

УДК 621.314

Е.В. Калинин, А.И. Чивенков

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СТЫКОВ ШИХТОВАННЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Применительно к магнитным системам силовых трансформаторов проводится сравнительный анализ электромагнитных процессов и потерь в стыках для наиболее широко используемых конструкций стыков: косых стыков внахлест типа «butt-lap» и перспективных ступенчатых стыков типа «step-lap». Предлагается использовать структурный подход к потерям в стыках как сумме потерь в стали, включающих тангенциальную и нормальную составляющие магнитного потока в зоне стыков. Показано, что потери на вихревые токи от нормального потока формируются в условиях резкого поверхностного эффекта и преобладают в общих потерях в стыках. Наиболее высоким их уровень оказывается для ступенчатых стыков. Проведены экспериментальные исследования с использованием физической модели динамических процессов в стыках от нормальной составляющей магнитного потока при резком поверхностном эффекте. Получены зависимости потерь в стыках от нормального потока от ширины пластин магнитной системы и физических свойств стали. Показано наличие эффекта компенсации потерь на вихревые токи от встречных нормальных магнитных потоков на концах пластин при стыках внахлест типа «butt-lap», возрастающего с ростом динамики перемагничивания. Отмечается на отсутствие этого эффекта в ступенчатых стыках типа «step-lap», имеющих на концах пластин согласные нормальные потоки. Дается объяснение, почему применение лучших марок текстурованных электротехнических сталей не дает преимуществ при использовании ступенчатой конструкции стыков типа «step-lap». Предлагается общее решение для снижения прироста потерь в стыках рассматриваемых конструкций.

**Ключевые слова:** косые стыки внахлест, потери в стыках, резкий поверхностный эффект, силовой трансформатор, ступенчатые стыки, холоднокатаная электротехническая сталь, шихтованная магнитная система, экспериментальное исследование.

### 1. Введение

Потери в стыках шихтованных сердечников являются одной из главных причин увеличения потерь холостого хода силовых трансформаторов, которое может составлять до 30 %. Применение лучших марок хо-

лоднокатанных электротехнических сталей в перспективных шихтованных трансформаторах целесообразно только при комплексном подходе, предполагающем и совершенствование конструкций стыков. Так, переход в конструкциях сердечников от использования горячекатаных текстурованных сталей к холоднокатаным стал стал успешным только после замены формы стыков с прямых на косые и комбинированные внахлест типа «butt-lap» [1]. Улучшение конструкций стыков затрудняется без правильного понимания особенностей процессов формирования потерь с соответствующей этим процессам структурой прироста удельных потерь в стыке  $\Delta P_{уд}$  [2, 3].

В работах [4-6] для этого обосновывается применение следующих нетрадиционных структурных составляющих прироста удельных потерь  $\Delta P_{уд}$ : прироста объединенных удельных потерь на гистерезис и вихревые токи в стыках  $\Delta P_{уд.гв}$  от уплотнения основного тангенциального магнитного потока  $\Phi_t$ ; удельных потерь на вихревые токи от нормальной составляющей потока  $P_{уд.вн}$  в стыках  $\Phi_n$ . В работе [5] показано, что основная доля прироста  $\Delta P_{уд}$ , а это более 85 %, приходится на потери  $P_{уд.вн}$ . Отмечается возрастание доминирования  $P_{уд.вн}$  в стыках в случае применения текстурованных сталей более лучших свойств с меньшими удельными потерями. На еще большее возрастание потерь  $P_{уд.вн}$  в стыках указывается применительно к новой, ступенчатой конструкции стыков типа «step-lap» [7, 8], где снижение доли прироста от уплотнения потока в стыках не в состоянии компенсировать увеличение доли  $P_{уд.вн}$  [8].

Как отмечено в [1, 9], многочисленные мероприятия, проводимые для снижения прироста удельных потерь в стыках магнитной системы, связаны с уменьшением составляющих путем разгрузки зон стыков от перераспределения  $\Phi_t$ ; уменьшением длин участков отклонения индукции от направления прокатки текстурованной стали; варьирования числа пластин в шихтовке; минимизации количества стыков. Имеющиеся предложения по снижению прироста потерь от потоков  $\Phi_n$  за счет перфорации крайних пластин пакетах магнитной системы по всей длине продольными пунктирными прорезями [10] или их расщеплением на более узкие полосы [11], направлены на решение проблемы снижения дополнительных потерь на вихревые токи от потоков рассеяния мощных силовых трансформаторов.

Экспериментальное изучение потерь в стыках сталкивается с существенными проблемами, связанными с трудностями малоугловых измерений потерь холостого хода трансформаторов [12] и влиянием на них множества факторов, включая технологические [8, 13]. Применение холоднокатаных текстурованных сталей существенно осложнило экспериментальные исследования электромагнитных процессов силовых трансформаторов по целому ряду причин [14, 15]: низкий уровень удельных потерь в направлении прокатки и резко выраженная анизотропия магнитных свойств; нали-

чие чувствительной крупной полосовой доменной структуры, измельчающейся с ростом динамики перемагничивания  $db/dt$  и под действием механических напряжений. Как следствие, возникает зависимость от частоты перемагничивания  $f$  составляющих потерь на гистерезис и вихревые токи, и дополнительные аномальные потери на вихревые токи, связанные с движением доменных стенок.

