

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-115-126>

УДК 621.314

## Определение потерь в стали и оптимизация толщины листов магнитопровода трансформатора

С. М. Плотников<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева  
(Красноярск, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>Красноярский институт железнодорожного транспорта  
(Красноярск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** В настоящее время перед заводами – изготовителями трансформаторов поставлена задача создания энергоэффективных аппаратов с понижением потерь в стали до 44 %. Для ее реализации необходимы соответствующие теоретические разработки. Со снижением вихретовых потерь, например за счет уменьшения толщины листов магнитопровода, одновременно возрастают потери на гистерезис. Аналогичный эффект дает изменение размеров кристаллического зерна стали, термомагнитная обработка и другие технологические меры. В связи с этим точное определение составляющих суммарных потерь в стали представляет собой актуальную проблему, решение которой позволило бы минимизировать суммарные потери. В статье проанализированы выражения, определяющие удельные потери на вихревые токи и на гистерезис через параметры магнитопровода, и установлено, что данная методика слишком сложна для инженерных расчетов. Поскольку потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты, а потери на гистерезис – частоте в первой степени, с использованием ваттметрического метода получены простые расчетные выражения потерь на вихревые токи и на гистерезис. Исходя из того, что зависимость потерь на перемагничивание от толщины пластин магнитопровода является спадающей линейной функцией, а потеря на вихревые токи – восходящей параболической функцией, найдено выражение оптимальной толщины пластин, при которой полные потери в стали минимальны. Данная информация позволит более эффективно минимизировать полные потери в стали за счет варьирования конструктивных параметров и материала магнитопровода. Показано, что паспортные потери холостого хода трансформаторов, изготовленных разными производителями, отличаются более чем на 30 % и могут быть округлены и занижены, поэтому данный параметр целесообразно получать в результате эксперимента (опыта холостого хода).

**Ключевые слова:** трансформатор, потери в стали, потери холостого хода, вихревые токи, гистерезис, толщина листов магнитопровода

**Для цитирования:** Плотников, С. М. Определение потерь в стали и оптимизация толщины листов магнитопровода трансформатора / С. М. Плотников // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 2. С. 115–126. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-115-126>

---

### Адрес для переписки

Плотников Сергей Михайлович  
Сибирский государственный университет  
науки и технологий имени М. Ф. Решетнева  
просп. Мира, 82,  
660049, г. Красноярск, Российская Федерация  
Тел.: +7 391 227-57-67  
[smplochnikov@rambler.ru](mailto:smplochnikov@rambler.ru)

### Address for correspondence

Plotnikov Sergey M.  
Reshetnev Siberian State University  
of Science and Technology  
82, Mira Ave.,  
660049, Krasnoyarsk, Russian Federation  
Tel.: +7 391 227-57-67  
[smplochnikov@rambler.ru](mailto:smplochnikov@rambler.ru)

---

## Determination of Steel Losses and Optimization of the Thickness of the Transformer Magnetic Conductor Sheets

S. M. Plotnikov<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Krasnoyarsk, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Krasnoyarsk Rail Transport Institute (Krasnoyarsk, Russian Federation)

**Abstract.** Currently, transformer manufacturers are tasked with creating energy-efficient devices with a reduction of steel losses of up to 44 %. Appropriate theoretical developments are needed for its implementation. With a reduction of eddy-current losses, caused, for example, by reduction of decrease in the thickness of the magnetic conductor sheets, hysteresis losses simultaneously increase. A similar effect is caused by changing the size of the crystal grain of steel, thermomagnetic treatment and other technological impacts. In this regard, the exact determination of the components of total losses in steel is an urgent problem, the solution of which would minimize total losses. The article analyzes the expressions that determine the specific losses for eddy currents and hysteresis through the parameters of the magnetic circuit, and states that this technique is too complicated for engineering calculations. Since eddy current losses are proportional to the square of the frequency, and hysteresis losses are proportional to the frequency in the first degree, simple calculated expressions of eddy current and hysteresis losses have been obtained using the wattmetric method. Based on the fact that the dependence of the magnetization loss on the thickness of the magnetic conductor plates is a decreasing linear function, and the eddy current loss is an ascending parabolic function, an expression of the optimal thickness of the plates has been found, the implementation of which makes the losses of steel minimal. This information will make it possible to minimize total steel losses more effectively by varying the design parameters and the material of the magnetic conductor. It is shown that the charted idling losses of transformers manufactured by different manufacturers differ by more than 30 % and can be rounded and underestimated; therefore it is advisable to obtain this parameter as a result of an experiment (idling experiment).

