

Анализ причин увеличения потерь мощности на холостой ход в силовых трансформаторах с анизотропной сталью

КОБЫЛИН В.П., ДАВЫДОВ Г.И., АФАНАСЬЕВ Д.Е., ЛИ-ФИР-СУ Р.П.,
СЕДАЛИЩЕВ В.А., ВАСИЛЬЕВ П.Ф.

При холостом ходе (х.х.) трансформатор не совершает полезной работы, поэтому потребление электроэнергии в режиме х.х. расходуется только на создание электромагнитных полей. Анализ измерений потерь х.х. показывает, что в процессе эксплуатации они увеличиваются по сравнению с паспортными данными из-за структурных изменений в стали при перемагничивании стали сердечников трансформаторов, механических воздействий на магнитопроводы во время изготовления пластин, сборки, транспортировки, ремонтов и длительного нагрева при эксплуатации в различных режимах работы. При проектировании и изготовлении силовых трансформаторов необходимо предусматривать методы и средства снижения потерь холостого хода в трансформаторах за счет снижения, главным образом, динамических воздействий на сталь во время транспортировки, монтажа и ремонтов, которые приводят к необратимым изменениям в доменной структуре.

Ключевые слова: трансформатор, холостой ход, потери мощности, электротехническая сталь, магнитный гистерезис, домены

Известно, что при холостом ходе (х.х.) трансформатор не совершает полезной работы, поэтому потребление электроэнергии в режиме х.х. P_0 расходуется только на создание электромагнитных полей, точнее – на создание переменного магнитного потока, который, в свою очередь, наводит электродвижущую силу на зажимах первичной и вторичной обмоток. Поскольку к вторичной обмотке в режиме х.х. не подключена нагрузка, то потери в меди обмотки отсутствуют. Ток холостого хода I_{0x} , протекающий по первичной обмотке, составляет около 1% номинального тока трансформатора, и по этой причине потерями в меди можно пренебречь, считая, что потери х.х. P_0 расходуются только на создание магнитного потока. Чтобы создать поток Φ , нужна магнитодвижущая сила $F_0 = I_{0x} W_1$, где W_1 – число витков первичной обмотки.

Ток I_{0x} является главной составляющей тока х.х., причем вектор тока I_{0x} совпадает по фазе с вектором потока Φ_m (рис. 1,а) и, следовательно, отстает от вектора напряжения U_1 на 90° . По закону магнитной цепи

$$\Phi = \frac{F_0}{R_m} = \frac{I_0 W_1}{R_m},$$

где R_m – сопротивление магнитной цепи сердечника трансформатора.

Для ненасыщенной стали магнитная проницаемость μ и соответственно магнитное сопротивление R_m остаются постоянными, но при насыщении стали ее магнитная проницаемость падает, а сопротивление R_m увеличивается. Именно этот процесс и происходит в силовых трансформаторах: вначале, когда поток Φ и соответствующая ему магнит-

ная индукция малы (рис. 1,б), можно считать, что сталь трансформатора ненасыщена и $R_m = \text{const}$; затем происходит насыщение стали и при значениях потока, близких к наибольшим, она перенасыщена. Соответственно этому ток I_{0x} изменяется пропорционально потоку Φ , т.е. он синусодален до тех пор, пока $R_m = \text{const}$, а затем, по мере увеличения насыщения стали, он начинает расти быстрее. По этой причине увеличиваются потери х.х. $P_0 = P_{ст}$ (рис. 1,б).

По сравнению с номинальной мощностью трансформатора потери х.х. P_0 невелики, и тем не менее они имеют очень важное эксплуатационное значение, поскольку присутствуют независимо от нагрузки. Силовые трансформаторы отключаются от сети в течение года только на несколько дней, а трансформация электроэнергии происходит в несколько ступеней при передаче ее к потребителю. Таким образом, резко увеличивается парк трансформаторов, при этом потери холостого хода существенно ухудшают эффективность работы энерго-

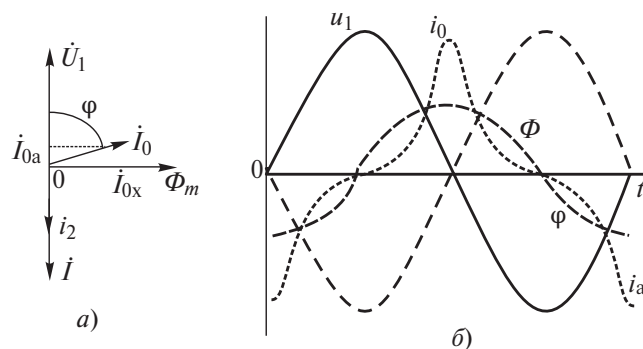


Рис. 1. Диаграмма холостого хода трансформатора: а – векторная; б – в прямоугольных координатах

системы. В целом по стране в денежном выражении они представляют прогрессирующую внушительную сумму.

