

УДК 621.314

Е.В. Калинин, Е.А. Чернов

**ПОТЕРИ В СТЫКАХ ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ ПРИРОСТА ПОТЕРЬ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Целью исследования является анализ влияния различных факторов на прирост потерь в косых стыках шихтованных сердечников из холоднокатаной электротехнической стали мощных силовых трансформаторов с целью снижения прироста потерь. Проведено экспериментальное исследование прироста удельных потерь в стыках $\Delta P_{уд}$ как разницы удельных потерь: сначала сплошного кольцевого шихтованного сердечника (без стыков) $P_{уд}$, а потом этого сердечника со стыками $P_{уд.ст}$, при различных значениях амплитуды магнитной индукции B_m на двух частотах $f = 50$ и 100 Гц. Используются нетрадиционные структурные составляющие прироста удельных потерь: $\Delta P_{уд.гв}$ – на гистерезис и вихревые токи от перераспределения основного (тангенциального) магнитного потока и $P_{уд.вп}$ – на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока в стыке. В статье подтверждается правильность использования выбранной структуры прироста потерь в косых стыках. Выявлено, что для сердечников из текстурованных сталей основная часть прироста удельных потерь ($> 85\%$) приходится на составляющую $P_{уд.вп}$. Предлагаются мероприятия по снижению прироста потерь в стыках. Показано, что динамика энергетических процессов, связанных с формированием $P_{уд.вп}$, соответствует резкому поверхностному эффекту. Экспериментально получено значительное уменьшение $P_{уд.вп}$ путем нанесения на пластины сердечника в зоне стыков специальных разрезов. Новизна работы заключается в предложении структуры прироста удельных потерь в косых стыках шихтованных сердечников и определены особенности характера зависимостей, составляющих $\Delta P_{уд.гв}$ и $P_{уд.вп}$ от B_m и f . Даются практические рекомендации существенного снижения $\Delta P_{уд}$ в мощных силовых трансформаторах.

Ключевые слова: шихтованный сердечник трансформатора, холоднокатаная электротехническая сталь, косые стыки, структура прироста потерь, экспериментальное исследование, снижение потерь, специальные разрезы.

Введение

Электромагнитные потери (далее потери) P силовых трансформаторов являются важной характеристикой энергетических потерь. Стоимость полных потерь трансформатора за период эксплуатации (капитализированная стоимость) соизмерима с его ценой, при этом стоимость потерь холостого хода в несколько раз выше стоимости потерь короткого замыкания [1, 2]. Суммарная установленная мощность всех трансформаторов многократно (в 7-8 раз) превышает общую генерируемую, а на потери в них расходуется более 6 % всей вырабатываемой электроэнергии [1]. Внедрение современных текстурованных холоднокатаных электротехнических сталей существенно улучшило энергетические показатели за счет низких значений удельных магнитных потерь и повышенного уровня рабочей индукции в направлении прокатки (НП) [1-8]. Потребовался переход на магнитные системы (МС) с косыми стыками [1, 2]. Созданы новые дорогостоящие типы текстурованных холоднокатаных сталей: Ni-B, ZDKH, с магнитоактивным покрытием, лазерной обработкой поверхности, уменьшенной толщиной прокатки пластин, новая группа материалов – аморфные стали [1, 6-8]. Однако, указывается и на необходимость в дальнейшем совершенствовании конструкций стыков МС мощных энергоустройств. [1-3, 9, 10].

Исследования прироста потерь в шихтованных сердечниках, связанных с наличием стыков, затрудняются их зависимостью от технологических и конструктивных особенностей изготовления МС [1-3, 11]. К этому добавляется высокая чувствительность крупной полосовой доменной структуры (ДС) текстурованных сталей к механическим воздействиям и динамике перемагничивания [12, 13], сложность измерения потерь при низком коэффициенте мощности, который для современных сталей может принимать значения $\cos\varphi < 0,01$ [1]. Поэтому важным

становится решение проблемы структуры прироста потерь, определения характера зависимостей, составляющих прироста от параметров косых стыков и условий перемагничивания.

Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования структуры прироста удельных потерь в стыках сердечника С№ 1 на частотах $f = 50$ и 100 Гц

В первой части работы [4] на основе экспериментального исследования потерь, на частоте $f = 50$ Гц в шихтованных сердечниках №1 (С№ 1) кольцевой формы из стали 2412 и №2 (С№ 2) П-образной формы из стали 3406 изучено влияние основных параметров косых стыков на увеличение удельных потерь в сердечнике со стыками $P_{уд.ст}$ по отношению к удельным потерям сердечника без стыков $P_{уд}$ при различных значениях амплитуды магнитной индукции B_m :

$$P_{уд.ст}(B_m) = P_{уд}(B_m) + \Delta P_{уд}(B_m) \tag{1}$$

Для С№ 1 определены структура и количественные значения составляющих прироста удельных потерь в стыках $\Delta P_{уд}$, а также характер их зависимости от B_m (рис. 1б; табл. 1):

$$\Delta P_{уд}(B_m) = \Delta P_{уд.гв}(B_m) + P_{уд.вп}(B_m) \tag{2}$$

где $\Delta P_{уд.гв} = \Delta P_{уд.г} + \Delta P_{уд.в}$ – прирост удельных потерь в стыках на гистерезис и вихревые токи; $P_{уд.вп}$ – удельные потери на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока Φ_n . На частоте $f = 50$ Гц для С№ 1 из стали 2412 установлены процентные соотношения структурных составляющих прироста потерь при различных B_m и числе пластин в шихтовке $m = 8$ (рис. 1в).

На основе полученных результатов для С№ 2 из стали 3406 при $B_m = 1,5$ Тл и $m = 1$; 2 произведен расчет составляющих прироста удельных потерь в стыках и прироста удельных потерь $\Delta P_{уд}$, соответствующих экспериментальным значениям [4]. На примере С№ 2 показано, что составляющая $P_{уд.вп}$ в стыках при $B_m > 1,5$ Тл более, чем в 5, 6 раз превышает $\Delta P_{уд.гв}$. Фактически установлено доминирование составляющей $P_{уд.вп}$ в стыках шихтованных сердечников из текстурованных холоднокатаных сталей.