**Keywords:** transformer, steel losses, idle losses, eddy currents, hysteresis, thickness of the magnetic conductor

**For citation:** Plotnikov S. M. (2022) Determination of Steel Losses and Optimization of the Thickness of the Transformer Magnetic Conductor Sheets. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (2), 115–126. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-115-126> (in Russian)

### Введение

На пути от электростанции к потребителю электроэнергия многократно трансформируется, и на каждой ступени происходят некоторые потери. В России и Беларуси они превышают 10 % [1], причем от одних только потерь в магнитопроводах традиционных трансформаторов теряется до 4 % производимой электроэнергии. Конструкция трансформаторов постоянно совершенствуется с целью снижения этих потерь. В настоящее время перед заводами – изготовителями трансформаторов поставлена задача создания серии аппаратов с классом энергоэффективности ХЗКЗ и Х4КЗ, в которых потери холостого хода должны быть снижены в зависимости от номинальной мощности на 33–45 % [2]. Это позволит уменьшить нагрев и повысить допустимые нагрузки трансформаторов [3]. Для реализации данных требований необходимо внедрение инновационных технологий.

Совершенствование магнитопроводов ведется по разным направлениям. Начато производство сердечников из нанокристаллических сплавов, позволяющих получить так называемую аморфную сталь со значительно меньшими удельными потерями [4–6]. Нормализационный отжиг дает возможность снизить уровень внутренних напряжений в листах электротехнической стали и уменьшить магнитные потери [7]. Разрабатываются силовые трансформаторы, шихтовка которых выполнена по технологии UNICORE. В таких конструкциях магнитный поток не преодолевает препятствие в виде воздушного зазора, а огибает его, используя соседние несущие ленты (пластины) [8]. Уменьшить потери мощности в шихтованных магнитопроводах позволяет также совместное использование анизотропной и изотропной электротехнических сталей (технология Sandwich) [9, 10]. На фоне этих прорывных достижений кажется, что «классические» возможности снижения потерь в стали исчерпаны. Но это не так. Например, выполнение стальных пластин (листов) оптимальной толщины также может заметно снизить магнитные потери. Однако научно обоснованной методики определения оптимальной толщины листов магнитопровода в настоящее время не существует. Данный параметр выбирается экспериментально, исходя из того, что с уменьшением толщины листа снижаются потери на вихревые токи, но усложняется технология сборки, возрастает ее стоимость и удельный объем изолирующего слоя. Для трансформаторов разных мощностей рациональным считается значение 0,35 мм, однако оно может лишь случайно оказаться оптимальным по критерию минимума потерь в стали.

Цель статьи – показать, что известным ваттметрическим методом возможно определить потери на гистерезис и вихревые токи и с помощью этих величин оптимизировать толщину листов магнитопровода.

### **Определение потерь на вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе**

Для оптимизации потерь в магнитопроводе необходимо знать величину не только самих полных потерь, но и их составляющих. В этом случае можно эффективно изменять легирующие элементы в стали и толщину пластин магнитопровода, процентное содержание углерода и кислорода в стали, термообработку, формировать оптимальную текстуру стали и т. д. Таким образом, определение потерь на вихревые токи и на гистерезис является важной теоретической и практической задачей.

Формула для инженерных расчетов удельных электрических потерь на вихревые токи  $P_v$  предложена в [11] и уточнена в [12]. Она включает амплитуду и коэффициент формы кривой магнитной индукции, частоту ее изменения, толщину, плотность и удельное электрическое сопротивление материала листов магнитопровода. В [13] потери на вихревые токи выражены через квадрат производной магнитного момента единицы объема магнитопровода. В [14] выражение удельных потерь на гистерезис  $P_r$  со-

держит амплитуду магнитной индукции, частоту ее изменения, коэрцитивную силу и плотность материала пластин, а в [15] формулы потерь на вихревые токи и гистерезис включают, кроме того, коэффициенты, определяемые из опыта.