Потери в стали зависят прежде всего от сортамента стали. Поэтому в настоящее время широко применяется холоднокатаная трансформаторная сталь, обладающая лучшими магнитными характеристиками в направлении проката, а именно, она имеет:

на 15–20% большую магнитную индукцию при заданном значении напряженности магнитного поля H ;

на 20–35% меньшие удельные потери;
в 2–4 раза меньшую задерживающую силу.

С другой стороны, холоднокатаная сталь анизотропна, т.е. в направлении, поперечном прокату, ее магнитные свойства значительно хуже, чем вдоль проката. По этой причине при сборке сердечника применяют специальную технологию, в известной мере осложняющую производство трансформаторов. Кроме того, холоднокатаная сталь дороже горячекатаной, однако в целом она позволяет получить трансформатор меньшего веса и габаритов, что очень важно для производства трансформаторов большой мощности.

Известно, что ферромагнетики (электротехнические стали) обладают спонтанной намагниченностью, которая в разных областях может иметь разные направления. Иными словами, эти магнетики имеют доменную структуру. Еще в 1907 г. в [1] введено понятие спонтанной намагниченности и дано теоретическое объяснение того факта, что, несмотря на наличие у ферромагнетиков спонтанной намагниченности, сильно намагнитить их удастся не всегда. Предполагалось, что ферромагнетик разбит на множество магнитных доменов, причем направление спонтанной намагниченности меняется от домена к домену.

Суммарное насыщение многодоменного ферромагнетика в ненасыщенном состоянии равно нулю:

$$\sum \dot{a} J_s v_i \cos j_i = 0, \quad (1)$$

где j_i – угол насыщения J_s i -го домена с выбранным направлением.

Насыщение ферромагнетика приведет к возникновению слагающей насыщения, определяемой уравнением

$$dJ = J_s \sum \dot{a} \cos j_i dv_i + J_i \sum \dot{a} v_i d(\cos j_i). \quad (2)$$

Первое слагаемое в (2) определяет рост насыщения ферромагнетика во внешнем магнитном поле за счет увеличения объема доменных областей, в которых насыщение J_s составляет малые углы j_i с

внешним полем. Механизм роста таких доменов осуществляется за счет процессов смещения доменных границ. Второе слагаемое определяет рост насыщения ферромагнетика путем поворота насыщения доменов J_s , неблагоприятно ориентированных, к направлению внешнего магнитного поля (процессы вращения). Кривую насыщения (рис. 2) можно разбить на четыре основные области, соответствующие процессам смещения, вращения и парапроцессу.

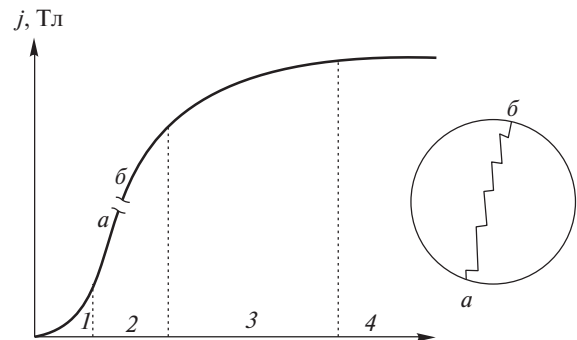


Рис. 2. Кривая насыщения: 1 – обратимые процессы смещения; 2 – необратимые; 3 – процессы вращения; 4 – парапроцесс

Насыщение на участке 1 осуществляется за счет процессов обратимого смещения границ доменов. По окончании процесса намагничивания в этой области снятием внешнего магнитного поля можно вернуться по кривой размагничивания в начало координат (участок 1 – линейный), т.е. изменение насыщенности J пропорционально увеличению напряженности поля H .