Все перечисленное затрудняет оценку потерь в стыках путем прямых измерений или делает их практически невозможным.

В работе [16] дается описание и обосновывается использование физической модели, позволяющей отдельно исследовать составляющую потерь на вихревые токи в стыках  $P_{вн}$  от нормального магнитного потока в условиях динамики, отличающейся резким поверхностным эффектом (РПЭ) в проводящей пластине [5, 17]. Результаты моделирования потерь  $P_{вн}$  на образцах в виде прямоугольных пластин из меди М1 и стали Ст.3 хорошо согласуются с линейной теорией поверхностного эффекта [17]. На основе измерений получены уточненные значения относительной магнитной проницаемости стали в перпендикулярном направлении к плоскости пластины. Установлен эффект частичной компенсации вихревых токов и связанных с ними потерь  $P_{вн}$  в стыках внахлест типа «butt-lap».

## II. Постановка задачи

В работе [16] на основе проведенного физического моделирования обоснована возможность существенно упростить оценку потерь  $P_{вн}$  в косых стыках внахлест типа «butt-lap» с встречными нормальными магнитными потоками по краям пластин. Внедрение ступенчатых стыков типа «step-lap» с согласованными нормальными потоками на концах пластин и обсуждение увеличения в них потерь  $P_{вн}$  [8] делает желательным распространить результаты исследований на случай согласованных потоков  $\Phi_n$ , полученные на физической модели при действии встречных потоков  $\Phi_n$  на концах пластин.

Для пояснения на рис. 1 представлена картина распределения магнитной индукции в условно «развернутых» косых стыках, соответственно, внахлест типа «butt-lap» и ступенчатых типа «step-lap». Стрелками указаны направления силовых линий индукции в некоторый произвольный момент времени. Для упрощения можно пренебречь прохождением силовых линий индукции через воздушные зазоры. Цифрами 1 и 2 отмечены соответствующие отдельные позиции шихтовки толщиной  $(m \cdot d)$ , где  $m$  – количество пластин в позиции, а  $d$  – толщина пластин. Окружностями выделены зоны перехода нормальной составляющей магнитного потока в соседние слои шихтовки. Как видим, характер распределения индукции в зоне стыков внахлест и ступенчатых существенно различается.

С учетом симметрии конструкции стыков внахлест (рис. 1, а), магнитный поток  $\Phi_\tau$  разделяется на два равных половинных нормальных потока  $1/2 \Phi_n$  при переходе в соседние слои (вверх и вниз) на каждом из концов пластин позиции 1. Верхние половинные потоки  $1/2 \Phi_n$  позиции 1 слева и справа имеют встречные направления. Встречными также являются и нижние половинные потоки  $1/2 \Phi_n$  на концах позиции 1, что и обосновано в [16]. Наличие встречных нормальных потоков объясняет возможность факта частичной компенсации вихревых токов и потерь  $P_{вн}$  при РПЭ в стыках типа «butt-lap».

При ступенчатой конструкции стыков поток  $\Phi_\tau$  позиции 2 при переходе в соседние слои поворачивает только в одном направлении (рис. 1, б) с полной величиной  $\Phi_n$  [7]. Таким образом, он оказывается практически вдвое больше, чем в стыках внахлест. В отличие от стыков типа «butt-lap» потоки  $\Phi_n$  по обоим краям позиции 2 имеют одинаковое (согласованное) направление, что исключает возможность частичной компенсации потерь  $P_{вн}$  при РПЭ в стыках типа «step-lap».

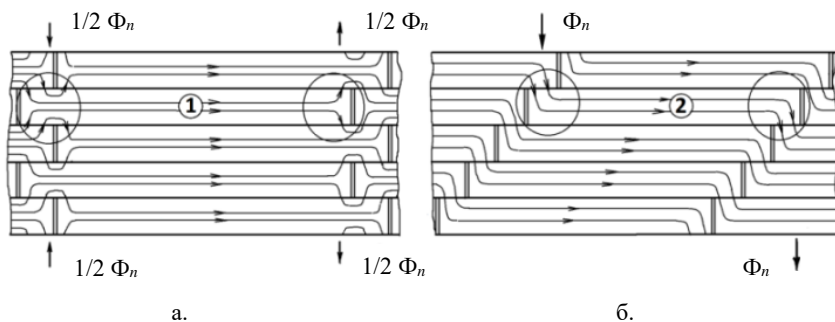


Рис. 1. Нормальные составляющие магнитного потока  $\Phi_n$  на концах пластин в шихтованных магнитных системах со стыками типа: «butt-lap» (а); «step-lap» (б)