Расчет по указанным формулам связан с трудоемкими измерениями и вычислениями, которые невозможно произвести с высокой точностью. В этой связи недооцененным остается ваттметрический метод разделения потерь в магнитопроводе.

Выделить в полных потерях в стали отдельные потери ваттметрическим методом предложил профессор В. И. Чечерников [16]. Потери на гистерезис он представил в виде  $P_{\text{г}} = c_1 f$ , потери на вихревые токи  $P_{\text{в}} = c_2 f^2$ , где  $c_1, c_2$  – определяемые эмпирически коэффициенты, включающие значение магнитной индукции, параметры материала и объем образца;  $f$  – частота перемагничивания, Гц.

Для конкретной частоты  $f_1$  уравнения имеют вид:

$$P_{\text{г}} = c_1 f_1; \quad (1)$$

$$P_{\text{в}} = c_2 f_1^2. \quad (2)$$

Полные потери  $P_0$  в магнитопроводе на частотах  $f_1$  и  $f_2$  выражены соответственно суммами:

$$P_{01} = c_1 f_1 + c_2 f_1^2; \quad (3)$$

$$P_{02} = c_1 f_2 + c_2 f_2^2. \quad (4)$$

Аналитическое решение в [16] отсутствует, а уравнения (3), (4) решены графически. Коэффициент  $c_1$  рассчитан как точка пересечения продолжения зависимости  $P_0/f = \varphi(f)$  с осью ординат, а коэффициент  $c_2$  – как тангенс угла наклона этой прямолинейной зависимости. Данное решение, воспроизведенное также в [14], весьма неудобное для инженерных расчетов, трудоемкое и связано со сложными вычислениями и графическим построением.

В [17] предусмотрены измерения полных потерь в ферромагнетике опытом холостого хода на двух частотах. На основании этих измерений определены различные параметры трансформатора, включая коэрцитивную силу, токи утечки, параметры намагниченности и вихретоковое сопротивление, однако не уделено внимания нахождению потерь на вихревые токи и гистерезис.

Для замены геометрического решения на алгебраическое найдем коэффициенты  $c_1, c_2$ . Исходя из уравнений (3), (4), составим определители:

$$\Delta = \begin{vmatrix} f_1 & f_1^2 \\ f_2 & f_2^2 \end{vmatrix} = f_1 f_2^2 - f_2 f_1^2;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} P_{01} & f_1^2 \\ P_{02} & f_2^2 \end{vmatrix} = P_{01}f_2^2 - P_{02}f_1^2;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} f_1 & P_{01} \\ f_2 & P_{02} \end{vmatrix} = P_{02}f_1 - P_{01}f_2.$$

Коэффициенты  $c_1, c_2$  имеют вид:

$$c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{P_{01}f_2^2 - P_{02}f_1^2}{f_1f_2^2 - f_2f_1^2}; \quad (5)$$

$$c_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{P_{02}f_1 - P_{01}f_2}{f_1f_2^2 - f_2f_1^2}. \quad (6)$$

Введем отношение частот  $k = \frac{f_2}{f_1}$ , или  $f_2 = k f_1$ ,  $f_2^2 = k^2 f_1^2$ , и запишем (5), (6) с использованием только частоты  $f_1$ :

$$c_1 = \frac{k^2 P_{01} f_1^2 - P_{02} f_1^2}{k^2 f_1^3 - k f_1^3} = \frac{k^2 P_{01} - P_{02}}{k(k-1) f_1}; \quad (7)$$

$$c_2 = \frac{P_{02} f_1 - k P_{01} f_1}{k^2 f_1^3 - k f_1^3} = \frac{P_{02} - k P_{01}}{k(k-1) f_1^2}. \quad (8)$$

Подставив (7), (8) соответственно в (1), (2), получим простые и удобные для инженерных расчетов выражения потерь на гистерезис и вихревые токи для частоты  $f_1$ :

$$P_r = \frac{k^2 P_{01} - P_{02}}{k(k-1)}; \quad (9)$$

$$P_v = \frac{P_{02} - k P_{01}}{k(k-1)}. \quad (10)$$

Числители (9), (10) положительны, поэтому для любой частоты должно выполняться условие  $k^2 P_{01} > P_{02} > k P_{01}$ .