Участок 2 соответствует необратимым процессам смещения; участок 3 – процессам вращения. На этих участках уменьшение или снятие поля H приводит к отставанию изменений обратных величин размагничивания J ферромагнетика, имеет место явление магнитного гистерезиса. Снятием насыщающего магнитного поля состояние ферромагнитного образца не обращается в нуль, имеет место остаточная намагниченность J_r . Чтобы уменьшить остаточную намагниченность J_r до нуля, необходимо приложить магнитное поле обратной полярности и определенного значения напряженности (коэрцитивной силой) H_c (рис. 3).

В магнитомягких материалах определены три основные причины магнитного гистерезиса [2]:

задержка процессов смещения доменных границ;

задержка процессов роста зародышей переманчивания;

гистерезис, связанный с необратимыми процессами вращения.

Препятствиями на пути смещающихся границ основных и замыкающих доменов, а также границ

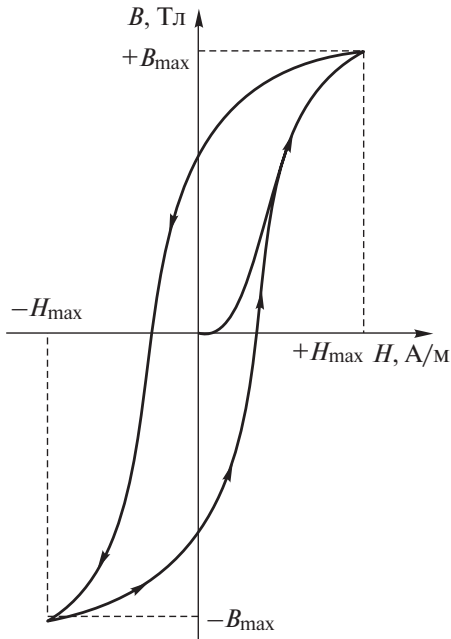


Рис. 3. Петля гистерезиса ферромагнетика

зародышей перемагничивания могут быть различного рода несовершенства кристаллической решетки. Доменные границы при смещении не могут сразу преодолеть препятствия, встречающиеся на их пути. Для преодоления препятствий требуется накопить определенный запас магнитной энергии, поэтому рост намагниченности dJ/dH ферромагнитного образца при наложении внешнего магнитного поля происходит не плавно, а скачкообразно, кривая намагничивания имеет ступенчатый характер. Скачки Баркгаузена, названные по имени ученого, открывшего их, могут быть различной амплитуды в зависимости от напряженности магнитного поля, расходуемой на преодоление препятствий в процессе намагничивания или перемагничивания. Скачки соответствуют смещению границ или отдельных участков границ нескольких доменов, а также вращению векторов намагниченности J_s . Скачкообразные изменения намагниченности J_s происходят и при необратимых процессах вращения в однодоменных частицах.

Энергия магнестрикционной деформации внутри и вблизи границ 180-градусных, 90-градусных и замыкающих доменов с различной конфигурацией сильно различаются. Магнестрикционные напряжения в 180-градусных доменных границах — близкодействующие. Взаимодействие 180-градусной границы осуществляется только с дефектами, находящимися внутри самой границы. Напряжение в доменных 90-градусных границах — дальнедействующее. Напряжения в обоих 90-градусных доменах, прилегающих к границе, имеют одинаковое значение, но противоположные знаки.

Внутренние напряжения возникают вблизи различного рода дефектов кристаллической решетки: группировок дислокаций, концентрационных флуктуаций (кластеров), концентрационных неоднородностей типа атмосфер Котрелла и Сузук, зон Гинье—Престона, мелкодисперсных выделений неметаллических фаз и отдельной категории крупных неметаллических включений [2].

В магнитомягких материалах имеют место два основных механизма негативного влияния неметаллических включений на коэрцитивную силу: возникновение внутренних напряжений вблизи включений и возникновение на поверхности включений магнитных «зарядов», приводящих к рассеянию магнитной энергии.

