

УДК 621.314

Е.В. Калинин, А.И. Чивенков

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОТОКА В СТЫКАХ ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследований потерь на вихревые токи $P_{вп}$ от нормальной составляющей магнитного потока Φ_n в стыках шихтованных сердечников силовых трансформаторов. Актуальность исследований обусловлена высоким уровнем потерь $P_{вп}$, формирующихся в условиях резкого поверхностного эффекта, в общем приросте потерь в стыках. Задача решается на физической модели потерь в стыках $P_{вп}$ при воздействии равных переменных магнитных потоков перпендикулярно плоскости прямоугольной стальной пластины в двух узких крайних зонах. Предложенная физическая модель состоит из двух одинаковых намагничивающих устройств и позволяет создавать согласное, как у стыков типа «step-lap», или встречное, как у стыков типа «butt-lap», направление магнитных потоков Φ_n . Возможно изменение расстояния и взаимного углового положения между полюсами для исследования пластин разной формы. Показано, что в шихтованных сердечниках для стыков «step-lap» при прочих равных условиях уровень потоков Φ_n вдвое выше, чем для стыков «butt-lap». На основании анализа результатов физического моделирования сделаны выводы о возможности оптимизации потерь в обоих типах стыков.

Ключевые слова: коэффициент динамики, нормальная составляющая магнитного потока, перекрытие стыков, потери в стыках, резкий поверхностный эффект, ступенчатые стыки, стыки внахлест, физическая модель, шихтованный сердечник, эффект взаимной компенсации вихревых токов.

1. Актуальность

Потери в стыках по ряду причин являются мало изученной частью потерь холостого хода шихтованных сердечников (ШС) силовых трансформаторов [1]. В рамках общепринятой структуры потерь в стали теоретическими исследованиями не удается выявить отличительных признаков, связанных с формированием потерь на этих особых участках [2-4].

Качественно новые результаты позволяют получить изменение подхода к структуре прироста удельных потерь в стыках разделением на гистерезисно-вихревые потери $\Delta P_{уд.гв}$ от основного тангенциального магнитного потока Φ_t и вихревые $P_{уд.вл}$ от (перпендикулярного к плоскости

пластин ШС) нормального потока Φ_n , образующегося при переходе в соседние слои шихтовки [5]. Действие переменного Φ_n приводит к развитию резкого поверхностного эффекта (РПЭ) в пластинах [6]. Экспериментами по разделению прироста потерь в косых стыках внахлест типа «*butt-lap*» [5, 7] установлено, что для текстурованных сталей доминирующая доля прироста удельных потерь приходится на потери $P_{уд.вл}$, то есть большая часть процессов, связанная с потерями в стыках, протекает в условиях резкого поверхностного эффекта [7, 8]. Физические условия динамических процессов в зоне стыков принципиально отличаются от сформулированных в материалах [2, 3].

Сравнительные эксперименты, проведенные на магнитопроводах трехфазных трансформаторов из обычной стали и перспективных текстурованных сталей [9], показывают, что при общем снижении потерь холостого хода происходит возрастание относительного уровня удельных потерь в стыках. Это подтверждается и проведенными расчетами [7]. Подобные негативные явления еще более проявляются с внедрением ступенчатых косых стыков типа «*step-lap*» [10, 11].

II. Постановка задачи

Весь рабочий магнитный поток ШС упорядочен по слоям шихтовки в соответствии с используемой конструкцией стыков. На рис. 1 изображены две одинаковые группы пластин одного слоя шихтовочной позиции сердечника с одинаковыми уровнями тангенциального потока слоя Φ_t для двух типов стыков: внахлест – «*butt-lap*» и ступенчатых – «*step-lap*». Показана структура магнитного потока на границах с учетом потоков, проходящих через воздушные зазоры слоя – Φ_δ . В стыках внахлест магнитный поток слоя Φ_n при переходах из слоя в слой делится пополам: вверх и вниз, образуя в зонах перекрытия стыков t симметричные встречные потоки – $\frac{1}{2}\Phi_n$ (рис. 1, а) на двух половинах слоя шихтовки [12]. При ступенчатых стыках нормальный поток в зонах перекрытия t входит и выходит из слоя, не меняя направление, образуя согласные потоки полной величины – Φ_n (рис. 1, б) [13]. Таким образом, величины нормальных потоков в слоях шихтовки двух рассматриваемых типов стыков с учетом наличия потоков Φ_δ отличается практически вдвое. Контуры вихревых токов от потоков Φ_n в двух типах стыков (рис. 1) также будут различаться.

Для амплитуды рабочего магнитного потока $\Phi_{рм}$ отдельного стержня (или ярма) ШС, состоящего из многих слоев шихтовки, справедливо равенство:

$$\Phi_{рм} = \sum \Phi_{тм} = \sum \Phi_{лм} + \sum \Phi_{дм}, \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{тб}}$, $\Phi_{\text{лм}}$, $\Phi_{\text{дм}}$ – амплитуды соответствующих составляющих магнитного потока одного слоя.