Выражения (9), (10) не содержат значения частот (Гц) проведения опытов холостого хода, а включают только отношение этих частот  $k$ . Несмотря на свою простоту и очевидную практическую пользу, формулы (9), (10) в известной литературе отсутствуют, хотя следуют из содержащегося во многих источниках определения: при увеличении частоты в  $k$  раз потери на гистерезис возрастают в  $k$  раз, а потери на вихревые тока – в  $k^2$  раз.

### Оптимизация толщины пластин магнитопровода

Со снижением вихревых токов в электротехнической стали за счет уменьшения толщины листов одновременно возрастает коэрцитивная сила, увеличивается площадь петли и повышаются потери на гистерезис [18, 19]. Такое увеличение потерь дополняется также тем, что доводка до требуемой толщины производится на холодных листах, сталь уплотняется [20].

Для листов толщиной свыше 0,1 мм зависимость потерь на гистерезис  $P_{\Gamma}$  от толщины листов  $\delta$  можно выразить в виде линейной функции

$$P_{\Gamma} = a - b\delta, \quad (11)$$

где  $a$  – коэффициент, определяющий начальные потери, Вт;  $b = -\frac{m_P}{m_{\delta}} \operatorname{tg} \beta$  – коэффициент наклона прямой, Вт/мм;  $m_P$  – масштаб мощности, Вт/см;  $m_{\delta}$  – то же толщины, мм/см;  $\beta$  – угол наклона между прямой и осью  $\delta$ .

Потери на вихревые токи  $P_{\text{в}}$  зависят от квадрата толщины пластин магнитопровода [11–13]

$$P_{\text{в}} = c\delta^2, \quad (12)$$

где  $c$  – коэффициент квадратичной функции, Вт/мм<sup>2</sup>.

Зависимость полных потерь в стали от толщины листов, из которых набран магнитопровод:

$$P_0 = P_{\Gamma} + P_{\text{в}} = a - b\delta + c\delta^2. \quad (13)$$

С уменьшением толщины листов потери на вихревые токи снижаются, однако растут потери на гистерезис, и наоборот, т. е. величины  $P_{\Gamma}$  и  $P_{\text{в}}$  являются разнонаправленными относительно изменения  $\delta$ . Зависимости  $P_0$ ,  $P_{\text{в}}$ ,  $P_{\Gamma} = f(\delta)$  схематично представлены на рис. 1.

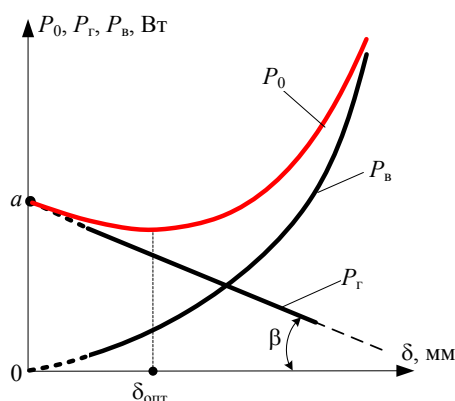


Рис. 1. Зависимости потерь в стали от толщины листов

Fig. 1. Dependences of steel losses on sheet thickness

Оптимальное значение толщины листов  $\delta_{\text{опт}}$ , при которой суммарные потери в стали минимальны, найдем через производную  $P_0$ , приравняв ее нулю:

$$\frac{dP_0}{d\delta} = -b + 2c\delta = 0;$$

$$\delta_{\text{опт}} = \frac{b}{2c}. \quad (14)$$

Таким образом, оптимум полных потерь в стали определяется двумя параметрами – коэффициентом наклона  $b$  линии  $P_r(\delta)$  и коэффициентом  $c$  параболы  $P_b(\delta)$ . Формула (14) справедлива также, если коэффициенты  $b$  и  $c$  выразить через удельные потери (Вт/(кг·мм), Вт/(кг·мм<sup>2</sup>)). Далее в параметрах  $P_r$ ,  $P_b$  первая цифра индекса указывает на частоту ( $f_1$  или  $f_2$ ), вторая – на толщину листа ( $\delta_1$  или  $\delta_2$ ).