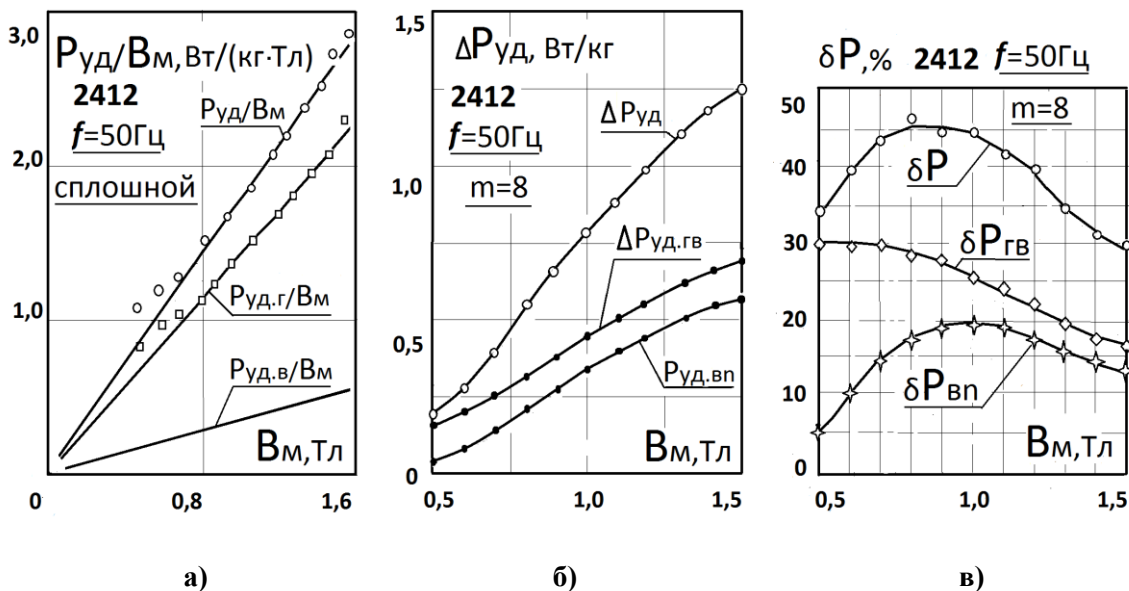


Рис. 1. а – Зависимости структурных составляющих удельных потерь $P_{уд}/V_m$ от B_m в сплошном С№ 1 из стали 2412 при $f = 50$ Гц; б – зависимости структурных составляющих прироста удельных потерь $\Delta P_{уд}(B_m)$ в С№ 1 со стыками при $f = 50$ Гц и $m = 8$ (табл.1); в – зависимости относительного прироста потерь $\delta P(B_m)$ в С№ 1 со стыками при $f = 50$ Гц и $m = 8$ (табл.1) и структурных составляющих $\delta P_{гв}(B_m)$ и $\delta P_{вп}(B_m)$

С целью дополнительного изучения особенностей формирования прироста потерь в стыках проведены измерения удельных потерь на повышенной частоте $f = 100$ Гц сначала сплошного сердечника С№1 - $P_{уд}(B_m)$, потом С№1 со стыками – $P_{уд.ст}(B_m)$ при числе пластин в шихтовке $m = 8$, также связанные равенствами (1), (2). Результаты для различных B_m сведены в табл.1 (графы 3; 10). В графах 2; 6 аналогичным образом представлены удельные потери С№1 при $f = 50$ Гц по результатам [4].

На рис. 1,а представлены зависимости удельных потерь от B_m сплошного С№1 при $f = 50$ Гц для удобства в виде отношений полных удельных потерь $P_{уд}/B_m$ и их структурных составляющих $P_{уд.г}/B_m$; $P_{уд.в}/B_m$ к индукции B_m . Как видно из графиков на рис. 1а и ранее использовано в [4], отношение составляющих потерь на гистерезис и вихревые токи $P_{уд.г}$ и $P_{уд.в}$ для стали 2412 с мелкокристаллической структурой практически не меняется от B_m и при $f = 50$ Гц равно: $P_{уд.г}/P_{уд.в} = 4,2$. Учитывая также, что $P_{уд} = P_{уд.г} + P_{уд.в}$, для $f = 50$ Гц имеем

$$P_{уд.г} = 0,81 P_{уд}; P_{уд.в} = 0,19 P_{уд} \quad (3)$$

Для С№1 со стыками при $f = 50$ Гц и количестве пластин в шихтовке $m = 8$ по результатам экспериментов в первой части работы [4] определены и представлены на рис. 1б. зависимости прироста удельных потерь $\Delta P_{уд}(B_m)$ и структурных составляющих прироста $\Delta P_{уд.гв}(B_m)$ и $P_{уд.вп}(B_m)$, значения последних занесены жирным шрифтом в табл.1 (графы 4;5). На рис. 1в приведены эти же зависимости от B_m (при $f = 50$ Гц и $m = 8$) структурных составляющих прироста потерь в стыках С№1 в относительном виде:

$$\delta P_{гв}(B_m) = \Delta P_{уд.гв}(B_m) / P_{уд}(B_m) \cdot 100\%; \delta P_{вп}(B_m) = P_{уд.вп}(B_m) / P_{уд}(B_m) \cdot 100\%.$$

и зависимости относительного прироста потерь:

$$\delta P(B_m) = P_{уд.ст}(B_m) / P_{уд}(B_m) \cdot 100\%,$$

значения, которых при различных B_m размещены также в графе 7 табл.1.

Таблица 1

Экспериментальные данные удельных потерь $P_{уд}(B_m)$ в сплошном С№1 и со стыками при $m = 8$ для $f = 50$ и 100 Гц и расчетные значения прироста $P_{вп}$ при пересчете результатов измерения по формулам (5), (6) с $f = 50$ Гц на $f = 100$ Гц

	Потери в сплошном С№1		Потери в сердечнике С№1 со стыками, Вт/кг при числе пластин в шихтовке $m=8$								n
	$f=50$ Гц	$f=100$ Гц	$f=50$ Гц				$f=100$ Гц				
	Эксперимент		Эксперимент (рис.1.а, б)				Расчет по (5); (6)		Эксперимент		
B_m , Тл	$P_{уд}$, Вт/кг		$\Delta P_{уд.гв}$	$P_{уд.вп}$	$P_{уд.ст}$	δP , %	$\Delta P_{уд.гв}$	$P_{уд.вп}$	$P_{уд.ст}$	δP , %	
0,5	0,55	1,31	0,16	0,03	0,74	34,5	0,38	0,07	1,76	34,6	1,25
0,7	0,94	2,24	0,27	0,14	1,35	42,6	0,64	0,37	3,25	45,1	1,41
0,9	1,46	3,47	0,39	0,26	2,11	44,5	0,93	0,79	5,19	49,6	1,60
1,0	1,76	4,19	0,46	0,33	2,55	44,9	1,09	0,98	6,26	49,4	1,57
1,1	2,12	5,05	0,51	0,38	3,01	42,0	1,21	1,19	7,45	47,5	1,64
1,2	2,52	6,00	0,56	0,44	3,52	39,7	1,33	1,37	8,70	45,0	1,64
1,3	2,97	7,07	0,60	0,48	4,03	34,8	1,43	1,60	10,1	42,8	1,74
1,4	3,59	8,54	0,65	0,52	4,72	31,5	1,55	1,81	11,9	39,3	1,80
1,5	4,22	10,0	0,70	0,57	5,49	30,1	1,67	1,93	13,6	36,0	1,76

Анализ зависимости удельных потерь за один цикл перемагничивания $P_{уд}/f$ сплошного сердечника С№1 от частоты в диапазоне $f = (0 \div 100)$ Гц при различных B_m по точкам: $f = 0$ (измеренным на установке ВНС – 40С [4]) и $f = 50$ и 100 Гц (расчитанным по значениям в графах 2; 3 табл.1) показывает что они имеют строгий линейный характер.