Размер, форма и степень сопряжения неметаллических включений с матрицей определяют значение внутренних напряжений и дальность их действия. Возникновение магнитных «зарядов» на поверхности включений приводит к взаимодействию доменных границ с включениями. Для включений относительно больших размеров магнестатическая энергия минимальна в том случае, если доменная граница, пересекая включение, проходит через его центр. Под воздействием внешнего магнитного поля в процессе отрыва границы от включения возрастают площадь и энергия мигрирующей доменной границы, так называемый эффект «пиннинга», вследствие которого увеличивается коэрцитивная сила H_c . В случае, когда уменьшение магнестатической энергии приводит к образованию доменов на поверхности включений (рис 4,а), в которых намагниченность J_s направлена противоположно намагниченности J_s основных 180-градусных доменов (рис 4,б), граница, пересекая такое включение, не может оторваться от него. Отрыв границы от включения приведет к увеличению площади замыкающих доменов; образуется так называемая «шлейфовая» доменная структура

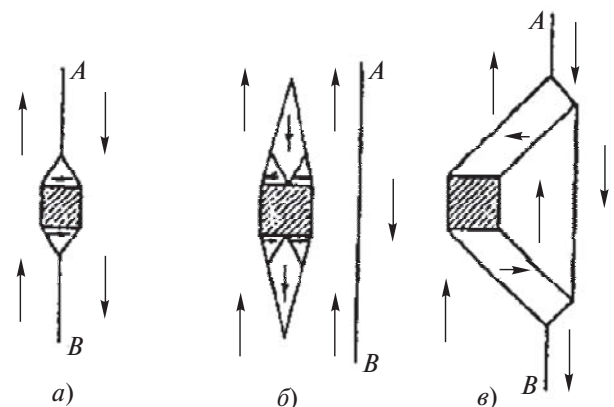


Рис. 4. Образование замыкающих доменов на включении (а, б) и шлейфовой структуры замыкающих доменов (в) при отрыве от включения границы между 180-градусными доменами

(рис. 4, в). Возникновение «шлейфовой» доменной структуры способствует росту коэрцитивной силы.

Потери на магнитный гистерезис обусловлены необратимым характером процессов перемагничивания; связаны с геометрией структуры доменов, значением констант магнитной анизотропии и магнитострикции. Под потерями на магнитный гистерезис понимают потери, обусловленные рассеянием магнитной энергии в процессе перемагничивания при взаимодействии подвижных доменных границ с дефектами структуры. Механизм рассеяния магнитной энергии – возникновение микровихревых токов при преодолении доменной границей дефектов кристаллической решетки. Основная причина роста потерь на магнитный гистерезис связана с искажениями доменной структуры.

Электротехнические стали на заключительных стадиях обработки в процессе их производства, а также в процессе обработки у потребителя (резка пластин, штамповка деталей магнитопроводов; навивка тороидальных магнитопроводов и т.п.) могут подвергаться деформациям. Деформации, превышающие предел упругости, приводят к остаточным механическим напряжениям. Остаточные механические напряжения являются следствием остаточных деформаций кристаллической решетки, возникающих в стали в результате внешних воздействий: механических, тепловых, электрических, магнитных нагрузок.

Магнитные свойства наиболее чувствительны к остаточным механическим напряжениям. Для оценки негативного влияния на магнитные свойства электротехнических сталей принято подразделять на три вида механических напряжений:

первого рода – макронапряжения, охватывающие объемы, соизмеримые с размерами листа, имеющие ориентацию, связанную с геометрией формы листа;

второго рода – микронапряжения, распространяющиеся в объеме отдельного зерна или группы зерен;

третьего рода – субмикроскопические напряжения, распространяющиеся в объеме отдельного субзерна, а также связанные с ничтожно малыми искажениями кристаллической решетки в объемах, соизмеримых с размерами атомов и межатомных расстояний.

Макронапряжения возникают в процессе технологической обработки на заводах-изготовителях электротехнических сталей. Микронапряжения связаны с дефектами структуры, т.е. с анизотропией упругих констант в материале и наличием микродефектов кристаллического строения внутри зерен или по их границам. Остаточные механические напряжения, приводящие к необратимым объем-

ным изменениям из-за пластических деформаций, сохраняются в стали после снятия нагрузки и приводят к ухудшению магнитных свойств. Исследования показали [3–5], что даже малые деформации в холодном состоянии электротехнической анизотропной стали приводят к резкому росту удельных потерь (рис. 5) за счет увеличения потерь на магнитный гистерезис и вихревые токи, которые существенно изменяют температурный режим стали.