Необходимо учитывать условия РПЭ от действия нормальной составляющей переменного магнитного потока в зоне стыков, определяемые коэффициентом динамики  $\xi$ . Значения  $\xi$  определяются по формуле [17]:

$$\xi = l \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma}, \quad (1)$$

где  $l$  – меньший линейный размер, равный ширине пластин сердечника  $b$  [4-6, 16];  $l = b$ ;  $\mu = \mu_1 = \mu_1' \cdot \mu^0$  – магнитная проницаемость в направлении действия магнитного потока  $\Phi_n$  (перпендикулярно плоскости прокатки

пластин), равная произведению относительной магнитной проницаемости  $\mu_{\perp}'$  на проницаемость вакуума  $\mu^0$ ;  $\gamma$  – удельная электропроводность материала пластины.

Таким образом, коэффициент динамики  $\xi$  зависит от реальных значений  $\mu_{\perp}'$  и  $\gamma$  материала пластин. Удельная электропроводность  $\gamma$  является структурно нечувствительной величиной, но зависит от процента содержания кремния [14, 15]. Для текстурованных сталей с 3% Si она равна  $\gamma \approx 2 \cdot 10^6$  См/м. Относительная магнитная проницаемость  $\mu_{\perp}'$  для текстурованных сталей остается слабо изученной в виду сложности экспериментального определения. Как показали результаты исследования [16], потери  $P_{\text{вл}}$  при РПЭ сильно зависят от величин  $\gamma$  и  $\mu_{\perp}'$ .

Важной задачей настоящей работы является поиск решений по снижению потерь  $P_{\text{вл}}$  в стыках на основе использования физической модели. Предстоит также выработать рекомендации для оптимизации величины потерь  $P_{\text{вл}}$  в шихтованных сердечниках со стыками внахлест типа «butter-lap» и ступенчатыми типа «step-lap».

### III. Результаты исследования на физической модели

Физическая модель представляет намагничивающее устройство (НУ). Устройство имеет вид разрезанного на два полукольца ленточного ярма с намагничивающей  $W_{\text{н}}$  и локальной измерительной  $W_{\text{л}}$  обмотками (рис. 2, а), а также сменными образцами. Образец имеют форму прямоугольной пластины шириной  $b = 100$  мм, такой же, как длина полюсов ярма, и длиной  $L = 165$  мм в соответствии с продольным размером НУ (рис. 2, б). Образец помещается в плоскости разреза ярма между полюсами, имеющими ширину  $L_{\text{пол}} = 16$  мм. Потери  $P_{\text{вл}}$  в испытуемом образце определяются из условия баланса мощностей:

$$P_{\text{вл}} = P_{\text{п}} - (P_{\text{м}} + P_{\text{ст}}), \quad (2)$$

где  $P_{\text{п}}$  – полные потери в электрической цепи, а  $P_{\text{м}}$  и  $P_{\text{ст}}$  – потери в меди и стали.

Подробное описание модели и измерений на ней изложено в предыдущей публикации [16].

Для испытаний на частоте  $f = 50$  Гц также используются образцы из стали марки Ст.3,  $d = 1,5$  мм;  $\mu_{\perp}' \approx 40$ ;  $\gamma = 1 \cdot 10^7$  См/м; значение  $\xi = 28$ .

С учетом результатов [6] по снижению  $P_{\text{уд.вл}}$  при продольном рассеянии пластин наиболее важным представляется изучение характера  $P_{\text{уд.вл}}(N)$  при изменении их количества  $N$  в зависимости от коэффициента динамики  $\xi$ .

Комплект стальных пластин изготовлен лазерной резкой (ширина прорезей  $h_{пр} \leq 0,2$  мм) и включает образцы (100 x 165) мм: без рассечения (сплошного) и с разным количеством рассечений: – 1; 3; 5; 7; 11, разделяющих ширину образца на равные части с числом  $N = 2; 4; 8; 12$ . При проведении экспериментов с целью сохранения целостности стальной пластины центральная часть образца оставлена нерассеченной (рис. 2, б).

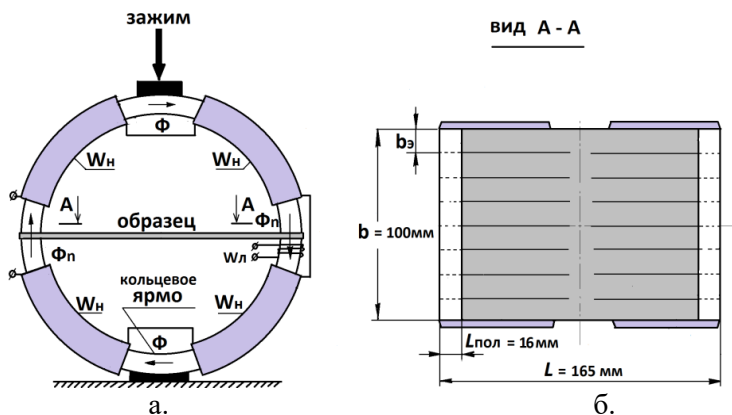


Рис. 2. Намагничивающее устройство с образцом между полюсами (а); образец для исследования потерь на вихревые токи  $P_{вн}$  (б)

Пример расчета по экспериментальным значениям для сплошного (базового) образца представлен в табл. 1. Все исследованные образцы испытаны аналогичным образом в этом же диапазоне значений средних по сечению амплитуд индукции  $B_{м.ср}$  (в контрольных точках значений электродвижущей силы  $E$ , определяемых по обмотке  $W_{л}$ ).