Подтверждается правильность выводов для сталей с мелкокристаллической структурой [14], что: $P_{уд.г}(f) \equiv f$, а $P_{уд.в}(f) \equiv f^2$. Исходя из этого и с учетом долевых соотношений (3) получены выражения для потерь $P_{уд}$ в сплошном сердечнике из стали 2412 и прироста потерь

$\Delta P_{уд.гв}$ в сердечнике со стыками, позволяющие пересчитать экспериментальные значения $P_{уд}$ и $\Delta P_{уд.гв}$ для $f_1 = 50$ Гц при различных $B_m = const$ на повышенную частоту $f_2 = 100$ Гц:

$$P_{уд}(f_2) = P_{уд}(f_1) \cdot [0,81 \left(\frac{f_2}{f_1}\right) + 0,19 \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2] = 2,38 P_{уд}(f_1) \quad (4)$$

$$\Delta P_{уд.гв}(f_2) = \Delta P_{уд.гв}(f_1) \cdot [0,81 \left(\frac{f_2}{f_1}\right) + 0,19 \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2] = 2,38 \Delta P_{уд.гв}(f_1) \quad (5)$$

Результаты пересчета для $f = 100$ Гц также сведены в табл.1: значения $\Delta P_{уд.гв}$ с использованием равенства (5) размещены в графе 8; значения $P_{уд}$, рассчитанные по выражению (4), совпадают с экспериментальными – в графе 3, доказывая правомерность применения формул (4), (5).

Экспериментальные величины $P_{уд}$ в графе 8 для С№ 1 со стыками позволили определить значения составляющей $P_{уд.вп}$ на $f = 100$ Гц. Выражение для расчета удельных потерь $P_{уд.вп}$ при различных $B_m = const$ для повышенной частоты f_2 следует из равенств (1), (2)

$$P_{уд.вп}(f_2) = P_{уд.ст}(f_2) - P_{уд}(f_2) - \Delta P_{уд.гв}(f_2) \quad (6)$$

Рассчитанные по (6) значения $P_{уд.вп}$ находятся в графе 9 (жирным шрифтом). В графе 11 расположены значения относительного прироста потерь $\delta P(B_m)$ С№ 1 со стыками при $m = 8$ и $f = 100$ Гц, имеющие тот же характер зависимости от B_m , что и при $f = 50$ Гц [4] (графа 7), но с увеличением максимума с 45% до 50% за счет возрастания доли, составляющей $P_{уд.вп}$.

Особенности формирования удельных потерь $P_{уд.вп}$ в стыках С№ 1 и возможности их снижения

С использованием логарифмирования значений $P_{уд.вп}$ и f при различных B_m в табл. 1 на границах интервала $f \in [50-100]$ Гц определены значения показателя степени n (графа 12 и рис. 3а) зависимости

$$P_{уд.вп}(f) \equiv (f)^n \quad (7)$$

которые соответствуют результатам [15] для резкого поверхностного эффекта (РПЭ).

В монографии Ламмеранера Й. и Штафля М. [15] для переменного магнитного потока в бесконечной проводящей пластине (при условии $l \gg b$) с удельной электропроводностью γ , плотностью σ , шириной b и длиной l и постоянной магнитной проницаемостью $\mu = const$ сформулировано условие РПЭ - $\xi > 4$, где ξ – коэффициент динамики, равный

$$\xi = b \sqrt{\pi f \mu \gamma} \quad (8)$$

На основании результатов [15] удельные потери в бесконечной пластине при РПЭ определяются по формуле

$$P_{уд.вп} = \pi^{1,5} / (2\sigma) \cdot B_m^2 \cdot b \cdot (f)^{1,5} \cdot \sqrt{\gamma / \mu} \quad (9)$$

В зонах, прилегающих к стыкам сердечника С№ 1, для составляющей потока Φ_n также наблюдается РПЭ: даже при низких значениях $\mu \leq 0,001$ Гн/м ($\mu' \leq 800$) для $b_1 = \Delta R = 0,0606$ м; $\gamma = 2 \cdot 10^6$ См/м и $f = 50$ Гц значения коэффициента динамики $\xi > 30$. В графе 12 при малых индукциях, где $\mu \approx const - B_m = (0,5-0,7)$ Тл $n \approx 1,5$, то есть $P_{уд.вп} \equiv (f)^{1,5}$, как в формуле (8). С ростом насыщения (нелинейности μ), при $B_m = (1,0 - 1,5)$ Тл значения показателя n зависимости (7) возрастают до $n = 1,6 - 1,8$ (рис. 3а).

Согласно формуле (9), при РПЭ для бесконечной пластины справедливо $P_{уд.вп} \equiv b$. Однако, необходимо учитывать, что в [15] рассматривается РПЭ с равномерным магнитным потоком в бесконечной пластине. В отличие от задачи Ламмеранера [15] в косом стыке поток Φ_n сосредоточен в узкой области на краю пластин сердечника, прилегающей к зоне их перекрытия. Рис. 2 поясняет картину перераспределения магнитного потока и вихревых токов от нормальной составляющей магнитного потока Φ_n в узкой области, непосредственно прилегающей к стыку (между вертикальными пунктирными линиями), для одного элемента позиции шихтовки «спрямленного» косого стыка толщиной ($m \cdot d$), шириной b , где d и b – толщина и ширина пластин сердечника. Своей наибольшей величины, меньше или равной основного потока зоны стыка:

$$\Phi_n \leq B_m \cdot m \cdot d \cdot b \quad (10)$$

магнитный поток Φ_n достигает в зоне перекрытия пластин t , а за её пределами в зоне стыка – вдвое меньше $\approx \frac{1}{2}\Phi_n$ (на рис. 2а силовые линии магнитной индукции сплошными линиями со стрелками). Знак неравенства в (10) обусловлен тем, что часть силовых линий магнитной индукции, возрастающая с падением μ при насыщении, проходит через воздушный зазор в стыке (на рис. 2а пунктирные силовые линии со стрелками). Пластины, находящиеся в перекрытии (на рис. 2б, справа), испытывают одновременное воздействие двух противоположно направленных потоков: Φ_n и $\frac{1}{2}\Phi_n$. В итоге, вихревые токи в каждой пластине в зоне стыка являются результатом воздействия только половинных потоков $\frac{1}{2}\Phi_n$ (рис. 2б). Из-за развития РПЭ контуры вихревых токов вытесняются за пределы действия потоков $\frac{1}{2}\Phi_n$ к наружным границам пластин (рис. 2б).