Методы борьбы с вихревыми токами общеизвестны: уменьшение объема листа и сортамента стали, как это делается, например, при изготовлении ферритов, применительно к токам высокой частоты. Но ферриты, по известным причинам, не пригодны для низких частот. Поэтому в трансформаторах, в пределах разумного, используют метод снижения объема листа за счет его толщины и изоляции. В качестве изоляции широко используются оксидные покрытия, хотя иногда применяются лакокрасочные и даже бумажные.

Восстановление магнитных свойств электротехнических сталей в виде заготовок магнитопроводов после механической обработки возможно с помощью повторной термической обработки. Эффект восстановления магнитных потерь составляет 9–16 % [6]. Однако установлено, что с ростом габаритных размеров магнитопроводов силовых трансформаторов, усовершенствованием их конструкции, улучшением технологии резки пластин и сборки их в магнитопроводы, повышением культуры производства проводить отжиг заготовок магнитопроводов экономически нецелесообразно.

Экономичность работы трансформатора как изделия оценивается по КПД либо по величине, тесно связанной с КПД – относительным потерям в трансформаторе. Они представляют собой нелинейную функцию загрузки, определяемую независимыми от нагрузки потерями в стали магнитопровода и изменяющимися в квадратичной зависимости от нее потерями в обмотках, отнесенными к

$$(P_2 - P_1) / P_1, \%$$

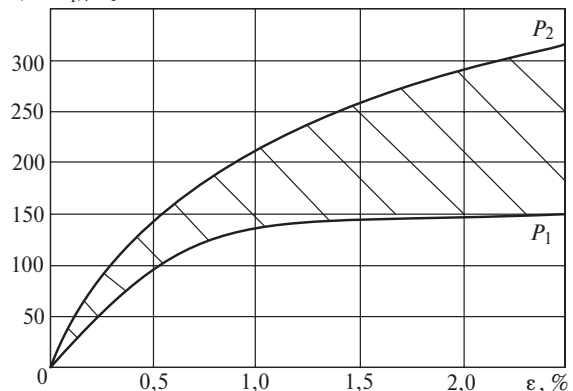


Рис. 5. Влияние холодной деформации на удельные потери $P_{1,5/50}$: P_1 – потери до деформации; P_2 – потери после деформации

единице передаваемой трансформатором мощности. На рис. 6 приведены кривые относительных потерь в распределительных трансформаторах, построенные по паспортным данным, из которых видно, что наиболее экономично трансформаторы работают в диапазоне нагрузок 40–50% [7].

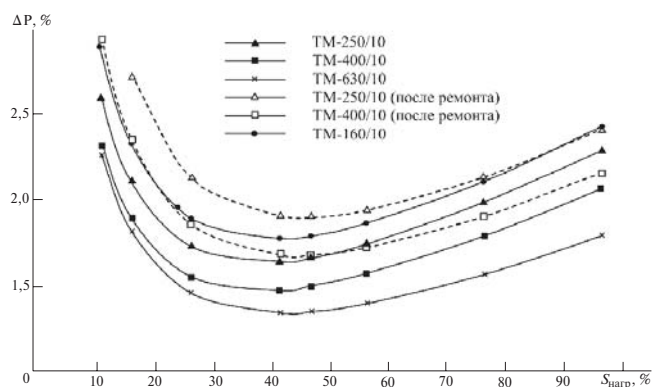


Рис. 6. Кривые относительных потерь в РТ в зависимости от их нагрузки

Измерения потерь х.х. показывают (см. таблицу), что в процессе эксплуатации они увеличиваются по сравнению с паспортными данными. Это обусловлено следующими причинами.

Во-первых, при перемагничивании стали сердечников трансформаторов и выделении тепла обмотками неизбежно происходит длительный нагрев магнитопроводов, способствующий структурным изменениям в стали процессами старения, в результате которых в большинстве случаев ухудшаются их магнитные свойства.

Во-вторых, потери х.х. увеличиваются за счет изменений доменной структуры стали трансформатора, которые накапливаются в процессе несанкционированных динамических воздействий на магнитопроводы, главным образом, во время транспортировки, монтажа и эксплуатации.