Таблица 1.  
Значения потерь  $P_{вн}$  в базовом образце из Ст.3 при различных величинах  $B_{м.ср}$

$E$ , мВ	$B_{м.ср}$ , Тл	$P_{п}$ , Вт	$P_{м}$ , Вт	$P_{ст}$ , Вт	$P_{вн}$ , Вт
300	0,297	8,0	0,32	1,30	6,38
400	0,396	15,2	0,58	2,15	12,50
500	0,495	24,5	0,87	3,32	20,30
600	0,594	36,5	1,33	4,86	30,30
700	0,693	50,5	2,03	6,84	41,50

При дальнейшем исследовании использован метод оценки результатов экспериментов, приведенных к относительным величинам. Такой подход является предпочтительным, поскольку не зависит от абсолютных значений измеряемых величин, позволяя устанавливать общие закономерности процессов. В качестве таких переменных в относительных единицах принимаются:

- $N \approx b / b_3$ , – количество частей с эквивалентной шириной  $b_3$ , на которые прорезы делятся образцы шириной  $b$  (рис. 2, б);
- $P_{\text{вл}}^* = P_{\text{вл.пр}} / P_{\text{вл}}$  – относительные значения потерь  $P_{\text{вл.пр}}$  в расщепленных образцах (при  $N > 1$ ) к базовым потерям  $P_{\text{вл}}$  в сплошном образце.

Относительные значений  $P_{\text{вл}}^*$  образцов из стали Ст.3 при различных индукциях в исследуемом диапазоне  $V_{\text{м.ср}} = (0,3-0,7)$  Тл оказались очень близкими. Это позволило обобщить результаты экспериментов в виде усредненных значений  $P_{\text{вл}}^*$  и введённого понятия  $S$  – показателя степени зависимостей относительного снижения потерь.

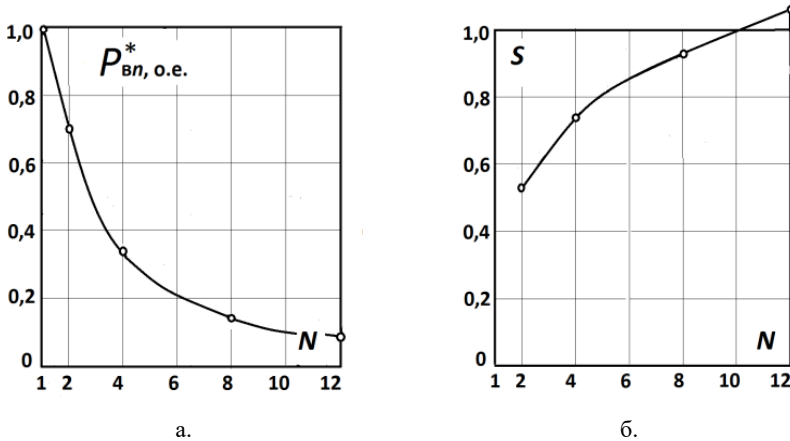


Рис. 3. Зависимости  $P^*$  в  $n$  ( $N$ ) (а) и  $S(N)$  (б)

Зависимости  $P_{\text{вл}}^*(N)$  на рис. 3, а показывают, что с ростом  $N$  потери асимптотически уменьшаются. Снижение потерь  $P_{\text{вл}}$  существенно зависит от количества расщепленных частей  $N$ ; при  $N > 10$  снижение происходит практически на порядок. На рис. 3, б представлены кривые  $S(N)$ . При этом  $S$  является показателем степени зависимостей относительного снижения потерь  $P_{\text{вл}}^*(N)$  вида:

$$P_{\text{вл}}^*(N) = \left(\frac{1}{N}\right)^S, \quad (3)$$

где значения  $S$  найдены путем логарифмирования выражения (3):

$$S = \frac{\lg(P_{\text{вл}}^*)}{\lg(1/N)}.$$

Ранее в работе [5], по результатам экспериментального исследования влияния прорезей на потери  $P_{\text{вл}}$  в стыках кольцевого шихтованного сердечника из стали 2412 при  $N = 6$ , было получено значение показателя степени  $S \approx 0,5$ . При действии равномерного потока в линейной бесконечной пластине [17] значение  $S = 1$ . В соответствии с настоящими исследованиями (рис. 3, б), при рассечении стальной пластины для различных  $N$ , значения показателя степени  $S$  также находятся в интервале  $0,5 \leq S \leq 1$ .