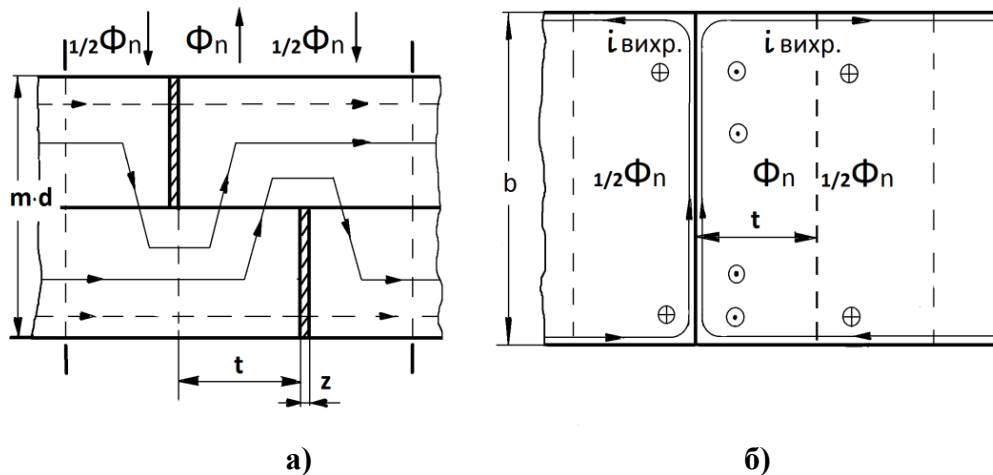


Рис. 2. а – Перераспределение магнитного потока в зоне стыка (b – ширина пластин сердечника, d – толщина, m – количество пластин в шихтовке и t – величина перекрытия); б – контуры вихревых токов $i_{\text{вихр.}}$ в зоне стыка от нормальной составляющей магнитного потока Φ_n

Как было отмечено в [3], среди многочисленных подходов к вопросу снижения потерь в стыках путем совершенствования их конструкции основное внимание уделено снижению индукции в зоне стыков и уменьшению длин участков, в которых индукция отклоняется от НП, варьированию числом пластин в шихтовке, минимизации числа стыков. Имеются решения по сокращению объема угловых участков и улучшению условий теплоотдачи за счет выполнения МС многорамными [2, 3]. Авторами не преследовалась цель снижения именно составляющей $P_{\text{уд.вл}}$ в стыках, хотя при этом происходило уменьшение ширины пластин МС. Известны также технические решения по снижению добавочных потерь от потоков рассеяния путем продольного расщепления наружной части пакета пластин МС мощных трансформаторов на несколько полос [16] или их перфорации по всей длине параллельными рядами продольных пунктирных прорезей [17], приводящие к уменьшению эквивалентной ширины пластин $b_{\text{э}}$, но только в наружной части пакета.

Для определения характера зависимости потерь $P_{\text{уд.вл}}$ в стыках от ширины пластин – b_1 сердечника С№ 1 проведены дополнительные исследования с изменением условий развития РПЭ. С этой целью в зоне стыков каждой пластины С№ 1 с учетом результатов исследования распределения магнитного поля в кольцевом анизотропном сердечнике из стали 2412 [18] установлены направления и размеры 5 специальных прорезей по ширине пластин b_1 с определенной шириной интервалов, условно показанные на рис. 3в. При этом эквивалентная ширина пластин сердечника в зоне стыков $b_{\text{э}}$, влияющая на развитие РПЭ и величину $P_{\text{уд.вл}}$ в соответствии с (8), (9), уменьшается: $b_{\text{э}} \approx b_1/6 = 0,01$ м.

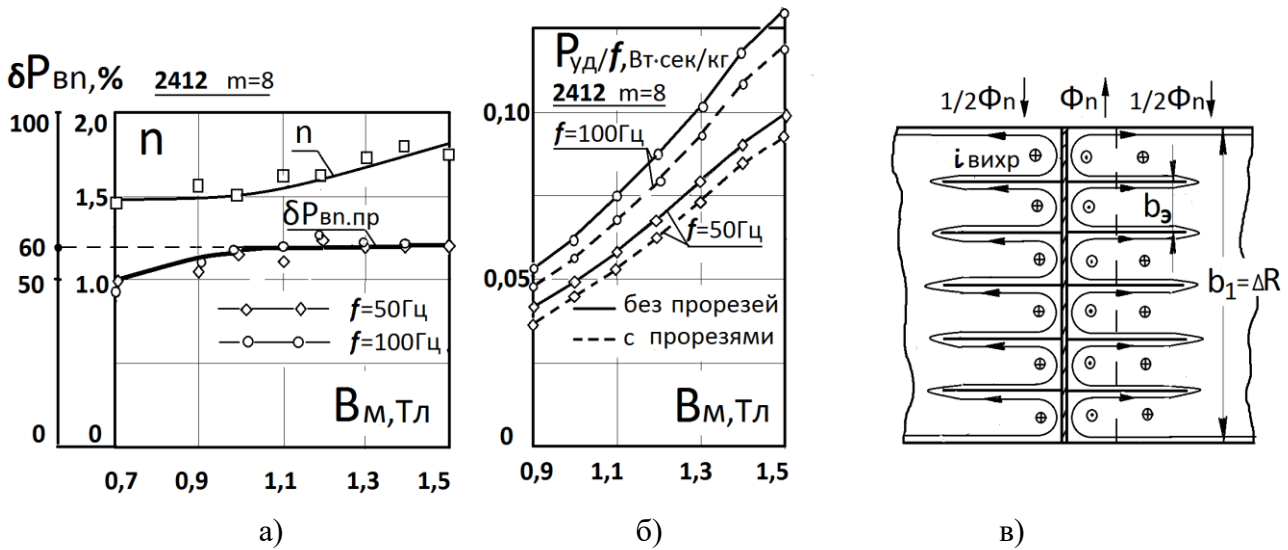


Рис. 3. а – Значения показателя степени n зависимости $P_{уд.вп}(f)$ (7) (табл. 1) и процента снижения потерь $\delta P_{вп.пр}$ в С№ 1 из стали 2412 с прорезями в зоне стыков при $m = 8$ и различных V_m (табл. 2); б – кривые удельных потерь за один цикл $P_{уд}/f$ от V_m в С№ 1 со стыками при $m = 8, f = 50$ и 100 Гц до и после нанесения прорезей (табл. 2); в – конфигурация контуров вихревых токов от потока Φ_n в зоне стыка со специальными прорезями

С целью исключения какого-либо влияния механического воздействия на магнитные свойства стали прорези выполнены электроэрозионным способом (латунной проволокой диаметром 0,1 мм). После сборки С№ 1 с прорезями в зоне стыков при $m = 8$ произведены измерения $P_{уд.пр}$ (V_m) на частотах $f = 50$ и 100 Гц. Результаты измерения до и после нанесения прорезей сведены в табл. 2.