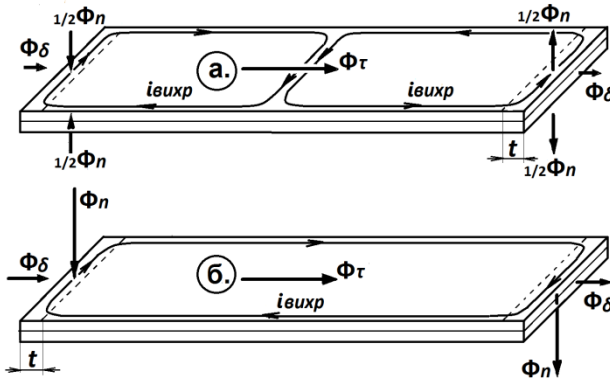


Рис. 1. Составляющие магнитного потока в зоне стыков пластин: внахлест – типа «butt-lap» (а) и ступенчатых – типа «step-lap» (б)

Таким образом, суммарная величина магнитных потоков Φ_n , создающих потери на вихревые токи в стыках $P_{\text{вт}}$ при РПЭ, по величине сопоставима с рабочим потоком Φ_p .

В работе [7] при рассмотрении поверхностного эффекта в проводящей пластине при $\mu = \text{const}$ вводится параметр динамики поверхностного эффекта ξ , определяющий относительную величину глубины проникновения электромагнитной волны в пластину.

Значение параметра ξ определяется выражением:

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

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.

При $\xi \leq (1,5 \div 2)$, что 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 .

Формула потерь на вихревые токи $P_{\text{уд.вт}}$ от потока Φ_τ имеет известный вид [4]:

$$P_{\text{уд.вт}} = \frac{\pi^2}{6 \cdot \sigma} \cdot B_m^2 \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot f^2. \quad (3)$$

С наступлением РПЭ в пластине (при значении $\xi \geq 4$) формула удельных потерь на вихревые токи $P_{уд.вн}$ для потока Φ_n принимает вид:

$$P_{уд.в.н} = \frac{\pi^{1.5}}{2 \cdot \sigma} \cdot B_m^2 \cdot b \cdot f^{1.5} \cdot \sqrt{\gamma/\mu}. \quad (4)$$

Для магнитного потока Φ_n , нормального к плоскости пластин, минимальным линейным размером, реально ограничивающем 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]. Результаты исследований [6, 7] показали, что для нормального потока в стыках ШС силовых трансформаторов значения параметра динамики превышают $\xi > 10$. Контуры вихревых токов при этом будут вытесняться к поверхности по периметру пластин (рис. 1).

Возникает необходимость в углубленном изучении динамики перемагничивания в зоне стыков. Исследования на физической модели № 1 потерь на вихревые токи от действия нормального потока $P_{вн}$ для стыков внахлест типа «butt-lap», проведенные в [12, 13], позволили установить некоторые особенности, связанные с формированием потерь $P_{вн}$ в косых стыках внахлест. К достоинствам физической модели № 1 следует отнести равенство магнитных потоков Φ_n и неизменность расстояния между граничными поверхностями полюсов. Но ограниченные возможности модели № 1 не дают возможности провести подобный анализ для ступенчатых косых стыков – «step-lap». Конструктивные особенности физической модели №1 [13] не позволяют произвести сравнительную оценку действия встречных и согласных потоков Φ_n (рис. 1), изучить влияние на потери $P_{вн}$ размеров перекрытия t и длины пластин L .

На основе усовершенствования физической модели расширен диапазон исследований.

III. Описание физической модели и требований к эксперименту

Физическая модель № 2 для исследования потерь на вихревые токи $P_{вн}$ в стыках от нормальных потоков Φ_n в отличие от модели № 1 [12, 13] состоит из двух намагничивающих устройств (НУ): НУ1 и НУ2 с одинаковыми разрезными П – образными ленточными сердечниками (рис. 2). Намагничивающие обмотки обоих НУ, имеющие одинаковые параметры, включены параллельно к регулируемому источнику питания (автотрансформатору на частоте сети $f = 50$ Гц).

В смежных полюсах НУ создаются равные по амплитуде переменные магнитные потоки, которые в зависимости от взаимного включения концов обмоток позволяют создать согласное или встречное направление магнитных потоков Φ_n полюсов (на рис. 2 представлен вариант согласных потоков Φ_n). Ширина полюсов намагничивающих устройств увеличена с

$L_{\text{пол}} = 16$ мм до $L_{\text{пол}} = 26$ мм, что расширяет возможности экспериментов; длина полюсов $b = 100$ мм сохранена, как у физической модели № 1, для сопоставимости результатов измерений. Образец строго фиксируется между полюсами НУ в плоскости разреза сердечников. Нижние половины НУ1 и НУ2 с обмотками – закреплены (рис. 2), верхние – ярма, подвижные. Имеются зажимы для фиксации обоих НУ совместно с испытуемым образцом. Для контроля потоков Φ_n непосредственно на образце по обоим краям предусмотрены две одинаковые локальные обмотки W_o в зоне расположения его под полюсами НУ1, НУ2, как это показано на рис. 2.

