вт	Процент компенсации	$P_{\text{вн}}$, Вт (16x100)	Кратность
	Сплошной	Разрез поперек			
1	2	3	4	5	6
0,282	6,38	7,58	18,8%	2,15	3,53
0,375	12,5	14,9	19,2%	4,50	3,31
0,469	20,3	24,1	18,7%	7,43	3,24
0,563	30,1	35,6	18,3%	11,0	3,24
0,657	41,5	49,4	19,0%	15,3	3,23

Проведенные измерения потерь $P_{\text{вн}}$ разрезанных поперек образцов (табл. 4; 5, графа 3) показывают значения потерь больше, чем на неразрезанных. Тем самым обнаруживается эффект снижения (компенсации) потерь, который вызван взаимным вычитанием части вихревых токов от смежных потоков, контуры которых замыкаются по всему периметру пластин. Снижение потерь существенно зависит от коэффициента динамики ξ .

Наибольшее снижение потерь на уровне $\delta P_{\text{вн}} = (18-19)\%$ (табл. 4, графа 4) имеет место в стальной пластине при $\xi = 28$. В пластине из меди М1 ($\xi = 10$) снижение потерь равно $-\delta P_{\text{вн}} \approx 7\%$ (табл. 5, графа 4).

Таким образом, установлен эффект частичной компенсации прироста потерь $P_{\text{вн}}$ в стыках от встречных потоков Φ_n , присущий стыкам внахлест типа «butt-lap». Эффект возрастает с ростом значений коэффициента динамики ξ .

Таблица 5

Потери $P_{\text{вн}}$ в образце из меди М1 (100x165) мм, $d = 0,5$ мм при различных $V_{\text{м.ср}}$

$V_{\text{м.ср}}$, ТЛ	$P_{\text{вн}}$, Вт	$P_{\text{вн}}$, Вт	Процент компенсации	$P_{\text{вн}}$, Вт (16x100)	Кратность
	Сплошной	Разрез поперек			
1	2	3	4	5	6
0,282	20,5	22,0	7,3%	6,2	3,55
0,375	36,8	39,4	7,1%	11,3	3,49
0,469	56,5	60,5	7,1%	17,4	3,48

Из эффекта компенсации вихревых токов следуют важные выводы.

В стыках внахлест типа «butt-lap» подтверждается наличие вихревых токов, замыкающихся по всему периметру пластин трансформатора, зависящих от коэффициента динамики ξ и отношения L/b пластин. Хотя соотношение линейных размеров L/b пластин из текстурованных электротехнических сталей в реальных трансформаторах может быть больше $L/b = 1,65$ испытуемых образцов, но и значения ξ при значительно бóльших ширине пластин b и проницаемости μ' могут оказаться существенно выше, чем у испытуемого образца (100x165) мм из Ст. 3.

При ступенчатой форме стыков (типа «step-lap») магнитные потоки Φ_n на концах пластин в зонах стыков трансформатора будут иметь одинаковое (согласованное) направление [10, 11]. При этом эффекта компенсации вихревых токов и потерь P_{en} не будет. Составляющая прироста потерь P_{en} в стыках «step-lap» по отношению к стыкам типа «butt-lap» возрастает, что и отмечено в [10]. С ростом мощности трансформаторов преимущества ступенчатых стыков теряются.

Для сопоставления электромагнитных процессов в образцах из стали и меди на основе результатов измерения потерь в табл. 4 и табл. 5 рассчитаны отношения потерь P_{en} образцов размером (100x165) мм, разрезанных поперек (графа 3) и образцов – (16x100) мм (графа 5) при различных $B_{m,cr}$, которые оказались очень близкими. Это свидетельствует о том, что потери P_{en} в стальных образцах (100x165) мм также пропорциональны: $P_{en} \equiv \sqrt{\gamma/\mu}$, как и в формуле (7) при равномерном потоке для материалов с линейными свойствами. Результаты сведены в графе 6 табл. 4 и 5.

Заключение

На физической модели показано, что на потери в стыках влияет не величина перекрытия стыка t [2, 3, 10], а ширина пластин b . Формирование потерь P_{en} происходит не в обычных для электротехнических сталей режимах по динамике перемагничивания, а в условиях резкого поверхностного эффекта. Физическая модель позволяет определять значения относительной магнитной проницаемости μ' образца из листовой стали для расчета коэффициента динамики ξ , отвечающего за развитие резкого поверхностного эффекта в стыках и уровень потерь P_{en} . При резком поверхностном эффекте и невысоких значениях магнитной индукции условия формирования потерь в стыках для образца из стали с нелинейными магнитными свойствами ($\mu = \text{var}$) близки к происходящим в линейной среде на примере образца из меди ($\mu = \text{const}$). При этом потери $P_{en} \equiv \sqrt{\gamma/\mu}$.

Установлен эффект частичного вычитания (компенсации) потерь P_{en} в стыках внахлест от протекания встречных магнитных потоков по краям пластин, относительная величина которого практически не зависит от величины индукции, но возрастает с ростом динамики. Проведенные исследования потерь на разрезанных образцах, то есть без проявления эффекта частичного вычитания встречных потоков в пластинах, дают возможность распространить основные результаты физического моделирования и на ступенчатые стыки типа «step-lap», где магнитные потоки на концах пластин действуют согласованно [11].