Таблица 2

Снижение удельных потерь на вихревые токи $\delta P_{вп}(V_m)$ от нормальной составляющей магнитного потока в стыках С№ 1 при $m = 8$ на частотах $f = 50$ и 100 Гц после нанесения специальных прорезей в зоне стыков

V_m , Тл	Удельные потери, Вт/кг при $f=50$ Гц						Удельные потери, Вт/кг при $f=100$ Гц					
	$P_{уд ст}$	$P_{уд пр}$	$P_{уд вл}$	$\Delta P_{уд пр}$	$P_{уд вл.пр}$	$\delta P_{вп пр, \%}$	$P_{уд ст}$	$P_{уд пр}$	$P_{уд вл}$	$\Delta P_{уд пр}$	$P_{уд вл.пр}$	$\delta P_{вп пр, \%}$
0,9	2,11	1,97	0,26	0,14	0,12	53,8	5,19	4,75	0,79	0,44	0,35	55,7
1,0	2,55	2,36	0,33	0,19	0,14	57,6	6,26	5,69	0,98	0,57	0,41	58,2
1,1	3,01	2,79	0,38	0,22	0,16	57,9	7,45	6,70	1,19	0,75	0,44	63,0
1,2	3,52	3,25	0,44	0,27	0,17	61,4	8,70	7,82	1,37	0,88	0,49	64,1
1,3	4,03	3,74	0,48	0,29	0,19	60,4	10,1	9,14	1,60	0,96	0,64	60,0
1,4	4,72	4,41	0,52	0,31	0,21	59,6	11,9	10,8	1,81	1,10	0,71	60,7
1,5	5,49	4,92	0,57	0,35	0,22	61,4	13,6	12,4	1,93	1,18	0,75	61,1

На рис. 3б для сравнения представлены зависимости удельных потерь за один цикл перемещения $P_{уд}/f$ (V_m) на двух частотах до и после нанесения прорезей.

Снижение удельных потерь в С№ 1 с прорезями $\Delta P_{уд.пр}$ при различных V_m :

$$\Delta P_{уд.пр} = P_{уд.ст} - P_{уд.пр} \tag{11}$$

связано с уменьшением только одной составляющей – удельных потерь на вихревые токи в стыках с прорезями: $P_{уд.вл.пр}$ от потока Φ_n :

$$P_{уд.вл.пр} = P_{уд.вл} - \Delta P_{уд.пр} \tag{12}$$

На рис. 3а. для $f = 50$ и 100 Гц представлены кривые, а в табл. 2 значения относительного снижения прироста потерь в стыках с прорезями $\delta P_{вп.пр}(V_m)$ при различных V_m , равные:

$$\delta P_{\text{вп.пр}}(B_m) = \Delta P_{\text{уд.пр}}(B_m) / P_{\text{уд.вп}}(B_m) \cdot 100\% \quad (13)$$

Таким образом на обеих частотах относительное снижение потерь на вихревые токи в стыках от потока Φ_n при значениях индукции $B_m = (1,0 - 1,5)$ Тл составляет – $\delta P_{\text{вп.пр}} \approx 60\%$. При этом отношения значений удельных потерь на вихревые токи в стыках $P_{\text{уд.вп}}$ до и после нанесения прорезей при различных B_m равны:

$$P_{\text{уд.вп}} / P_{\text{уд.вп.пр}} \approx 2,5 \approx \sqrt{6} = \sqrt{b_1/b_э} \quad (14)$$

Значит потери $P_{\text{уд.вп}}$ в косых стыках пропорциональны:

$$P_{\text{уд.вп}} \equiv \sqrt{b} \quad (15)$$

Распространение результатов разделения прироста удельных потерь в стыках сердечника С№ 1 на сердечник С№ 2

Для корректного переноса результатов разделения прироста потерь в стыках кольцевого сердечника С№ 1 из мелкокристаллической динамной стали с мелкой ДС на П-образный сердечник С№ 2 из текстурованной стали с крупной полосовой ДС, необходимо учесть следующие рекомендации, касающиеся материала и конструкции магнитопроводов.

1. Дробление полосовой ДС текстурованных сталей с ростом частоты [12] приводит к нелинейному характеру зависимости от частоты удельных потерь за один цикл перемагничивания $P_{\text{уд}}/f$ и росту гистерезисных потерь за цикл $P_{\text{уд.г}}/f$ при $B_m = \text{const}$ и [13,14]. Наиболее значительное изменение ДС в соответствии с данными [14] (рис.4а) происходит на малых частотах – в диапазоне $f = (0 \div 5)$ Гц. С учетом результатов исследования особенностей динамического перемагничивания полосовой ДС [12] использование для гистерезисной составляющей удельных потерь $P_{\text{уд.г}}$ текстурованных сталей экспериментальных данных на основе статических петель дает заниженные результаты. Определение $P_{\text{уд.г}}$ в динамике (например, при $f = 50$ Гц) необходимо производить по методике, предложенной в [13]. На рис.4б приведены кривые удельных потерь $P_{\text{уд}}(B_m)$ и структурных составляющих $P_{\text{уд.г}}$ и $P_{\text{уд.в}}$ стали 3406, рассчитанные с использованием рекомендаций [13]. Для удобства анализа, как и в случае стали 2412(рис. 1а), последние представлены в виде зависимостей $P_{\text{уд}}/B_m$ (B_m). Здесь также с незначительным допущением можно принять условие неизменности отношения $P_{\text{уд.г}} / P_{\text{уд.в}}$ от индукции B_m , позволяющее объединять прирост удельных потерь в стыках от этих структурных составляющих в виде – $\Delta P_{\text{уд.гв}}$.

2. Как показано в первой части [4], насыщение магнитной характеристики $B_m(H_m)$ текстурованной стали 3406 наступает при больших значениях B_m , чем у динамной стали 2412 с разницей индукций $\Delta B \approx 0,35$ Тл, что и необходимо учитывать при пересчете относительных значений, составляющих прироста потерь в стыках $\delta P_{\text{вп}}$ и $\delta P_{\text{гв}}$ (табл. 3).