Как следует из формулы (2), с учетом зависимости  $b_s \approx b/N$  увеличение  $N$  приводит к пропорциональному уменьшению значений коэффициента динамики  $\xi$ . Таким образом, наличие факта нарастающего характера зависимостей  $S(N)$  на рис. 3, б указывает на повышение интенсивности снижения потерь  $P_{\text{вл}}^*$  при пропорциональном ослаблении резкого поверхностного эффекта РПЭ.

Отличительной особенностью действия РПЭ в стыках внахлест типа «butt-lap» является наличие встречных потоков  $\Phi_n$  (рис. 1, а). С целью установления на физической модели зависимости эффекта компенсации вихревых токов от динамики перемагничивания, образцы с  $N = 1$  ( $\xi = 28$ ) и  $N = 2; 4; 8$  ( $\xi = 14; 7; 3, 5$ ) разрезали поперек на две равные части, как и в [16]. При этом исключается возможность протекания вихревых токов с контурами, замыкающимися по всему периметру пластин. Проведенные измерения потерь на разрезанных поперек образцах  $P_{\text{вл.р}}$  при различных  $N$  подтверждают увеличение потерь в пластинах при их поперечном рассечении [16]. Установлен характер зависимости относительного снижения потерь  $\delta P_{\text{вл}}$  неразрезанных образцов от коэффициента динамики  $\xi$ :

$$\delta P_{\text{вл}}(\xi) = [P_{\text{вл.р}}(\xi) - P_{\text{вл}}] / P_{\text{вл}} \cdot 100\%.$$

Наибольшая компенсация потерь на уровне  $\delta P_{\text{вл}} = (18-19)\%$  имеет место в сплошной пластине ( $N = 1$ ) при  $\xi = 28$  при соотношении линейных размеров пластины  $L/b = 1,65$ . На рис. 4, а кривая  $\delta P_{\text{вл}}(\xi)$  исследованных образцов, на которой для удобства отображения шкала  $\xi$  представлена в логарифмическом масштабе. Как следует из анализа зависимости  $\delta P_{\text{вл}}(\xi)$ , эффект компенсации монотонно спадает до нуля при  $\xi < 4$ .

Таким образом, подтверждается факт эффекта частичного снижения прироста потерь  $P_{\text{вл}}$  в стыках [16], имеющего место при встречных потоках



$\Phi_n$ , стыков внахлест типа «butt-lap». Это особенно выражено при высоком уровне самих потерь  $P_{вн}$  и больших значениях коэффициента динамики  $\xi$ .

#### IV. Обсуждение итогов снижения потерь в стыках

1. С увеличением количества числа расщепленных частей  $N$  образцов из стали шириной  $b_s$ , пропорционально уменьшается коэффициент динамики  $\xi$  для вихревых токов от нормального потока  $\Phi_n$ , и спадает до нуля эффект компенсации потерь  $P_{вн}$  от встречных потоков  $\Phi_n$ . Это объясняется тем, что с ростом  $N$  при расщеплении пластин все большая часть вихревых токов замыкается внутри отдельных расщепленных частей. На рис. 4, в изображены прямоугольные образцы с обозначением контуров, по которым замыкаются вихревые токи под действием индукции  $\bar{B}_n$  в зоне расположения полюсов НУ (показано пунктиром): сверху – в сплошном образце с  $N = 1$ , снизу – при расщеплении с  $N = 8$ .

2. При размещении в НУ сплошных образцов рост индукции  $B_{м.ср}$  и общих потерь  $P_{т}$  сопровождается появлением значительного шума и вибраций всей установки. С увеличением числа расщепленных частей  $N$  образцов кроме снижения потерь также зарегистрировано существенное уменьшение шума и вибрации НУ.

Все это будет иметь место и в пластинах шихтованной магнитной системы трансформатора.

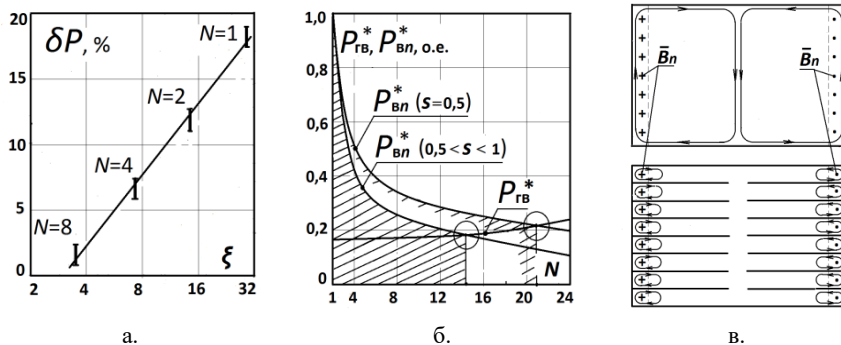


Рис. 4. Зависимость процента компенсации потерь  $\delta P_{вн}$  ( $\xi$ ) (а); зависимости соотношения составляющих относительного прироста потерь в стыках  $\delta P_{вн}(N)$  и  $\delta P_{гв}(N)$  (б); контуры протекания вихревых токов в сплошном образце и с прорезями при  $N = 8$  (в)

3. В связи с экспоненциальным характером зависимостей  $P_{вн}^*(N)$  возникает вопрос определения значения  $N$  для оптимального снижения общего прироста удельных потерь в стыках.