Коэффициент наклона прямой  $P_r(\delta)$

$$b = \frac{P_{r11} - P_{r12}}{\delta_2 - \delta_1}. \quad (15)$$

Коэффициент начальных потерь для линеаризованной зависимости  $P_r(\delta)$

$$a = \frac{P_{r11} - P_{r12}}{\delta_2 - \delta_1} \delta_1 + P_{r11}. \quad (16)$$

Коэффициент квадратичной функции  $P_b(\delta)$

$$c = \frac{P_{b11}}{\delta_1^2}. \quad (17)$$

Подставив (15) и (17) в (14), получим значение оптимальной толщины листов на частоте  $f_1$  [21]

$$\delta_{\text{опт}} = \frac{\delta_1^2 (P_{r11} - P_{r12})}{2(\delta_2 - \delta_1) P_{b11}}. \quad (18)$$

Например, для однофазного трансформатора ОСМ1-1,6 М мощностью 1600 В·А в опыте холостого хода зафиксированы следующие показания ваттметра (тип Д5105, класс точности 0,1, диапазон частот 45–500 Гц): на частоте 50 Гц для сердечника из листов толщиной  $\delta_1 = 0,35$  мм  $P_{011} = 20$  Вт (близко к паспортному значению потерь холостого хода), на частоте 60 Гц  $P_{021} = 25,5$  Вт. На частоте 50 Гц для листов толщиной 0,35 мм потери на гистерезис, определенные по (9),  $P_{r11} = 14$  Вт, на вихревые токи, согласно (10),  $P_{b11} = 6$  Вт.

Для определения наклона линии  $P_r(\delta)$  толщина листов значения не имеет, поэтому  $\delta_2$  выбрана больше, чем  $\delta_1$ , так как магнитопровод тех же раз-

меров из более толстых листов собрать легче, чем из тонких. Для сердечника из листов толщиной  $\delta_2 = 0,5$  мм на частоте 50 Гц потери холостого хода  $P_{012} = 24,2$  Вт, на частоте 60 Гц  $P_{022} = 32$  Вт. На частоте 50 Гц для листов толщиной 0,5 мм потери на гистерезис, определенные по (9),  $P_{г12} = 12$  Вт.

Оптимальное значение толщины листов для частоты 50 Гц определим, подставив полученные значения в (18):

$$\delta_{\text{опт}} = \frac{\delta_1^2 (P_{г11} - P_{г12})}{2(\delta_2 - \delta_1) P_{в11}} = \frac{0,35^2 (14 - 12)}{2(0,5 - 0,35)6} = 0,161 \text{ мм.}$$

При данной толщине листов потери в стали, рассчитанные по (13) с подстановкой (15)–(17), составляют 17,78 Вт, что на 12 % меньше, чем при толщине листов 0,35 мм, и на 30 % меньше, чем при толщине листов 0,5 мм. Дальнейшее уменьшение толщины листов  $\delta$  ведет к росту полных потерь, поэтому приведенное значение является минимальным для всех остальных толщин листов магнитопровода данного трансформатора. Методика представленного эксперимента применима для силовых трансформаторов, которые имеют аналогичную толщину листов (пластин) магнитопровода и работают на частоте 50 Гц.

Европейский стандарт DIN EN 10106–2016 регламентирует только четыре позиции толщины полос и листов холоднокатаной электротехнической стали, предназначенных для изготовления магнитопроводов: 0,35, 0,50, 0,65 и 1,00 мм. В странах СНГ используются в основном четыре позиции толщины: 0,20, 0,35, 0,50 и 1,00 мм, несмотря на то что электротехническая изотропная лента, согласно ТУ 14-1-4657–89, выпускается на 14 позициях (от 0,05 до 1,5 мм), а электротехнический лист, согласно ГОСТ 3836–83, – на 26 позициях (от 0,1 до 3,9 мм). Такое разнообразие позволяет перейти на толщину пластин, наиболее близкую к оптимальной.