Из изложенного следует, что стабилизировать гарантированные заводом-изготовителем потери холостого хода в трансформаторах можно исключением несанкционированных динамических нагру-

зок во время транспортировки, монтажа и эксплуатации. Осуществить этот замысел авторы предлагают заводам-изготовителям путем дополнения к существующим конструкциям трансформаторов компенсирующих устройств, смягчающих динамические воздействия во время неординарных ситуаций. Разновидность таких устройств в зависимости

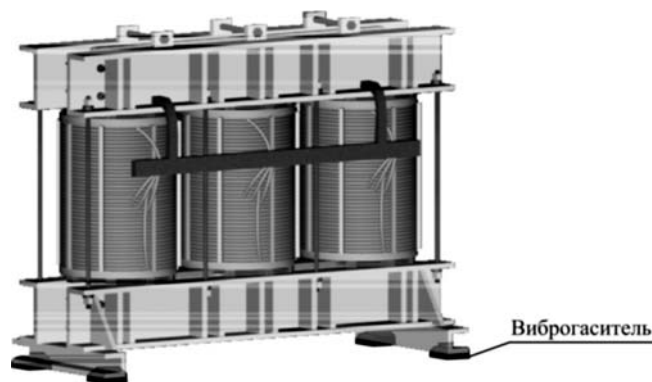


Рис. 7. Вид активной части силового трансформатора

от габаритов и исполнения трансформатора может быть любая: пружинного, рессорного, гидравлического, пневматического, цельнометаллического, резинового, комбинированного противодействия и других.

В качестве примера авторы предлагают в трансформаторах I, II габаритов использовать противоударные виброгасители в виде подушек специальной конструкции из твердой маслостойкой резины, расположенных в баке между днищем и прессующими балками магнитопровода трансформатора (рис. 7).

Основная причина роста потерь связана с искажениями доменной структуры электротехнических сталей, которые на заключительных этапах обработки подвергаются деформациям и при превышении предела упругости приводят к остаточным механическим напряжениям и являются следствием остаточных деформаций кристаллической решетки, возникающих в стали в результате внешних дина-

Тип трансформатора	Год ввода	Потери х.х., кВт		Превышение относительно паспортных значений, %
		паспортные данные	измерение	
ТДТН-25000/110	1980	38,70	40,23	3,96
ТДТН-25000/110	1978	37,09	45,81	23,50
ТДТН-25000/110	1978	40,50	61,32	51,39
ТДТН-10000/110	1973	20,20	21,75	7,69
ТДТН-20000/110	1980	46,50	71,49	53,74
ТДТН-25000/110	1980	38,70	44,54	15,09

ТДН-10000/110	1991	14,00	14,58	4,11
ТДН-10000/110	1991	18,80	20,02	6,50
ТРДН-40000/110	1988	33,50	42,35	26,42
ТРДН-25000/110	1984	35,00	39,07	11,63
ТДТН-25000/110	1978	40,50	61,315	51,39
ТРДН-25000/110	1984	25,00	44,35	77,42
ТДН-10000/110	1980	16,70	17,69	5,93
ТДН-10000/110	1979	16,50	19,45	17,89
ТДТН-10000/110	1988	19,00	28,93	52,27
ТДТН-10000/110	1991	59,70	77,26	29,41
ТДТН-25000/110	1978	37,09	54,29	46,37
ТРДЦН-40000/110	1992	42,00	54,81	30,51
ТРДН-25000/110	1982	29,40	29,52	0,39
ТДТН-10000/110	1984	15,50	17,11	10,41
ТДТН-16000/110	1994	26,00	41,29	58,82
ТМТН-6300/110	1985	14,00	19,96	42,56
ТДТН-10000/110	1989	16,00	17,31	8,19
ТДТН-10000/110	1980	18,50	25,55	38,12
ТДТН-10000/110	1973	20,20	22,37	10,77
ТДТН-10000/110	1978	18,50	23,46	26,84
ТДТН-25000/110	1978	37,09	45,81	23,50
ТДТН-10000/110	2001	20,20	25,97	28,57
ТДТН-16000/110	2002	21,50	28,08	30,63
ТМТН-6300/110	1985	11,50	16,38	42,48

мических воздействий при механических, тепловых, магнитных, электрических нагрузках. Магнитные свойства сталей наиболее чувствительны к остаточным механическим напряжениям, возникающим, главным образом, при транспортировке, монтаже и эксплуатации. Остаточные механические напряжения приводят к необратимым объемным изменениям и сохраняются в стали после снятия нагрузки, способствуя ухудшению ее магнитных свойств. Даже незначительные деформации в холодном состоянии электротехнической анизотропной стали приводят к резкому росту удельных потерь на гистерезис и вихревые токи; последние существенно влияют на ее температурный режим.