Возможно изменение расстояния между полюсами НУ1 – НУ2, а также их взаимного углового расположения. Поэтому длина испытуемых образцов L может меняться, а форма – отличаться от прямоугольной (трапеция, сектор кольца и т.д.).

Таким образом, в концевых зонах образца создаются нормальные к плоскости пластины потоки Φ_n , которые могут соответствовать условиям перемагничивания косых стыков типа: «step-lap» или «butt-lap». Сменные образцы прямоугольной формы имеют ширину $b = 100$ мм, такую же, как длина полюсов НУ (рис. 2). Намагничивающие обмотки НУ1 – НУ2 выполнены медным проводом с числами витков $W_n = 240$ и имеют общее сопротивление при параллельном соединении $R_M = 1,32$ Ом.

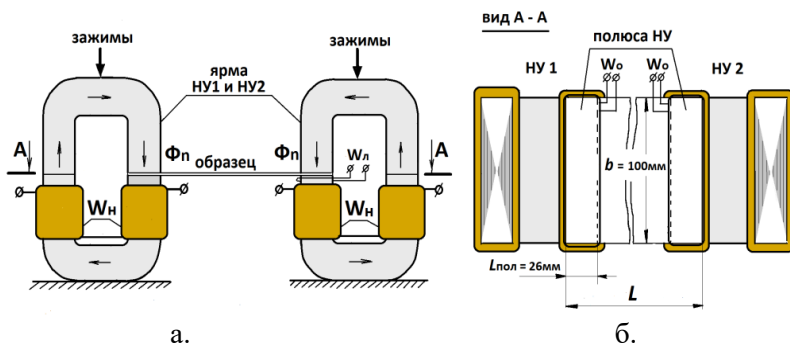


Рис. 2. Намагничивающие устройства НУ1 и НУ2:

с образцом прямоугольной формы (а);
расположение образца с обмотками W_o в зоне под полюсами НУ (б)

Амплитуда потоков Φ_n при измерениях контролируется по э.д.с. локальных обмоток с одинаковым числом витков: $W_n = 3$ – на полюсе НУ2 и $W_o = 3$ в крайних зонах образца, соответствующих потокам полюсов (рис. 2). Для обеспечения условия $\xi \geq 10$, как и в физической модели № 1 [12, 13], материал пластин должен иметь желательные большие значения произ-

ведения ($\mu \cdot \gamma$), а толщина пластин d – соответствовать условию достаточного уровня потерь при проведении измерений ваттметровым методом.

Выбор в [12, 13] в качестве материала для образцов физической модели № 1 конструкционной стали марки Ст.3 при исследовании потерь $P_{вн}$ оказался оправданным. Эта сталь доступна, удобна в обработке, ее магнитные свойства не чувствительны к механическим и температурным воздействиям. Удельная электропроводность γ стали Ст.3 в 5 раз выше, чем у сталей с содержанием $S_i \approx 3\%$ [4], а магнитная проницаемость μ' в перпендикулярном направлении к плоскости прокатки согласно проведенным исследованиям находится в одном диапазоне значений с трансформаторными сталями: $40 < \mu' < 100$.

Уравнение баланса мощностей для физической модели № 2 сохраняет вид [13]:

$$P_n = P_M + P_{ст} + P_{вн}, \quad (5)$$

где $P_M = I^2 \cdot (R_M + R_W)$ – 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 полюса амплитуда магнитной индукции, равная: $B_{м,ср} = E_{л} / (4,44 \cdot f \cdot W_{л} \cdot S_{пол})$; $E_{л}$ – действующее значение э.д.с. датчика $W_{л}$, $S_{пол}$ – площадь сечения полюса в зоне локальной обмотки $W_{л}$.

При отсутствии образца $P_{вн} = 0$. Из опыта холостого хода НУ1 – НУ2 потери $P_{ст}$ для различных Φ_n находятся с использованием формулы (5), как разность:

$$P_{ст} = P_n - P_M. \quad (6)$$

Исследования на физической модели проводились при условии, чтобы значения амплитуд $B_{м,ср}$ магнитных потоков Φ_n находились в ненасыщенных режимах намагничивания стальных образцов: $B_{м,ср} < 0,6$ Тл.

С использованием формулы (6) в качестве примера по результатам измерений определены и представлены в табл. 1 потери $P_{ст}$ для нескольких значениях индукции $B_{м,ср}$ полюсов НУ при соответствующих $E_{л}$.

Таблица 1.
Зависимость $P_{ст}$ ($B_{м.ср}$) из опыта холостого хода НУ

$E_d, В$	$B_{м.ср}, Тл$	$I, А$	$P_n, Вт$	$P_m, Вт$	$P_{ст}, Вт$
0,6	0,35	0,81	3,0	0,87	2,13
0,8	0,46	1,08	5,3	1,54	3,76
1,0	0,58	1,33	8,2	2,33	5,85

Искомые потери $P_{вн}$ в образце определяются из (5), как:

$$P_{вн} = P_n - (P_m + P_{ст}). \quad (7)$$

При измерениях потерь из-за высокой температурной зависимости электропроводности стали [4] поддерживалось условие: $t^o = \text{const}$ за счет принудительного охлаждения образца. Сравнительные измерения потерь P_n при согласных (+) и встречных (-) потоках Φ_n производились при одном зажатии образца.