### **Анализ потерь холостого хода трансформаторов от разных производителей**

Для силовых трансформаторов, у которых ток холостого хода мал и электрическими потерями при проведении опыта холостого хода можно пренебречь, значение  $P_{01}$  для частоты 50 Гц приведено в паспортных данных как потери холостого хода  $P_{xx}$ , т. е. корректно равенство  $P_{xx} = P_0$ . Поэтому, казалось бы, можно не проводить опыт для определения полных потерь на частоте 50 Гц, а найти только полные потери  $P_{02}$  на любой другой частоте, например 60 Гц. Однако паспортные значения  $P_{xx}$  однотипных трансформаторов, изготовленных разными производителями, могут отличаться на 30 % и более (табл. 1), что приведет к искажению результатов



определения гистерезисных и вихретоковых потерь в трансформаторе и оптимальной толщины листов его магнитопровода.

Таблица 1

## Потери холостого хода силовых трансформаторов 10/0,4 кВ, кВт

## Idle loss of power transformers 10/0.4 kV, kW

Производитель	Трансформатор									
	100 кВ·А		250 кВ·А		400 кВ·А		630 кВ·А		1000 кВ·А	
	сухой	масля- ный	сухой	масля- ный	сухой	масля- ный	сухой	масля- ный	сухой	масля- ный
ОАО «Минский электротехнический завод»	0,54	0,29	0,90	0,43	1,20	0,57	1,65	0,90*	2,15	1,10*
ЗАО ГК «Электрощит»	0,55	0,40	0,73	0,58	1,00	0,83	1,4	1,05	1,95	1,55
ХК «Электрозавод»	0,54	0,29	0,90	0,57	1,20	0,83	1,65	1,06	2,15	1,40
ООО «Тольяттинский трансформатор»	0,42	0,31	0,75	0,61	1,15	0,90	1,40	1,25	2,00	1,90
ОАО «Уралэлектротяжмаш»	0,39	0,29	0,75	0,55	0,82	0,80	1,30	1,01	1,90	1,40
ПГ «Трансформатор», г. Подольск	0,42	0,27	0,75	0,53	1,15	0,87	1,40	1,24	2,00	1,60
ООО «Электрощит», г. Чехов	0,39	0,28	0,75	0,52	1,15	0,75	1,50	1,00	1,95	1,40
ОАО «Биробиджанский завод силовых трансформаторов»	–	0,31	–	0,61	–	0,90	–	1,25		1,90
$\Delta P_{xx}, \%$	34,0	38,8	20,9	15,9	17,8	18,2	23,7	21,2	12,3	30,3

\*Для класса энергоэффективности Х2К2.

Отклонения потерь холостого хода  $\Delta P_{xx}$  (за исключением энергоэффективных трансформаторов класса Х2К2) определяли по формуле

$$\Delta P_{xx} = 2 \frac{P_{xx.max} - P_{xx.min}}{P_{xx.max} + P_{xx.min}} \cdot 100 \%,$$

где  $P_{xx.max}$ ,  $P_{xx.min}$  – соответственно максимальное и минимальное значение потерь холостого хода трансформаторов от разных производителей.

Согласно ГОСТ Р52719–2007, предельные отклонения потерь холостого хода от нормированных не должны превышать  $\pm 15 \%$ . Учитывая тот факт, что производители трансформаторов заинтересованы в более выгодной презентации своей продукции, паспортные значения  $P_{xx}$  могут быть округлены и занижены в пределах этих отклонений. Поэтому для получения полноценных значений потерь в стали, а также для выравнивания условий измерений на двух частотах, проводимых с целью расчета по выражениям (9), (10), целесообразно использовать не паспортную величину  $P_{xx}$ , а экспериментальное значение  $P_{01}$ .

**ВЫВОДЫ**

1. Для снижения потерь холостого хода трансформаторов необходимы соответствующие теоретические разработки. Точные значения составляющих полных потерь (гистерезисных и вихретоковых) важны для оптимизации как самой конструкции трансформатора, так и материалов, используемых при его изготовлении.

2. Впервые предложены удобные для инженерных расчетов формулы для определения потерь на вихревые токи и гистерезис на основании результатов двух опытов холостого хода, проведенных на разных частотах.

3. Исходя из того, что с уменьшением толщины листов магнитопровода потери на гистерезис снижаются, а на вихревые токи растут, с использованием четырех опытов холостого хода, проведенных на двух частотах для листов двух толщин, впервые получено выражение оптимальной толщины листов, при которой полные потери в магнитопроводе минимальны. Рассчитанный для трансформатора мощностью 1,6 кВ·А оптимум толщины листов магнитопровода 0,161 мм дает потери в стали на 12 % меньшие, чем при толщине 0,35 мм, и на 30 % меньшие, чем при толщине 0,5 мм. Дальнейшее уменьшение толщины листов ведет к росту полных потерь в стали.