С помощью представленной физической модели оказывается возможным изучение сложных физических процессов, протекающих в стыках трансформаторов, и выявление параметров, от которых наиболее существенно зависит величина потерь P_{en} . Этим вопросам будет посвящена следующая часть работы.

Библиографический список

1. Дружинин, В.В. Магнитные свойства электротехнических сталей / В.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
2. Černý, V. Příspěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů // Elektrotechnický obzor, SV72. – 1983. – № 11. – S. 651-652.
3. Nakata, T. Магнитные характеристики стыков сегментов сердечника статора / Y. Kawase, S. Moriyasa // Дэнки гаккай ромбунси, Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. – 1987. – D. 107, № 1. – P. 109-114.
4. Калинин, Е.В. Исследование влияния стыков на потери в шихтованных сердечниках / Е.В. Калинин, О.А. Любарский // Электропривод и автоматизация промышленных установок. Межвуз. сборн. научн. трудов. – Н. Новгород, 1987. – С. 51-55.
5. Калинин, Е.В. Потери в стыках шихтованных сердечников. Часть 1. Экспериментальное исследование основных влияющих факторов прироста электромагнитных потерь // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей. – Н. Новгород, 2018. – С.53-61.

6. **Калинин, Е.В.** Потери в стыках шихтованных сердечников. Исследование возможностей снижения прироста потерь / Е.В. Калинин, Е.А. Чернов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 4 (123). – С.124-134.
7. **Калинин, Е.В.** Прогнозирование прироста потерь в стыках сердечников силовых трансформаторов / Е.В. Калинин, А.И. Чивенков // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 3. – С. 87-101.
8. **Bavay, J.C.** Les tôles magnétiques á orientés. L'amélioration des performances // Rev. Gen. Elec. – 1989. – № 11. – P. 32-36, VII.
9. **Nosawa, T.** Magnetic properties and domain structures in domain refined grain-oriented silicon steel / T. Nosawa, Y. Matsuo [et al.] // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 63, № 8, pt. 2A. – P. 2966-2970.
10. **Левин, М.И.** Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов / М.И. Левин, И.В. Пентегов, С.В. Рымар, А.В. Лавренюк // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 1. – С. 40-43.
11. **Nakata, T.** Свойства стыков магнитопроводов со ступенчатой укладкой пластин / N. Takahashi, Y. Kawase // IEEE Trans. Magn. – 1982. – Vol. 18, № 6. – P. 1055-1057.
12. **Калинин, Е.В.** Расчет потерь на вихревые токи в массивных и шихтованных ферромагнитных сердечниках / Е.В. Калинин, В.И. Любивый // Электропривод и автоматизация в машиностроении. Межвуз. сборн. научн. трудов. – М., 1980. – С. 138-143.
13. **Ламмеранер, Й.** Вихревые токи / Й. Ламмеранер, М. Штафль. – М.: Энергия, 1967. – 208 с.
14. **Лейтес, Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
15. **Калинин, Е.В.** Нормализованный подход к моделированию потерь на перемагничивание в листовой электротехнической стали / Е.В. Калинин // Электрооборудование промышленных установок. Межвуз. сборн. научн. трудов. – Горький, 1986. – С. 159-164.
16. **Герасимович, А.Н.** Расчет кривых намагничивания ферромагнитных материалов на переменном токе / А.Н. Герасимович, Н.Н. Бобко // Электричество. – 1976. – № 10. – С. 13-18.
17. **Yagisawa, T.** Magnetic properties of laminated steel sheets for normal fluxes / Y. Takekoshi, S. Wada // Magnetism and Magnetic Materials. – 1982. – Vol. 26, № 1. – P. 1-3.

Дата поступления
в редакцию 21.01.2019 г.

E.V. Kalinin, A.I. Chivenkov

PHYSICAL MODEL OF LOSSES AT JOINTS OF LAMINATED CORES

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

Purpose: The article studies feature of the formation of eddy current losses $P_{вн}$ from normal component of magnetic flux of in area of joints of laminated cores of power transformers. The need for research is associated with domination of losses $P_{вн}$ in overall growth of losses in joints. The purpose of research is to determine nature of dependence of losses $P_{вн}$ on various parameters under conditions of a sharp surface effect in core plates for overlapping joints of «butt-lap» type.

Methodology: The problem is solved by method of physical modeling in a special magnetizing of electromagnetic processes in joints under the influence of equal counter-variable magnetic fluxes perpendicular to the plane of rectangular conductive plate in two narrow extreme zones. Using analytical expressions for $\mu = \text{const}$, the results obtained on physical model for steel plates with nonlinear magnetic permeability and copper plates with linear properties are compared.

Results: The real values of relative magnetic permeability of steel in perpendicular direction to plane of plate rolling are determined. The values of dynamics coefficient at which surface occurs in joints are calculated. The effect of partial compensation of losses on eddy current in joints $P_{вн}$ of «butt-lap» type is experimentally revealed.

Key words: laminated core, losses at joints, physical model, sharp surface effect, coefficient of dynamic, non-linear magnetic permeability.