IV. Исследование эффекта уменьшения потерь $P_{вн}$ в стыках на образцах (165x100) мм из стали Ст.3

Для испытаний на физической модели № 2 подготовлены образцы из холоднокатаной стали Ст.3, $d = 1,5$ мм, $\gamma = 1 \cdot 10^7$ См/м, $\mu' \approx 40$, $\xi \approx 28$, с размерами, как в работе [13], (165x100) мм.

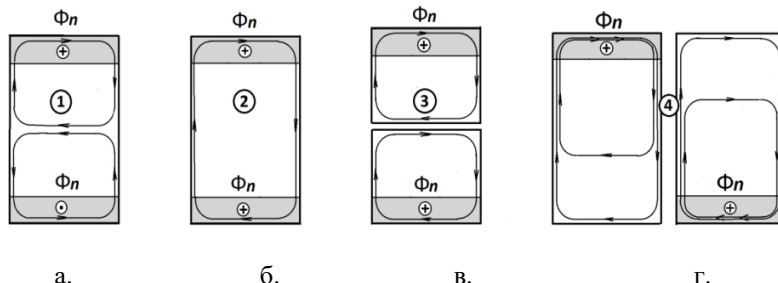
При изучении специфики формирования потерь на вихревые токи $P_{вн}$ от действия нормальных потоков Φ_n в узких крайних зонах стыков стальных пластин ШС учитывалось, что каждый из потоков полюсов индуцирует свои вихревые токи, контуры которых вытесняются к наружному периметру пластины. В связи с этим рассмотрены четыре варианта взаимодействия потоков и образцов (рис. 3):

1 – потоки полюсов направлены встречно; вихревые токи, замыкающиеся по всему периметру образца, взаимно компенсируются; остаются только симметричные малые контуры токов (рис. 3, а);

2 – согласное действие потоков полюсов; преобладают вихревые токи, замыкающиеся по контуру образца (рис. 3, б);

3 – действие потоков полюсов происходит на образце (рис. 3, в), разрезанном поперек; на половинках образца отсутствует взаимное влияние вихревых токов двух полюсов;

4 – поток каждого полюса действует на целую пластину (рис. 3, г) без влияния другого полюса; используются два одинаковых образца, каждый – с одним потоком Φ_n полюса на одной стороне образца; действие вихревых токов каждого полюса распространяется на целый образец.



а. б. в. г.

Рис. 3. Варианты исследования эффекта уменьшения потерь на вихревые токи $P_{вп}$ в стыках на физической модели № 2: встречные потоки (а); согласные потоки (б); независимые потоки на образце (в), разрезанном поперек; независимые потоки в двух изолированных образцах (г)

Представленные в табл. 2 результаты измерений показывают, что самый высокий уровень потерь на вихревые токи $P_{вп}$ в варианте 4 при независимом действии каждого из потоков Φ_n в целой пластине. При согласных потоках (вариант 2) потери значительно ниже – на $(9 \div 11)$ %. При этом они оказываются даже на $(3 \div 5)$ % ниже, чем на половинах пластин (рис. 3, в) с независимыми потоками (вариант 3). Наибольшего уровня взаимная компенсация потерь на вихревые токи $P_{вп}$ – $(14 \div 16)$ % по отношению к варианту 4 достигает в варианте 1 с встречными потоками Φ_n (табл. 2).

Таким образом, при одинаковом уровне потоков Φ_n образцов в вариантах 1 и 2, их размерах (165×100) мм, то есть отношением $L/b = 1,65$ и коэффициенте динамики $\xi \approx 28$ разница в потерях $P_{вп}$ составляет около $(5 \div 6)$ % из-за разного уровня взаимной компенсации потерь.

Таблица 2.

Потери $P_{вп}$ в образцах Ст.3 (165×100) мм, $d = 1,5$ мм (холоднокатаная), при различных условиях действия потоков Φ_n

$E_l, В$	Вар. 1		Вар. 2		Вар. 3		Вар. 4
	$P_{вп}, ВТ$	% к 4	$P_{вп}, ВТ$	% к 4	$P_{вп}, ВТ$	% к 2	$P_{вп}, ВТ$
0,6	18,5	-16,2	19,7	-9,1	20,6	+4,6	21,5
0,8	35,5	-14,1	37,5	-10,8	38,7	+3,2	40,5
1,0	57,8	-15,7	60,8	-10,0	63,5	+5,4	66,9
$\delta P_{ср}, \%$	- $(14 \div 16)$ %		- $(9 \div 11)$ %		+ $(3 \div 5)$ %		-

V. Зависимость потерь $P_{вп}$ от длины образцов L

Исследование зависимости потерь от отношения линейных размеров $P_{вп}$ (L/b) при согласных (+) и встречных (-) потоках Φ_n проведено на

образцах из горячекатаной стали Ст.3 (γ и μ' – те же, что и в разделе IV), $d = 1,5$ мм; $b = 100$ мм при значениях $L = (82; 120; 165; 200)$ мм.