Вывод. Гарантированные заводом-изготовителем потери холостого хода в трансформаторах предлагается стабилизировать путем исключения несанкционированных динамических нагрузок. Для этого рекомендуется в заводских условиях оснастить конструкцию маслonaполненных трансформаторов типовыми компенсирующими устройствами. Разновидность компенсирующих устройств

может быть любая в зависимости от требований завода-изготовителя: пружинного, рессорного, гидравлического, пневматического или комбинированного противодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weiss P., J. Phys., 6, 661, 1907.
2. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов /Под ред. В.Д. Дурнева. – М.: ООО «Наука и технологии», 2000, 224 с.
3. Казаджан Л.Б., Молотиллов Б.В., Пименов А.Ф. Анизотропия изменения магнитных свойств при деформации трансформаторной стали. – Сб. трудов Липецкого филиала Московского института сталей и сплавов (Новолипецкий металлургический завод) «Металловедение, термообработка и физические свойства металлов и сплавов», 1970, вып. 7, ч. 1, с. 72–75.
4. Ильгов В.П., Казаджан Л.Б., Молотиллов Б.В. Изменение магнитных свойств отожженной трансформаторной стали при последующих механических и повторной термической обработках. – Сб. трудов Липецкого филиала Московского института сталей и сплавов (Новолипецкий металлургический завод) «Металловедение, термообработка и физические свойства металлов и сплавов», 1970, вып. 7, ч. 1, с. 76–79.

5. Казаджан Л.Б., Сакир Н.П., Суханов Л.Ф. Влияние структурных факторов на соотношение удельных потерь и холлокатаной трансформаторной стали. — Изв. АН СССР. Физика, 1970, т. 34, № 2, с. 241–244.

6. Казаджан Л.Б., Диденко Л.М., Спиридонова Л.М. Исследование изменения магнитных свойств трансформаторной стали при отжиге после резки. — Сб. трудов УНЦ АН СССР «Структура и свойства электротехнической стали» (Свердловск), 1977, вып. 33, с. 157–159.

7. Заугольников В.Ф., Балабин А.А., Савинков А.А. Некоторые аспекты экономической работы силовых трансформаторов. — Промышленная энергетика, 2006, № 4, с. 10–14.

8. Тимофеев И.А. Удельные потери в ферромагнетике. — Современные проблемы науки и образования, 2007, № 6, с. 136–142.

[30.09.14]

Авторы: Кобылин Виталий Петрович окончил Томский политехнический институт в 1969 г. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию «Повышение надежности и эффективности транспорта электроэнергии в условиях Севера» в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Заведующий отделом электроэнергетики Института физико-технических проблем Севера Сибирского отделения Российской академии наук (ИФТПС СО РАН).

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 3, pp. 13–20.

An Analysis of Factors Causing a Growth of No-Load Power Losses in Power Transformers with Cores Made of Anisotropic Steel

V.P. KOBYLIN, G.I. DAVYDOV, D.E. AFANAS'EV, R.P. LI-FIR-SU, V.A. SEDALISHCHEV and P.F. VASIL'YEV

As is well known, during its operation in the no-load mode, a transformer does not perform useful work. Therefore, the electric energy consumed in the no-load mode is spent only for generating electromagnetic fields. An analysis of data obtained from measurements of no-load losses shows that their level grows in the course of operation as compared with the nameplate data due to the following factors: structural changes that occur in the steel of transformer cores during their remagnetization, mechanical impacts applied to the magnetic cores in manufacturing the plates, in assembling, transportation, repairs, and long-term heating during operation in different modes. In designing and manufacturing power transformers, methods and means must be used for reducing no-load losses in the transformers primarily by decreasing the dynamic impacts applied to steel during transportation, installation, and repairs, which give rise to irreversible changes in the domain structure.