3. В соответствии с формулой (9), имеется зависимость составляющей прироста удельных потерь $P_{\text{уд.вп}}$ от параметров стали γ и μ . При этом для сталей 2412 и 3406 с одинаковым содержанием % Si удельная электропроводность γ остается неизменной [14]. Магнитная проницаемость μ в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки пластин, для холоднокатаных сталей принимает наименьшие значения независимо от степени текстуры [12]. Поэтому принимаем допущение, что зависимости $\mu(B_m)$ при намагничивании в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки, для холоднокатаных сталей с 3% Si одинаковые.

4. Значения составляющей прироста удельных потерь в стыках $\Delta P_{\text{уд.гв}}$ пропорциональны уровню удельных потерь в стали $\Delta P_{\text{уд.гв}} \equiv P_{\text{уд}}$. Это соответствует и физическим представлениям, и экспериментальным результатам [4], где уровень $\Delta P_{\text{уд}}$ при $m = 1$ для С№ 1 составляет от $P_{\text{уд}} \leq 10,8\%$; а для С№ 2 – $\leq 13\%$ (из-за большей доли составляющей $P_{\text{уд.вп}}$ в $\Delta P_{\text{уд}}$). С учетом близкого к линейному характеру зависимостей $P_{\text{уд}}/B_m(B_m)$ для обеих сталей: 2412 (рис.1а) и 3406 (рис.4б) принимаем величину отношения их удельных потерь в рабочем диапазоне индукций B_m неизменной.

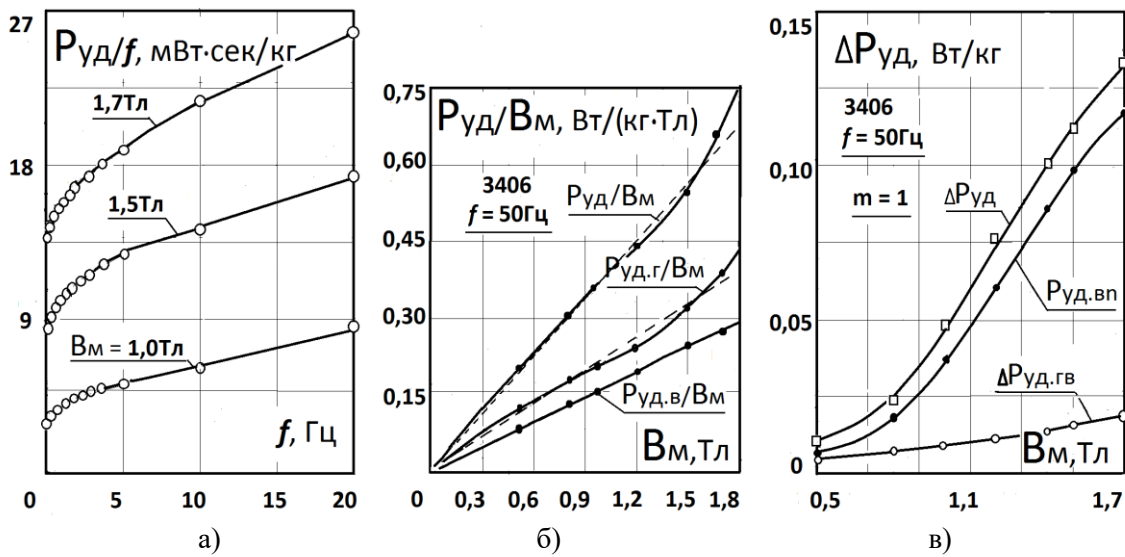


Рис. 4. а – зависимости удельных потерь за один цикл перемагничивания $P_{уд}/f$ от f при различных V_m текстурованной холоднокатаной стали в диапазоне частот $f = (0 \div 20)$ Гц по данным [14]; б – зависимости структурных составляющих удельных потерь $P_{уд}/V_m$ от V_m при $f = 50$ Гц в текстурованной стали 3406 с учетом влияния динамического дробления ДС; в – зависимости относительного прироста потерь $\delta P(V_m)$ в С.№ 2 из стали 3406 со стыками при $f = 50$ Гц и $m = 1$ и структурных составляющих $\delta P_{гв}(V_m)$ и $\delta P_{вп}(V_m)$

5. Из-за отличия конструкций МС степень влияния стыков на прирост удельных потерь $\Delta P_{уд}$ в разных сердечниках различна. Для сопоставления степени влияния стыков на прирост потерь в [4] введена величина q -кратность доли стыков в МС, как отношение объема стали зоны стыков $G_{ст}$ к общему объему стали сердечника G , которую удобно принять равной отношению суммарной длины стыков сердечника $L_{ст}$ к общей длине средней силовой линии $L_{ср}$:

$$q = L_{ст} / L_{ср} \tag{16}$$

6. При анализе результатов экспериментальных исследований сердечников С.№ 1 и С.№ 2 [4] была установлена зависимость прироста удельных потерь и их составляющих в стыке от толщины позиции шихтовки:

$$\Delta P_{уд} \equiv \Delta P_{уд.гв} \equiv P_{уд.вп} \equiv (m \cdot d)^{0,72} \tag{17}$$

7. И, наконец, настоящими исследованиями экспериментально определено наличие зависимости (15) прироста удельных потерь $P_{уд.вп}$ от ширины пластин сердечника b .

В соответствии с перечисленными рекомендациями получаем следующие формулы для пересчета относительных значений составляющих прироста удельных потерь $\delta P_{вп}$ и $\delta P_{гв}$ в сердечнике С.№ 2 по значениям сердечнике С.№ 2 при различных значениях V_m :

$$\delta P_{вп2} = \delta P_{вп1} \cdot K_p / (K_q \cdot K_m \cdot K_d \cdot K_b); \delta P_{гв2} = \delta P_{гв1} / (K_q \cdot K_m \cdot K_d) \tag{18}$$

$$\text{где } K_q = q_1 / q_2 = 1,68; K_m = \left(\frac{m_1}{m_2}\right)^{0,72} = 4,47; K_d = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0,72} = 1,44;$$

$$K_b = \sqrt{b_1/b_2} = 0,71; K_p = P_{уд.1} / P_{уд.2} = 5,11 \tag{19}$$

коэффициенты пересчета, значения которых для условий С.№ 1 и С.№ 2 определены в [4]. Результаты расчета прироста удельных потерь в стыках для $f = 50$ Гц и различных V_m в сердечнике С.№ 2 из стали 3406 при $m = 1$ на основе имеющихся данных о приросте потерь в стыках сердечника С.№ 1 из стали 2412 при $m = 8$ (табл. 1 и рис. 1а,б) и использования коэффициентов пересчета (18) и формул (17) сведены в табл. 3. Значения $\Delta P_{уд.гв.2}(V_m)$ и $P_{уд.вп.2}(V_m)$ выделены жирным шрифтом. Полученные зависимости прироста удельных потерь в стыках С.№ 2 проиллюстрированы графиками на рис.4в. Из табл. 3 следует увеличение значений отношения составляющих потерь $P_{уд.вп} / \Delta P_{уд.гв}$ с ростом V_m .