Результаты измерений (табл. 3) показывают, что эффект взаимной компенсации потерь имеет выраженную зависимость от L/b . Относительная разность потерь $\delta P_{вн}$, равная:

$$\delta P_{в} \cdot (L/b) = \frac{[P_{вн(+)} - P_{вн(-)}]}{P_{вн(-)}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

резко возрастает при малых значениях L/b : при $L/b = 0,82$ – до 36,3 % и асимптотически снижается до 3 % при $L/b = 2$.

Таблица 3.

Потери $P_{вн}$ в образцах из Ст.3, $d = 1,5$ мм, (горячекатаная), при изменении длины L для согласных – (+) и встречных – (–) потоках Φ_n

$E_{л}, В$	$P_{вн}, Вт$							
	$L/b = 0,82$		$L/b = 1,2$		$L/b = 1,65$		$L/b = 2,0$	
	+	–	+	–	+	–	+	–
0,6	20,7	15,1	19,5	17,2	18,9	17,9	19,0	18,5
0,8	38,8	28,0	36,3	31,8	35,2	32,9	35,2	34,2
1,0	60,8	45,7	57,6	51,2	55,9	52,7	56,1	54,3
$\delta P_{ср}, \%$	36,3 %		13,3 %		6,2 %		3,0 %	

VI. Зависимость потерь $P_{вн}$ от ширины зоны перекрытия t

Изменение величины перекрытия стыка t на физической модели № 2 на каждом этапе осуществлено частичным симметричным выведением концевых частей образца из полюсов НУ, с замером (линейкой) ширины зоны перекрытия и последующим зажатием в полюсах.

Диапазон изменения перекрытия стыка: $t = (26; 17; 13; 6)$ мм. Для контроля потока Φ_n на образце из горячекатаной стали Ст.3, $d = 1,5$ мм, (200x100) мм по краям в зонах полюсов, расположены локальные датчики с числом витков $W_0 = 3$, как это показано на рис. 2, б. Результаты измерений представлены в табл. 4.

При наибольшем значении t , соответствующем ширине полюса $L_{пол} = 26$ мм, по датчику $W_{л}$ на полюсе НУ установлены режимы э.д.с. $E_{л}$ (графа 2), сделаны измерения потерь $P_{вн}$ (графа 3) измерения и зафиксировано равенство соответствующих действующих значений э.д.с. E_0 датчиков W_0 (графа 1). При каждом значении t для обеспечения равенства потоков полюсов НУ $\Phi_{nm} = \text{const}$ необходимым условием является поддержание одинаковых значений E_0 обеих обмоток W_0 (графа 1). Из этого условия в

соответствии с новыми значениями $E_{л}$ (графы 4; 6; 8) проведены необходимые измерения и по формулам (6), (7) определены величины потерь $P_{вп}$ (графы 5; 7; 9). По данным табл. 4, в пределах точности эксперимента можно сделать вывод, что при варьировании зоны перекрытия в 4 раза с 26 мм до 6 мм в каждом режиме с постоянной амплитудой потока в зоне перекрытия $\Phi_{лм} = \text{const}$ потери $P_{вп}$ практически не зависят от ширины перекрытия t (графы 3, 5, 7, 9).

Таблица 4.
Потери $P_{вп}$ в образце из стали Ст.3 (200x100) мм,
 $d = 1,5$ мм (горячекатаная), при различных t

$E_{о}, В$	$t = 26$ мм		$t = 17$ мм		$t = 12$ мм		$t = 6$ мм	
	$E_{л}, В$	$P_{вп}, Вт$	$E_{л}, В$	$P_{вп}, Вт$	$E_{л}, В$	$P_{вп}, Вт$	$E_{л}, В$	$P_{вп}, Вт$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,365	0,4	8,9	0,470	8,4	0,530	8,6	0,772	9,14
0,460	0,5	14,3	0,595	13,8	0,661	13,4	0,990	14,0
0,556	0,6	20,3	0,712	19,4	0,800	20,1	1,22	18,9
0,648	0,7	27,7	0,832	26,9	0,932	27,3	–	–

VII. Зависимость потерь $P_{вп}$

от количества рассеченных частей N пластины

Исследования зависимостей $P_{вп}(N)$ проведены на образцах из холоднокатаной стали Ст.3 $d = 1,5$ мм, ранее использовавшихся в [13]. Комплект стальных пластин изготовлен лазерной резкой (ширина прорезей $h_{пр} \leq 0,2$ мм) и включает образцы (165x100) мм: без рассечения (сплошного) и с разным количеством рассечений: – 1; 3; 5; 7; 11, разделяющих ширину образца на равные части с числом $N = 2; 4; 8; 12$.

На каждом образце измерения потерь $P_{п}$ проведены при согласных (+) и встречных (–) потоках для трех режимов $\Phi_{л}$. Для сплошного образца ($N = 1$) результаты измерения потерь $P_{п}$ расположены в табл. 1 (варианты 1 и 2); при $N = 2; 4; 8; 12$ – сведены в табл. 5.