Key words: transformer, no-load operation, power losses, electric steels, magnetic hysteresis, domains

REFERENCES

1. Weiss P., J. Phys., 6, 661, 1907.
2. Kazadzhani L.B. *Magnitnye svoistva elektrotekhnicheskikh staley i splavov/Pod redaktsiyey V.D. Durneva* (The magnetic properties of electrical steel and alloys/Edit. by V.D. Durnev). Moscow, Publ JSC «Nauka i Technologii» («Science and Technology»), 2000, 224 p.
3. Kazadzhani L.B., Molotilov B.V., Pimenov A.F. *Sb. Trudov Lipetskogo filiala Moskovskogo instituta staley i splavov (Novolipetskii Metallurgicheskii Zavod) «Metallovedeniye, termoobrabotka i fizicheskiye svoistva metallov i splavov»* (Proc. of Lipetsk branch of the

Давыдов Геннадий Иванович окончил энергетический факультет Якутского государственного университета (ГУ) в 2004 г. Младший научный сотрудник отдела электроэнергетики ИФТПС СО РАН.

Афанасьев Дмитрий Егорович окончил Московскую сельскохозяйственную академию им. К.А. Тимирязева в 1961 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Энергосбережение в сельском хозяйстве Якутии» в Московском агропромышленном университете им. В.П. Горячкина. Ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетики ИФТПС СО РАН.

Ли-Фир-Су Роза Петровна окончила факультет электронной техники Новосибирского электротехнического института в 1978 г. Научный сотрудник отдела электроэнергетики ИФТПС СО РАН.

Седалищев Виталий Алексеевич окончил физико-математический факультет Якутского ГУ в 1972 г. Научный сотрудник отдела электроэнергетики ИФТПС СО РАН.

Васильев Павел Филиппович окончил энергетический факультет Якутского ГУ в 2009 г. В 2012 г. защитил кандидатскую диссертацию «Методы снижения сопротивления заземляющих устройств в многолетнемерзлых грунтах». Младший научный сотрудник отдела электроэнергетики ИФТПС СО РАН.

Moscow steel and alloys institute (New Lipetsk Ironwork) «Physical metallurgy, heat treatment and physical properties of metals and alloys», 1970, iss. 7, part 1, pp. 72–75.

4. Il'gov V.P., Kazadzhani L.B., Molotilov B.V. *Sb. Trudov Lipetskogo filiala Moskovskogo instituta staley i splavov (Novolipetskii Metallurgicheskii Zavod) «Metallovedeniye, termoobrabotka i fizicheskiye svoistva metallov i splavov»* (Proc. of Lipetsk branch of the Moscow steel and alloys institute (New Lipetsk Ironwork) «Physical metallurgy, heat treatment and physical properties of metals and alloys»), 1970, iss. 7, part 1, pp. 76–79.

5. **Kazadzhani L.B., Sakir N.P., Sukhanov L.F.** *Izvestiya AN SSSR. Fizika* (News of Academy of Sciences of SSSR. Physics), 1970, vol. 34, No. 2, pp. 241–244.

6. **Kazadzhani L.B., Didenko L.M., Spiridonova L.M.** *Sb. Trudov Ural'skogo nauchnogo tsentra AN SSSR «Struktura I svoistva elektrotehnicheskoi stali»* (Proc. of Ural Scientific Centre of Academy of Sciences of SSSR «Structure and properties of the electrical steel», Sverdlovsk, 1977, iss. 33, pp. 157–159.

7. **Zaugol'nikov V.F., Balabin A.A., Savinkov A.A.** *Promyshlennaya energetika (Industrial Energy)*, 2006, No. 4, pp. 10–14.

8. **Temofeyev I.A.** *Sovremennye problem nauki i obrazovaniya* (Modern problems of science and education), 2007, No. 6, pp. 136–142.

Authors: Kobylin Vitalii Petrovich (Yakutsk, Russia) – Doctor Techn. Sci., Head of the Department, Institute of Physical and Technical Problems of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPhTPN SB RAS).

Davidov Gennadii Ivanovich (Yakutsk, Russia) – Junior scientific researcher, IPhTPN SB RAS.

Afanas'yev Dmitrii Egorovich (Yakutsk, Russia) – Doctor Techn. Sci., Leading scientific researcher, IPhTPN SB RAS.

Li-Fir-Su Roza Petrovna (Yakutsk, Russia) – Scientific researcher, IPhTPN SB RAS.

Sedalishchev Vitalii Alekseyevich (Yakutsk, Russia) – Scientific researcher, IPhTPN SB RAS.

Vasilyev Pavel Filippovich (Yakutsk, Russia) – Cand. Techn. Sci., Junior scientific researcher, IPhTPN SB RAS.