Таблица 3

Пересчет значений составляющих прироста удельных потерь с сердечника С№ 1 из стали 2412 ($m = 8$) на сердечник С№ 2 из стали 3406 ($m = 1$) при $f=50$ Гц и различных $Вм$

Вм	$\Delta В$	$\delta P_{Гв1}$	$\delta P_{Вн1}$	$\delta P_{Гв2}$	$\delta P_{Вн2}$	Руд.2	$\Delta P_{Руд.гв.2}$	$P_{Руд.вн.2}$	$\Delta P_{Руд.2}$	$P_{Руд.вн} / \Delta P_{Руд.гв}$
Тл		%		%		Вт/кг				
0,5	≈ 0	29	5,5	2,68	3,68	0,098	0,0026	0,0036	0,0062	1,4
0,8	- 0,20	29	11	2,68	7,33	0,235	0,0063	0,0172	0,0235	2,7
1,0	- 0,25	29	16	2,68	10,7	0,360	0,0097	0,0385	0,0482	4,0
1,2	- 0,30	26,7	17,8	2,42	11,9	0,531	0,0131	0,0632	0,0763	4,8
1,4	- 0,35	24	18	2,22	12,0	0,716	0,0159	0,0859	0,102	5,4
1,5	- 0,35	22,6	17,3	2,06	11,5	0,826	0,0170	0,0952	0,112	5,6
1,7	- 0,35	19	15,2	1,76	10,1	1,14	0,0201	0,115	0,135	5,7

Заключение о возможных вариантах снижения прироста потерь в стыках шихтованных сердечников

Таким образом, для снижения прироста удельных потерь $\Delta P_{Руд}$ в сердечнике со стыками необходимо использовать шихтовку с наименьшим значением m , применять сталь с наиболее низким уровнем удельных потерь $P_{1,7/50}$ ($P_{Руд}$ при $Вм = 1,7$ Тл и $f = 50$ Гц) и минимальных толщин d . При этом необходимо учитывать доминирующий уровень $P_{Руд.вн}$ в приросте удельных потерь в стыках $\Delta P_{Руд}$ (рис.4в). При ширине пластин $b_2 = 0,12$ м П-образного сердечника С№ 2 из текстурованной стали 3406 с отношением составляющих прироста потерь при $Вм = 1,7$ Тл $P_{Руд.вн}/\Delta P_{Руд.гв} = 5,7$ (табл. 3) доля $P_{Руд.вн}$ в приросте удельных потерь в стыках (2) составляет $\delta P_{Руд.вн} = 0,115/0,135 \cdot 100\% = 85\%$.

Если вместо стали 3406 с $d = 0,3$ мм и $P_{1,7/50} = 1,14$ Вт/кг в сердечнике С№ 2 при $m = 1$ взять лучшую по свойствам текстурованную сталь, например, с $P_{1,7/50} = 0,57$ Вт/кг при $d = 0,15$ мм (Япония) [8], то доля $P_{Руд.вн}$ в приросте удельных потерь $\Delta P_{Руд}$ еще более возрастет. Пример расчета составляющих прироста удельных потерь для такого варианта представлен в табл. 4. В случае использования формул (19), (20) с новыми значениями коэффициентов пересчета (18) при общем снижении $\Delta P_{Руд}$ в 1,78 раза получаем отношение $P_{Руд.вн}/\Delta P_{Руд.гв} = 11,4$, то есть с долей в приросте $\delta P_{Руд.вн} = 0,0697/0,0757 \cdot 100\% = 92\%$ (табл. 4).

Таблица 4

Пересчет значений составляющих прироста удельных потерь в С№ 2 для $m=1$ со стали 3406 на перспективную японскую сталь [8] при $f=50$ Гц и $Вм=1,7$ Тл

	q	m	$d, \text{мм}$	$P_{Руд}, \text{Вт/кг}$	$\Delta P_{Гв}, \text{Вт/кг}$	$P_{Вн}, \text{Вт/кг}$	$\Delta P_{Руд}, \text{Вт/кг}$
(1) - сталь 3406	1/3,7	1	0,3	1,14	0,0201	0,115	0,135
$Kq = 1$ $Km = 1$ $Kd = \left(\frac{0,3}{0,15}\right)^{0,72} = 1,65$ $Kb = 1$ $Kp = 1,14/0,57 = 2$	$P_{Вн(2)} = P_{Вн(1)}/(Kq \cdot Km \cdot Kd \cdot Kb) = 0,115/1,65 = 0,0697 [\text{Вт/кг}]$ (19) $\Delta P_{Гв(2)} = \Delta P_{Гв(1)}/(Kq \cdot Km \cdot Kd \cdot Kp) = 0,0201/3,3 = 0,00609 [\text{Вт/кг}]$ (20) $\Delta P_{Руд} (2) = \Delta P_{Гв(2)} + P_{Вн(2)} = 0,00609 + 0,0697 = 0,0758 [\text{Вт/кг}]$ Отношение: $P_{Вн(2)}/\Delta P_{Гв(2)} = 0,0697/0,00609 = 11,4$						
(2) - сталь Япон. [8]	1/3,7	1	0,15	0,57	0,00609	0,0697	0,0757

С увеличением ширины пластин b магнитопроводов (например, с ростом мощности трансформаторов) величина удельных потерь в стыках на вихревые токи $P_{Руд.вн}$ также возрастает в \sqrt{b} раз, тем самым обеспечивая общий прирост потерь $\Delta P_{Руд}$ в сердечниках. Для существенного снижения $P_{Руд.вн}$ в соответствии с (14), (15) по результатам расчета распределения

магнитного поля и проведенных экспериментов с С№ 1 можно рекомендовать определенным образом наносить прорезы на пластинах сердечников в зоне стыков.