В работе [13] для анализа зависимостей использовано приведение результатов к относительным величинам. В качестве таких величин приняты следующие переменные в относительных единицах:

$N \approx b / b_{э}$, – количество частей с эквивалентной шириной – $b_{э}$, на которые продольными прорезями делится образец шириной – b ;

$P_{вп}^* = P_{впN} / P_{вп}$ – относительные значения потерь $P_{впN}$ в расщепленных образцах (при $N > 1$), к потерям $P_{вп}$ в сплошном образце.

Таблица 5.

Потери $P_{вн}$ при различном N в образцах из Ст.3 (165x100) мм, $d = 1,5$ мм (холоднокатаная), для согласных – (+) и встречных – (–) потоков Φ_n

$E_{л}, В$	$P_{вн}, Вт$							
	$N = 2; \xi \approx 14$		$N = 4; \xi \approx 7$		$N = 8; \xi \approx 3,5$		$N = 12; \xi \approx 2,3$	
	+	–	+	–	+	–	+	–
0,6	14,1	13,2	8,01	7,45	3,86	3,70	2,77	2,41
0,8	27,0	25,3	15,5	14,4	7,65	7,11	5,36	4,83
1,0	43,4	41,1	25,5	23,6	12,5	11,3	8,37	7,91
$P_{вн}^*$	0,715	0,712	0,41	0,406	0,20	0,198	0,14	0,134

Приведенные в табл. 5 данные свидетельствуют, что усредненные значения $P_{вн}^*$ при различных N для согласных и встречных потоков Φ_n практически одинаковые. На рис. 4, а представлена зависимость $P_{вн}^*(N)$, полученная на физической модели № 2 для согласных и встречных потоков Φ_n – (кривая 2); для сравнения приводится аналогичная кривая, полученная в [13] при встречных потоках Φ_n на физической модели №1 – (кривая 1). Соответственно, подтверждается полученный ранее данные в [13] значительного спада потерь $P_{вн}$ в стыках на пластинах с прорезями.

На рис. 4, б аналогичным образом представлены зависимости $S(N)$, полученные на физических моделях № 1 и № 2. При этом S является показателем степени зависимостей относительного снижения потерь $P_{вн}^*(N)$ вида:

$$P_{вн}^*(N) = (1/N)^S \quad (9)$$

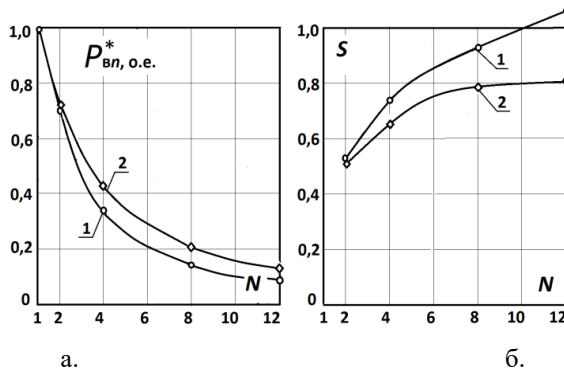


Рис. 4. Зависимости $P_{вн}^*(N)$ (а) и $S(N)$ (б):

- 1 – полученные на физической модели № 1 [13] при встречных потоках Φ_n ;
2 – на физической модели № 2 при согласных и встречных потоках Φ_n

Из сопоставления зависимости $S(N)$ с приведенными в табл. 5 значениями ξ при различных N следует, что при РПЭ $S \approx 0,5$, а с выходом из РПЭ – $S \approx 0,8$.

VIII. Обсуждение результатов

Исследования на физической модели показали следующие результаты, которые изложены ниже в четырех пунктах.

1. Обнаруженный в работе [13] эффект снижения потерь $P_{\text{вл}}$, обусловленный взаимной компенсацией вихревых токов от магнитных потоков Φ_n полюсов имеет место как при встречном (–), так и при согласном (+) направлении потоков. В обоих случаях потери $P_{\text{вл}}$ оказываются меньше, чем при независимом действии каждого потока в целой пластине, или ее половине (табл. 2). Эффект снижения потерь асимптотически уменьшается с ростом отношения линейных размеров пластины L/b . Так, при изменении отношения размеров L/b от 1,65 до 2 происходит снижение соотношения потерь $P_{\text{вл}}$ вариантов согласных (+) и встречных (–) потоков Φ_n с 6 % до 3 % (табл. 3).

Таким образом, при одинаковой ширине пластин и одинаковых потоках в косых стыках типа «butt-lap» и «step-lap» уровень потерь $P_{\text{уд-вл}}$ будет примерно одинаковым, но для обеспечения условия одинаковых потоков стыков число пластин в слое шихтовки стыков типа «step-lap» должно быть вдвое меньше, чем у стыков типа «butt-lap».