4. Паспортные значения потерь холостого хода трансформатора у разных производителей отличаются более чем на 30 % и могут быть занижены, поэтому данный параметр целесообразно находить в результате эксперимента (опыта холостого хода).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Жежеленко, И. В. Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии / И. В. Жежеленко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35>.
2. СТО 34.01-3.2-011–2017 Трансформаторы силовые распределительные 6–10 кВ мощностью 63–2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания [Электронный ресурс]: стандарт организации ПАО «Россети». 2017. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293734/4293734162.pdf>.
3. Анищенко, В. А. Влияние перегрузочной способности маслонаполненных трансформаторов на пропускную способность электрической сети / В. А. Анищенко, И. В. Гороховик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 310–320. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-310-320>.
4. Najafi, A. Comparison of Core Loss and Magnetic Flux Distribution in Amorphous and Silicon Steel Core Transformers / A. Najafi, I. Iskender // Electrical Engineering. 2018. Vol. 100, Iss. 2. P. 1125–1131. <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0574-7>.
5. Heydari, A. Electromagnetic-Mechanical-Thermal Amorphous Core Transformer Simulation Compare to Conventional Transformers Using FEM / A. Heydari, M. A. Taghikhani // Modares Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18, Iss. 3. P. 95–106.
6. Tatevosyan, A. S. The Study of the Electrical Steel and Amorphous Ferromagnets Magnetic Properties / A. S. Tatevosyan, A. A. Tatevosyan, N. V. Zaharova // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. P. 727–734. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.681>.
7. Effect of Normalizing Annealing Temperature on Precipitates and Texture of Nb-Cr-Bearing Decarburized Grain-Oriented Silicon Steels / Y. Liu [et al.] // Metals. 2019. Vol. 9, Iss. 4. P. 457–462. <https://doi.org/10.3390/met9040457>.

8. Костинский, С. С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкции силовых трансформаторов / С. С. Костинский // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 1–2. С. 14–32. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-14-32>.
9. Hybrid Laminated Iron Core Models Based on Isotropic and Anisotropic Silicon Steels / W. Guan [et al.] // IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Tianjin, 2018. P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/ASEMD.2018.8559039>.
10. Flux and Loss Distribution in Iron Cores With Hybrid T-Joint / W. Guan [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2019. Vol. 29, Iss. 2. P. 1–4. Art No 0602104. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2894947>.
11. Круг, К. А. Основы электротехники / К. А. Круг. М.; Л.: ОНТИ, 1936. 890 с.
12. Тимофеев, И. А. Удельные потери в ферромагнетике [Электронный ресурс] / И. А. Тимофеев // Современные проблемы науки и образования. 2007. № 6, ч. 1. С. 136–142. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=753>. Дата доступа: 05.04.2020.
13. Мишин, Д. Д. Магнитные материалы / Д. Д. Мишин. М.: Высш. шк., 1991. 384 с.
14. Дружинин, В. В. Магнитные свойства электротехнической стали / В. В. Дружинин. М.: Энергия, 1974. 239 с.
15. Общая электротехника / под ред. А. Т. Блашкина. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 392 с.
16. Чечерников, В. И. Магнитные измерения / В. И. Чечерников. М.: МГУ, 1969. 228 с.
17. Verfahren zum Testen eines Transformators und Entsprechende Testvorrichtung: European Patent 1398644A1, МКІ G01R 35/02 / D. Jurzitza. Publ. date 17.03.2004.
18. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 304 с.
19. Plotnikov, S. M. Minimization of Losses in the Magnetic Circuit Due to Optimal Thickness of Plates / S. M. Plotnikov, V. O. Kolmakov // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2020. Iss. 19. P. 39–42. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-19-39-42>.
20. Цыкин, Г. С. Трансформаторы низкой частоты / Г. С. Цыкин. М.: Связьиздат, 1955. 424 с.
21. Способ определения оптимальной толщины листов магнитопровода трансформатора: пат. № 2752353 Рос. Федерация / С. М. Плотников. Опубл. 26.07.2021.