Использование кольцевого шихтованного сердечника С№ 1 из холоднокатаной динамной стали 2412 и П-образного – С№ 2 из текстурованной стали 3406 с применением специальной методики эксперимента [4] позволили произвести разделение прироста потерь в косых стыках на структурные составляющие $\Delta P_{уд.гв}$ и $P_{уд.вл}$ (2), определить характер зависимости каждой составляющей от внутренних факторов (параметров стыка: перекрытия пластин t , технологического воздушного зазора z , ширины b и толщины пластин d и их числа в шихтовке m) и внешних (степени насыщения стали, связанной с величиной индукции B_m и уровня динамики, зависящего от частоты перемагничивания f). Фактически доказано, что основную часть прироста удельных потерь в стыках сердечников трансформаторов представляют потери $P_{уд.вл}$. Причем чем выше уровень магнитных свойств текстурованной стали, тем больше доля потерь $P_{уд.вл}$, зависящих практически только от параметров: d , m , b и удельной электропроводности стали γ (при заданных рабочих значениях B_m и f). Показана возможность контролируемого снижения $P_{уд.вл}$ в стыках путем нанесения в зоне стыков прорезей определенным образом на основании результатов расчета распределения магнитного поля.

В следующей части работы на основе результатов дополнительных исследований будут представлены материалы о возможности прогнозирования прироста удельных потерь в стыках шихтованных сердечников.

Библиографический список

1. **Лизунов, С.Д.** Итоги Сессии СИГРЭ 1988 г. Трансформаторостроение / С.Д. Лизунов // Электричество. – 1989. – №8. – С. 37 – 45.
2. **Тихомиров, П.М.** Расчет трансформаторов / П.М Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
3. **Кравченко, А.Н.** Анализ эффективности мероприятий по снижению добавочных потерь в мощных силовых трансформаторах / А.Н. Кравченко // Соврем. пробл. энерг. Электроэнерг. Оборуд.: Тезисы докладов Четвертой респ. научн.-техн. конф. – Киев, 1985. – С. 88-89.
4. **Калинин, Е.В.** Потери в стыках шихтованных сердечников. Часть 1. Экспериментальное исследование основных влияющих факторов прироста электромагнитных потерь / Е.В. Калинин // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник статей. – Нижний Новгород, 2018. – С. 53-61.
5. **Калинин, Е.В.** Исследование влияния стыков на потери в шихтованных сердечниках / Е.В. Калинин, О.А. Любарский // Электропривод и автоматизация промышленных установок. Межвуз. сборник научных трудов – Нижний Новгород, 1987. – С. 51-55.
6. **Bavay, J.C.** Les tôles magnétiques á orientés. L'amélioration des performances / J.C. Bavay // Rev. Gen. Elec. – 1989. – № 11. – P. 32 – 36, VII.
7. **Takahashi, N.** Production of very low core loss grain-oriented silicon steel / N. Takahashi, Y. Ushigami // IEEE Trans. Magn. – 1986. – 22, № 5. – P. 490-495.
8. **Nosawa, T.** Magnetic properties and domain structures in domain refined grain-oriented silicon steel / T. Nosawa, Y. Matsuo // J. Appl. Phys. – 1988. – 63, № 8, Pt. 2A. – P.2966-2970.
9. **Černý, V.** Příspěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů / V. Černý // Elektrotechnický obzor, SV72. – 1983. – № 11. – S. 651-652.
10. **Nakata, T.** Магнитные характеристики стыков сегментов сердечника статора / T. Nakata, Y. Kawase, S. Moriyasa // Дэнки гаккай ромбунси, Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. – 1987. – D 107, № 1. – P. 109-114.
11. **Qader, A.A.** Building factor of a 100 kVA 3 phase distribution transformer core / A.A. Qader, A. Basak // IEEE Trans. Magn. – 1982. – 18, № 6. – P. 1487-1489.
12. **Зайкова, В.А.** Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей / В.А. Зайкова, И.Е. Старцева, Б.Н. Филиппов. – М.: Наука, 1992. – 272с.
13. **Калинин, Е.В.** Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Часть 1. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей / Е.В. Калинин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 96-105.
14. **Дружинин, В.В.** Магнитные свойства электротехнических сталей / В.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

15. Ламмеранер, Й. Вихревые токи / Й. Ламмеранер, М. Штафль. – М.: Энергия, 1967. – 208 с.
16. Sharples, K.O. A study of the effect of core slitting on the power loss density in the limbs of generator transformers / K.O. Sharples // Proc. Int. Conf. Elec.Mach., Budapest, 5-9 Sept., 1982. Pt. 2. – Budapest, 1982. – P. 700-702.
17. Čech, D. Kovový pás pro magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů a způsob jeho výroby / D. Čech, V. Havlíček, // А.с. 239285. ЧССР. Заявл. 02.09.83, № PV6403-83, опубл. 16.02.87. МКИ Н 01 F 3/4.
18. Калинин, Е.В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Часть 2. Экспериментальное обоснование применения при расчетах магнитного поля векторных характеристик намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей / Е.В. Калинин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 3 (122). – С.71-80.

Дата поступления
в редакцию 27.09.2018 г.

E.V. Kalinin, E.A. Chernov

LOSSES AT THE JOINTS OF LAMINATED CORES. INVESTIGATION OF THE POSSIBILITIES OF REDUCING THE INCREASE OF LOSSES

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

Purpose: To analyze the influence of various factors on the increase in losses in the oblique joints to reduce losses in the laminated cores of powerful power transformers from cold-rolled electrical steel.

Methodology: Experimental study of the increase in specific losses $\Delta P_{уд}$ as the difference in specific losses: first, a continuous ring-shaped laminated core (without joints) - $P_{уд}$, and then this core with the joints - $P_{уд.ст}$, at different values of the amplitude of the magnetic induction B_m at two frequencies $f=50$ and 400Hz . Used unconventional structural components of the growth of specific losses: $\Delta P_{уд.гв}$ – on hysteresis and eddy currents from redistribution of the main (tangential) magnetic flux and $\Delta P_{уд.вн}$ – on eddy currents from normal component of the magnetic flux in the joint.

Results: The correctness of the use of the selected structure of the increase in losses in oblique joints is confirmed. It is revealed that for cores made of textured steels the main part of the increase in specific losses (>85%) falls on the component of $\Delta P_{уд.вн}$. Measures are proposed to reduce the increase in losses at the joints.

The value of research: It is shown that the dynamics of energy processes associated with the formation of $\Delta P_{уд.вн}$ consistent with a sharp surface effect. A significant reduction of $\Delta P_{уд.вн}$ was experimentally obtained by drawing on a core of the plate in the joint zone of the special slits.

Novelty / value: Proposed structure of the growth of specific losses in the oblique joints of laminated cores and the feature of the character of the dependence of the components of $\Delta P_{уд.гв}$ and $\Delta P_{уд.вн}$ from B_m and f . Practical recommendations for significant reduction of $\Delta P_{уд}$ in powerful power transformers are given.

Keywords: laminated transformer cores, cold-rolled electrical steel, oblique joints, experimental study, reduce losses, special slits.