2. С учетом итогов результатов предыдущих экспериментальных исследований потерь в стыках кольцевого шихтованного сердечника в работах [5, 7] и физического моделирования потерь на вихревые токи при резком поверхностном эффекте ($\xi > 4$) от потоков Φ_n в двух крайних противоположно расположенных зонах стальной пластины – в [12, 13] можно сделать вывод, что составляющая удельных потерь на вихревые токи в от нормального потока стыках $P_{\text{уд-вл}}$ зависит от тех же параметров, что в формуле (4) для потока, равномерно распределенного по всей длине проводящей пластины, при $\mu = \text{const}$ [6]. Однако изменяется характер зависимости от линейного размера b :

$$P_{\text{уд.вл}} \equiv \left(\Phi_{\text{нм}}^2; \sqrt{b}; f^{1,5}; \sqrt{\gamma/\mu} \right). \quad (10)$$

3. При продольном рассечении стальной пластины пропорционально снижается уровень динамики, в соответствии со значением ξ по формуле (2), и потери $P_{\text{уд-вл}}$ асимптотически уменьшаются (рис. 4, а).

С ростом числа рассеченных частей пластины N режим перематничивания постепенно выходит из условия резкого поверхностного эффекта (табл. 5). Характер зависимости $P_{\text{уд-вл}}$ в стыках от эквивалентной ширины пластины $b_3 = b/N$ меняется в соответствии с показателем степени $S(N)$

(рис. 4). При приближении к диапазону значений $\xi < 2$, потери $P_{уд.вл}$ будут уже зависеть от параметров, формулы (3), но с другим характером зависимости от линейного размера b_3 :

$$P_{уд.вл} = [\Phi_{nm}^2; \gamma; b_3^{S(N)}; f^2]. \quad (11)$$

4. Установлено, что на потери $P_{вл}$ не оказывает заметного влияния размер перекрытия стыка t .

Выбор в работах [2, 3] в качестве линейного параметра, ответственного за динамические процессы в зоне стыков шихтованного сердечника, – t является некорректным, поскольку этот размер никак не ограничивает контуры вихревых токов в пластинах (рис. 1).

Исследования, проведенные в [5], и на физической модели № 2 подтвердили, что при изменении t с контролем постоянства амплитуды потоков $\Phi_{nm} = \text{const}$ потери $P_{вл}$ практически не изменяются (табл. 3).

IX. Выводы

В результате проведенных исследований установлено:

- характер зависимости удельных потерь на вихревые токи в стыках $P_{уд.вл}$ от амплитуды магнитного потока Φ_{nm} : $P_{уд.вл} \equiv \Phi_{nm}^2$, удельной электропроводности γ и магнитной проницаемости μ стали в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки пластины: $P_{уд.вл} \equiv \sqrt{(\gamma/\mu)}$, ширины пластин b : $P_{уд.вл} \equiv \sqrt{b}$;
- при выполнении условия $\Phi_{nm} = \text{const}$ практически не наблюдается какой-либо зависимости удельных потерь $P_{уд.вл}$ от ширины перекрытия стыков t ;
- эффект взаимной компенсации вихревых токов имеет место в обоих типах стыков, но в стыках внахлест типа «butt-lap» он несколько выше, чем в ступенчатых стыках типа «step-lap»;
- эффект взаимной компенсации вихревых токов и различие потерь $P_{вл}$ в стыках типов «butt-lap» и «step-lap» при $\Phi_{nm} = \text{const}$ снижаются при увеличении отношения линейных размеров пластин L/b ;
- при продольном рассечении пластины с ростом числа рассеченных частей пластины N наблюдается одинаковое для рассматриваемых типов стыков уменьшение потерь $P_{вл}$.

По результатам исследований сформулируем три основных вывода.

1. С помощью физических моделей определены зависимости потерь на вихревые токи от нормального магнитного потока в стыках шихтованного сердечника раздельно по каждому из влияющих факторов: амплитуды магнитного потока, частоты перемагничивания, ширины и длины пластин, удельной электропроводности и магнитной проницаемости стали.

Показано, что не наблюдается зависимости потерь на вихревые токи от величины перекрытия стыка.

2. Проведено сопоставление результатов исследования для двух основных типов косых стыков: внахлест типа «*butt-lap*» и ступенчатых типа «*step-lap*».

3. Исследована возможность снижения потерь на вихревые токи от нормального потока в стыках при продольном рассечении стальных пластин шихтованного сердечника. Это преследует цель последующей оптимизации потерь в пределах рассматриваемых типов стыков.

© Калинин Е.В., 2019

© Чивенков А.И., 2019

Библиографический список

- [1] Лизунов С.Д. Итоги Сессии СИГРЭ 1988г. Трансформаторостроение // Электричество. 1989. № 8. С. 37-45.
- [2] Černý V. Příspěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů // Elektrotechnický obzor, SV72. 1983. № 11. P. 651-652.
- [3] Nakata T., Kawase Y., Moriyasa S. Magnetic characteristics of the joints of the stator core segments // Denki Gakkaui Rhombusini. 1987. № 1 (107). P. 109-114.
- [4] Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнических сталей. Москва: Энергия, 1974. – 240 с.
- [5] Калинин Е.В. Потери в стыках шихтованных сердечников. Часть. 1. Экспериментальное исследование основных влияющих факторов прироста электромагнитных потерь // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник статей IV Всерос. научн.-техн. конф., Н. Новгород. 2018. С. 53-61.
- [6] Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. Москва: Изд-во Энергия, 1967. – 208 с.
- [7] Калинин Е.В., Чернов А.И. Потери в стыках шихтованных сердечников. Исследование возможностей снижения прироста потерь // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 4 (123). С. 123-134.
- [8] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Прогнозирование прироста потерь в стыках сердечников силовых трансформаторов // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 3. С. 87-101.
- [9] Moses A.J., Sakaida A. Effect of distorted flux density on three phase transformer cores assembled from high quality electrical steels // IEEE Transactions on Magnetics. 1986. № 22 (5). P. 532-534.
- [10] Левин М.И., Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // Электротехника і Електромеханіка. 2014. № 1. С. 40-43.
- [11] Nakata T., Takahashi N., Kawase Y. Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores // IEEE Transactions on Magnetics. 1982. № 6 (18). P. 1055-1057.