Поступила 16.05.2020 Подписана в печать 21.07.2020 Опубликована онлайн 31.03.2022

## REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V. (2018) The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35> (in Russian).
2. Organization Standard of the Rosseti PJSC. STO 34.01-3.2-011–2017. *Power Distribution Transformers 6–10 kV of Capacity of 63–2500 kVA. Requirements for the Level of Loss of Idling Speed and Short Circuit*. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293734/4293734162.pdf> (in Russian).
3. Anishchenko V. A., Gorokhovik I. V. (2018) Influence of Oil-Filled Transformers Overload Capacity on the Throughput Capacity of the Electrical Network. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 310–320. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-310-320> (in Russian).
4. Najafi A., Iskender I. (2018) Comparison of Core Loss and Magnetic Flux Distribution in Amorphous and Silicon Steel Core Transformers. *Electrical Engineering*, 100 (2), 1125–1131. <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0574-7>.

5. Heydari A., Taghikhani M. A. (2018) Electromagnetic-Mechanical-Thermal Amorphous Core Transformer Simulation Compare to Conventional Transformers Using FEM. *Modares Mechanical Engineering*, 18 (3), 95–106.
6. Tatevosyan A. S., Tatevosyan A. A., Zaharova N. V. (2016) The Study of the Electrical Steel and Amorphous Ferromagnets Magnetic Properties. *Procedia Engineering*, 152, 727–734. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.681>.
7. Liu Y., Zhu Ch., Jia J., Wang Y., Liu Y., Li G. (2019) Effect of Normalizing Annealing Temperature on Precipitates and Texture of Nb-Cr-Bearing Decarburized Grain-Oriented Silicon Steels. *Metals*, 9 (4), 457–462. <https://doi.org/10.3390/met9040457>.
8. Kostinskiy S. S. (2018) The Review of the Condition of Branch of Transformer Manufacture and Tendencies of Development of the Design of Power Transformers. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 20 (1–2), 14–32. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-14-32> (in Russian).
9. Guan W., Zhang D., Yang M., Gao Y., Muramatsu K. (2018) Hybrid Laminated Iron Core Models Based on Isotropic and Anisotropic Silicon Steels. *2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, 2018, 1–2, <https://doi.org/10.1109/ASEMD.2018.8559039>.
10. Guan W., Zhang D., Yang M., Zhu Y., Gao Y., Muramatsu K. (2019) Flux and Loss Distribution in Iron Cores With Hybrid T-Joint. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29 (2), 1–4, Art No 0602104. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2894947>.
11. Krug K. A. (1936) *Fundamentals of Electrical Engineering*. Moscow–Leningrad, ONTI Publ. 890 (in Russian).
12. Timofeev I. A. (2007) Specific Losses in Ferromagnet. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (6, Part 1), 136–142. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=753> (Accessed 5 April 2020) (in Russian).
13. Mishin D. D. (1991) *Magnetic Materials*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 384 (in Russian).
14. Druzhinin V. V. (1974) *Magnetic Properties of Electrotechnical Steel*. Moscow, Energiya Publ. 239 (in Russian).
15. Blashkin A. T. (ed.) (1986) *General Electrical Engineering*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 392 (in Russian).
16. Chechernikov V. I. (1969) *Magnetic Measurements*. Moscow, Moscow State University. 228 (in Russian).
17. Jurzitza D. (2004) *Verfahren zum Testen eines Transformators und Entsprechende Testvorrichtung*: European Patent No 1398644A1 (in German).
18. Bogoroditsky N. P., Pasyukov V. V., Tareev B. M. (1985) *Electrotechnical Materials*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 304 (in Russian).
19. Plotnikov S. M., Kolmakov V. O. (2020) Minimization of Losses in the Magnetic Circuit Due to Optimal Thickness of Plates. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, (19), 39–42. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-19-39-42>.
20. Tsykin G. S. (1955) *Low Frequency Transformers*. Moscow, Svyaz'izdat Publ. 424 (in Russian).
21. Plotnikov S. M. (2021) *Method for Determining Optimal Thickness of Sheets of Magnetic Core of Transformer*: Patent No 2752353 of Russian Federation (in Russian).