Рассмотрим влияние рассечения пластин на прирост удельных потерь  $\Delta P_{\text{уд.гв}}$  в стыках. Установлено, что с ростом  $N$  уменьшается фактическая ширина  $b_{\phi}$ , и общее сечение пластин на пути рабочего потока  $\Phi_r$  из-за конечной ширины прорезей лазером  $h_{\text{пр}}$ :

$$b_{\phi} = b - h_{\text{пр}} \cdot (N - 1).$$

Но даже при  $N = 30$  и  $b \geq 100$  мм при  $h_{\text{пр}} = 0,2$  мм дополнительное расчетное уплотнение потока  $\Phi_r$  в зоне стыка от уменьшения сечения составляет не более 6 %.

В работе [6] показано, что в зоне перекрытия стыков направления вектора рабочей индукции  $B_r$  составляют с направлением прокатки незначительные углы  $\alpha$ , которые при высокой степени анизотропии современных текстурованных сталей [18] не превышают значений  $\alpha \leq (5-7)^\circ$ . Влияние прорезей, ориентированных вдоль направления прокатки, при достаточно больших количествах  $N$  может только уменьшить значения угла  $\alpha$ .

Незначительное увеличение прироста  $\Delta P_{\text{уд.гв}}$  от  $N$  произойдет из-за ухудшения магнитных свойств и удельных потерь стали от термического и механического воздействий в узких областях, прилегающих к прорезям.

Для удобства сравнительного анализа прирост потерь  $\Delta P_{\text{уд.гв}}$  также приведены к относительному виду:

$$P_{\text{гв}}^* = \frac{\Delta P_{\text{уд.гв}}}{P_{\text{уд.вл}}} = \frac{\Delta P_{\text{гв}}}{P_{\text{вл}}},$$

где  $P_{\text{гв}}^*$  – относительное значение прироста для различных значений  $N$ . Зависимость  $P_{\text{гв}}^*(N)$  представлена на рис. 4, б. Уровень  $P_{\text{гв}}^*$  при отсутствии прорезей ( $N = 1$ ) соответствует соотношению прироста удельных потерь  $\Delta P_{\text{уд.гв}}$  и  $P_{\text{уд.вл}}$  в стыках для стали 3409 при  $B_{\text{м.ср}} = 1,7$  Тл [5]. Кривая  $P_{\text{гв}}^*(N)$  на рис. 4, б, сопоставляется с зависимостями относительного снижения потерь  $P_{\text{вл}}^*(N)$  для стыков внахлест. Верхняя кривая  $P_{\text{вл}}^*(N)$  построена на основе результатов исследований [5] и соответствует коэффициенту  $S = 0,5$  при высоких значениях коэффициента динамики  $\xi$ , когда даже при расщеплении пластин сохраняются условия РПЭ в стыках. Нижняя кривая по итогам физического моделирования на основе данных разд. IV построена для более низких значений  $\xi$ , когда в результате расщепления пластин динамика перемагничивания от потока  $\Phi_n$  в зоне стыков выходит из режима РПЭ. В этом случае с ростом  $N$  коэффициент  $S$  также возрастает, находясь в интервале  $0,5 \leq S \leq 1$ .

Окружностями на рис. 4, б отмечены точки пересечения зависимостей составляющих прироста потерь в стыках, где:

$$\begin{aligned} P_{\text{вт}}^*(N) &= P_{\text{гв}}^*(N); \\ P_{\text{вт}}(N) &= P_{\text{гв}}(N). \end{aligned} \quad (3)$$

Равенство составляющих прироста потерь в стыках (3) определяет оптимальное значение  $N$ , при котором общий прирост потерь в стыках будет наименьшим. Заштрихованы зоны, в пределах которых при нанесении прорезей происходит снижение прироста потерь в стыках. Зависимости на рис. 4б применимы для стыков внахлест типа «butt-lap».