- [12] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Физическая модель потерь в стыках шихтованных сердечников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 1 (124). С. 109-118.
- [13] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Анализ конструкций стыков шихтованных магнитных систем силовых трансформаторов // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1 (5). С. 69-83.

E.V. Kalinin, A.I. Chivenkov

STUDY OF MAGNETIC FLOW NORMAL COMPONENT IN JOINTS OF LAMINATED CORES

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of studies of eddy current losses P_{en} from the normal component of the magnetic flux Φ_n at the joints of the laminated cores of the power transformer. The relevance of the studies is due to the high level of losses P_{en} formed under the conditions of a sharp surface effect, in the overall increase in losses at the joints. The problem is solved on the physical model of losses at the joints P_{en} under the influence of equal variable magnetic fluxes perpendicular to the plane of a rectangular steel plate in two narrow extreme zones. The proposed physical model consists of two identical magnetizing devices and allows one to create a consonant direction of the magnetic fluxes Φ_n , like for joints of the «step-lap» type, or a counter direction, like of joints of the «butt-lap» type. It is possible to change the distance and mutual angular position between the poles to study plates of different shapes. The article presents the results of research, identified dependencies and effects. It has been shown that in laminated cores for joints «step-lap», ceteris paribus, the level of fluxes Φ_n is twice as high as for joints «butt-lap». According to the results of the analysis of the results of physical modeling, conclusions are made about the possibility of optimizing losses in both types of joints.

Keywords: butt-lap, dynamic coefficient, laminated core, loss at the joints, normal component of the magnetic flux, overlap of joints, physical model, sharp surface effect, step-lap, the effect of mutual compensation of eddy currents.

References

- [1] S.D. Lizunov, «Results of the 1988 session of CIGRE. Manufacture of transformers», *Elektrichestvo*, vol. 8, pp. 37-45, Aug. 1989 (in Russian).
- [2] V. Černý, «Přispěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů», *Elektrotechnický obzor*, SV72, vol. 11, pp. 651-652, 1983 (in Czech).
- [3] T. Nakata, Y. Kawase and S. Moriyasa, «Magnetic characteristics of the joints of the stator core segments», *Denki Gakkai Rombunsi. Trans. Inst. Elec. Eng. Jap.*, vol. 1, pp. 109-114, 1987.

-
- [4] V.V. Druzhinin, *Magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskikh staley (Magnetic properties of electrical steel)*. Moscow: Energiya, 1974, P. 240 (in Russian).
- [5] E.V. Kalinin, «Poteri v stykah shihtovannykh serdechnikov. Chast' 1. Ehksperimental'noe issledovanie osnovnykh vliyayushchih faktorov prirosta ehlektromagnitnykh poter' (Losses at the joints of the laminated cores. Part. 1. An experimental study of the main influencing factors of the increase in electromagnetic losses) », in *proc IV All-Russian conf. Aktual'nye problemy energetiki (Actual problems of the electric power industry)*, pp. 53-61, 2018 (in Russian).
- [6] J. Lammeraner and M. Shtafl, *Vikhrevyye toki (Eddy Currents)*. Moscow: Energiya, 1967 (in Russian).
- [7] E.V. Kalinin and A.I. Chernov, «Losses at the joints of laminated cores. investigation of the possibilities of reducing the increase of losses», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (123), pp. 123-134, 2018(in Russian).
- [8] E.V. Kalinin and A. I. Chivenkov. «Forecasting the increase of losses in joints of power transformers core», *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 87-101, 2018.
- [9] A.J. Moses and A. Sakaida, «Effect of distorted flux density on three phase transformer cores assembled from high quality electrical steels», *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 22, no. 5, pp. 532-534, Sep. 1986 (in Russian).
- [10] M.I. Levin, I.V. Pentegov, S.V. Rymar and A.V. Lavrenyuk, «Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs», *Electrical engineering & Electromechanics*, vol. 1, pp. 40-43, 2014 (in Russian).
- [11] T. Nakata, N. Takahashi and Y. Kawase, «Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores», *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 6, no. 18, pp. 1055-1057, Nov. 1982.
- [12] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov. «Physical model of losses at joints of laminated cores», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 1 (124), pp. 109-118, 2019.
- [13] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov. «Analysis of constructions of joints of laminated magnetic systems of power transformers», *Smart electrical engineering*, no. 1 (5), pp. 69-83, 2019 (in Russian).