4. Подобные кривые могут быть получены и для ступенчатых стыков типа «step-lap». Проведенный в разделе II сравнительный анализ уровня потоков  $\Phi_n$  в стыках внахлест и в ступенчатых стыках (рис. 1) показал, что из-за разной конструкции уровень нормальных потоков в стыках отличается примерно в 2 раза. При равенстве параметров сердечников  $m$ ;  $d$ ;  $b$ ;  $\mu$ ;  $\gamma$ , их режимов перемагничивания  $f$ ;  $B_{\text{м.ср}}$  и известной зависимости потерь от квадрата амплитуды нормальной составляющей индукции  $P_{\text{уд.вн}} \equiv B_{\text{мн}}^2$  [16, 17], последние в стыках типа «step-lap» с учетом отсутствия в них эффекта компенсации потерь более, чем в четыре раза выше удельных потерь  $P_{\text{уд.вн}}$  стыков типа «butt-lap». Прирост удельных потерь  $\Delta P_{\text{уд.гв}}$  в ступенчатых стыках, наоборот, значительно ниже, чем в стыках внахлест из-за существенно меньшего уплотнения магнитного потока  $\Phi_r$  в этой конструкции стыков (рис. 1).

Характер зависимостей составляющих прироста потерь  $P_{\text{вт}}^*(N)$  и  $P_{\text{св}}^*(N)$  и все рассуждения об оптимальном значении для стыков типа «step-lap» остаются такими же, как и для «butt-lap». Необходимо только внести коррективы в значение  $P_{\text{гв}}^*$  при отсутствии прорезей ( $N = 1$ ), которое на основе проведенных рассуждений оказывается в 5-7 раз ниже, чем на рис. 4, б. С учетом условия (3) появляется преимущество в снижении общего прироста потерь в стыках типа «step-lap». Идущая значительно ниже, чем на рис. 4, б, зависимость  $P_{\text{гв}}^*(N)$  смещает точку оптимального количества рассеченных частей пластин в сторону больших значений  $N$ . В результате в стыках типа «step-lap» можно достичь большего уровня снижения общего прироста удельных потерь, чем в стыках типа «butt-lap».

## V. Заключение

1. Предложенная структура потерь в стыках позволила обнаружить доминирование составляющей потерь на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока, формирующейся в условиях резкого поверхностного эффекта и открыла новый подход к процессу формирова-

ния потерь, позволивший разработать физическую модель динамических процессов в зоне стыков стальных пластин.

2. Исследования на физической модели дали возможность выявить характер зависимости потерь в стыках от основных влияющих факторов: удельной электропроводности и магнитной проницаемости электротехнической стали, ширины пластин магнитной системы.

3. Доказано, что процессы формирования потерь, связанные с перераспределением магнитного потока в зонах стыков, выходят далеко за их пределы и распространяются по всей магнитной системе из-за явления резкого поверхностного эффекта. Это подтверждает обнаруженный эффект частичной компенсации потерь на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока в стыках внахлест типа «butt-lap», который отсутствует в ступенчатых стыках типа «step-lap».

4. Учет выявленных особенностей поведения структурных составляющих потерь в стыках физическая модель позволяет производить сравнительный анализ различных конструкций стыков.

5. Исследованиями определено, что при продольном рассечении пластин шихтованной магнитной системы происходит снижение потерь в стыках. С увеличением количества рассеченных частей при выполнении условия равенства структурных составляющих потерь достигается минимальный уровень потерь в стыках. В этом случае ступенчатая конструкция стыков типа «step-lap» приобретает преимущества перед стыками внахлест типа «butt-lap».

© Калинин Е.В., 2019

© Чивенков А.И., 2019

### Библиографический список

- [1] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- [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 Gakkai Rhombunsi. 1987. № 1 (107). P. 109-114.
- [4] 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. науч.-техн. конф. Н. Новгород, 2018. С. 53-61.
- [5] 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.

- [6] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Прогнозирование прироста потерь в стыках сердечников силовых трансформаторов // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 3. С. 87-101.
- [7] 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.
- [8] Левин М.И., Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // Электротехніка і Електромеханіка. 2014. № 1. С. 40-43.
- [9] Кравченко А.Н. Анализ эффективности мероприятий по снижению добавочных потерь в мощных силовых трансформаторах // Современные проблемы энергетики. Электроэнергетическое Оборудование. Сборник статей IV Респ. научн.-техн. конф. Киев, 1985. С. 88-89.
- [10] Čech D., Navlíček V., Miculec M., Wiglasz V. Kovovy pás pro magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů a způsob jeho výroby. Пат. 239285 ЧССР, заявл. 02.09.83, № PV6403-83; опубл. 16.02.87.
- [11] Sharples K.O. A study of the effect of core slitting on the power loss density in the limbs of generator transformers // Int. Conf. Elec. Mach., Sept. 5-9, 1982, Budapest, Hungary. P. 700-702.
- [12] Лизунов С.Д. Итоги Сессии СИГРЭ 1988 г. Трансформаторостроение // Электричество. 1989. № 8. С. 37-45.
- [13] Qader A.A., Basak A. Building factor of a 100 kVA 3 phase distribution transformer core // IEEE Transactions on Magnetics. 1982. № 6 (18). P. 1487-1489.
- [14] Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Энергия, 1974. – 240 с.
- [15] Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Наука, 1992. – 272 с.
- [16] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Физическая модель потерь в стыках шихтованных сердечников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 2 (124). (В печати).
- [17] Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. М.: Энергия, 1967. – 208 с.
- [18] Калинин Е.В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 2 (121). С. 96-105.

E.V. Kalinin, A.I. Chivenkov

## ANALYSIS OF CONSTRUCTIONS OF JOINTS OF LAMINATED MAGNETIC SYSTEMS OF POWER TRANSFORMERS

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

**Abstract.** As applied to magnetic systems of power transformers, a comparative analysis of electromagnetic processes and losses at the joints is carried out for the most widely used joint structures: oblique “butt – lap” joints and perspective “step – lap” butt – overlapped joints. It is proposed to use a structural approach to the losses at the joints, as the sum of the losses in steel from the tangential and normal components of the magnetic flux in the area of the joints. It is shown that the eddy current losses from the normal flow are formed under the conditions of a sharp surface effect and prevail in the total losses at the joints. Their highest level is for stepped joints. Experimental studies have been carried out using a physical model of dynamic processes at the joints of the normal component of the magnetic flux with a sharp surface effect. The dependences of losses at the joints on the normal flow on the width of the plates of the magnetic system and the physical properties of the steel are obtained. The presence of the effect of compensating losses on eddy currents from opposite normal magnetic fluxes at the ends of the plates at “butt – lap” overlap joints, increasing with an increase in the magnetization reversal dynamics, is shown. It is noted that this effect is absent in stepped joints of the type “step – lap”, which have consonant normal flows at the ends of the plates. An explanation is given why the use of the best brands of textured electrical steels does not give advantages when using a stepped construction of joints of the type “step – lap”. A general solution is proposed to reduce the increase in losses at the joints of the structures under consideration.

**Keywords:** cold-rolled electrical steel, experimental study, joint losses, laminated magnetic system, overlapping oblique joints, power transformer, sharp surface effect, stepped joints.

### References

- [1] P.M. Tikhomirov, *Raschet transformatorov*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (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 Rhombunsi*, Trans. Inst. Elec. Eng. Jap, vol. 1, no. 107, pp. 109-114, 1987.
- [4] E.V. Kalinin, «Poteri v stykah shihtovannyh serdechnikov. CHast' 1. EHksperimental'noe issledovanie osnovnyh vliyayushchih faktorov prirosta ehlektromagnit-

- nyh poter», in proc. *IV All-Russian Conf. Aktual'nye problemy energetiki*, Dec. 21, 2018, N. Novgorod, Russia, pp. 53-61 (in Russian).
- [5] 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*, vol. 4, no. 123, pp.123-134, 2018 (in Russian).
- [6] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov, «Forecasting the increase of losses in joints of power transformers core», *Smart Electrical Engineering*, vol. 3, pp. 87-101, Sep. 2018 (in Russian).
- [7] T. Nakata, N. Takahashi and Y. Kawase, «Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 6, no. 18, pp. 1055-1057, Nov. 1982.
- [8] 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.
- [9] A.N. Kravchenko, «Analiz ehffektivnosti meropriyatij po snizheniyu dobavochnyh poter' v moshchnykh silovykh transformatorah», in proc. *IV scien.-tech. conf. «Sovremennyye problemy ehnergetiki. EHlektroehnergeticheskoe Oborudovanie»*, 1985, Kiev, pp. 88-89 (in Russian).
- [10] D. Čech, V. Havlíček, M. Miculec and V. Wiglasz, «*Kovovy pás pro magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů a způsob jeho výroby*», Czechoslovakia Patent 239285, Feb. 16 1987.
- [11] K.O. Sharples, «A study of the transformers in the limbs of generator», in proc. *Int. Conf. Elec. Mach.*, Sept. 5-9, 1982, Budapest, Hungary, pp. 700-702.
- [12] S.D. Lizunov, «Results of the 1988 session of CIGRE. Manufacture of transformers», *Electricity*, vol. 8, pp. 37-45, 1989. Aug. 1989 (in Russian).
- [13] A.A. Qader and A. Basak, «Building factor of a 100 kVA 3 phase distribution transformer core», *IEEE Trans. Magn.*, vol. 6, no. 18, pp. 1487-1489, Dec. 1982.
- [14] V.V. Druzhinin, *Magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskikh staley*. Moscow: Energiya, 1974 (in Russian).
- [15] V.A. Zaikova, I.E. Startsev and B.N. Filippov, *Domennaya struktura i magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskikh staley*. Moscow: Nauka, 1992 (in Russian).
- [16] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov, «Physical model of losses in the joints of laminated cores», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, vol. 2, no. 124, 2019, in print.
- [17] J. Lammeraner and M. Staffl, *Vikhrevyye toki*. Moscow: Energiya, 1967 (in Russian).
- [18] E.V. Kalinin, «Magnetic field in an anisotropic laminated magnetic core. Part 1. Recommendations for determining the degree of magnetic anisotropy of cold-rolled electrical steels», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, vol. 2, no. 121, pp. 96-105, June 2018 (in Russian).