

Оценка погрешностей ваттметрового метода определения магнитных потерь в трансформаторах

Сергей Михайлович Плотников^{1, 2}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

² Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия, smplochnikov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5280-6792>

Аннотация. Рассмотрена проблема влияния точности разделения магнитных потерь на составляющие в трансформаторах на эффективность минимизации этих потерь. Описаны различные методы изучения и оценки магнитных свойств электротехнических сталей и мощности магнитных потерь. Показано, что применение ваттметрового метода определения составляющих магнитных потерь в конкретном трансформаторе в отличие от используемых в настоящее время методов определения мощности удельных магнитных потерь не требует специального оборудования и программного обеспечения. Выполнена оценка двух специфических погрешностей ваттметрового метода определения магнитных потерь в сердечнике трансформатора. Первая погрешность связана с погрешностями измерительных приборов (ваттметра и частотомера), вторая – с электрическими потерями при проведении опыта холостого хода. Получены зависимости погрешности электрических потерь от класса точности приборов. Установлено, что для сухого однофазного трансформатора приборные погрешности гистерезисных и вихревых потерь превышают класс точности приборов в 21 и 35 раз соответственно. Для трансформаторов малой мощности (до 5 кВА) учёт электрических потерь в опыте холостого хода занижает потери на гистерезис и завышает потери на вихревые токи, погрешность определения которых может значительно превышать суммарную погрешность определения магнитных потерь. Показано, что для трансформаторов мощностью более 25 кВА погрешность, связанная с учётом электрических потерь в опыте холостого хода, пренебрежимо мала.

Ключевые слова: гистерезис, вихревые токи, сталь, полные потери, опыт холостого хода, приборная погрешность

Для цитирования: Плотников С. М. Оценка погрешности определения магнитных потерь в трансформаторах ваттметровым методом // Измерительная техника. 2021. № 3. С. 40–44. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-40-44>

Evaluation of errors of the wattmeter method for determining magnetic losses in transformers

Sergey M. Plotnikov^{1, 2}

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

² Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia, smplochnikov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5280-6792>

Abstract. The problem of the influence of the accuracy of dividing magnetic losses into components in transformers on the efficiency of minimizing these losses is considered. Various methods of studying and evaluating the magnetic properties of electrical steels and the power of magnetic losses are described. It is shown that the use of the wattmeter method for determining the components of magnetic losses in a specific transformer, in contrast to the currently used methods for determining the power of specific magnetic losses, does not require special equipment and software. An assessment of two specific errors of the wattmeter method for determining the magnetic losses in the transformer core is carried out. The first error is associated with the errors of the measuring devices (wattmeter and frequency meter), the second – with electrical losses during an idle experiment. The dependences of the errors of these losses on the accuracy class of the devices (wattmeter and cymometer) are obtained. It was found that for a dry single-phase transformer, the error of hysteresis losses is 19 times higher than the accuracy class of devices, and the error of eddy-current losses is 32 times. For low-power transformers (up to 5 kVA), taking into account electrical losses in the no-load experiment underestimates the losses due to hysteresis and overestimates the losses due to eddy currents, the error in determining which can significantly exceed the total error in determining the magnetic losses. It is shown that for transformers with a capacity of over 25 kVA, the error associated with taking into account electrical losses in the no-load test is negligible.

Keywords: hysteresis, eddy currents, total losses in steel, no-load experiment, instrumental error

Введение. В настоящее время для изучения и оценки магнитных свойств электротехнических сталей и мощности магнитных потерь в листовых пластинах этого материала

используют два основных способа: измерения образцов в аппаратах Эпштейна и измерения тестером отдельных полос. Методы стандартизированы Международной

электротехнической комиссией (МЭК 60404-2-1996 «Материалы магнитные. Часть 2. Методы измерения магнитных свойств листовой и полосовой электротехнической стали с помощью рамки Эпштейна», МЭК 60404-3-1992 «Материалы магнитные. Часть 3: Методы измерения магнитных свойств трансформаторных листов и полос при помощи прибора для испытания на одном листе»). Эти две системы измерения используются для определения каталожных значений потерь и для сравнения характеристик многослойных сердечников разных производителей.

Образец для аппарата Эпштейна набран из четырёх испытательных шихтованных сердечников, каждый состоит из полос длиной 305 мм и шириной 30 мм), соединённых внахлест и образующих квадрат [1]. Количество полос в сердечниках может составлять 12–24. Вокруг сердечников размещены соединённые последовательно обмотки. Первичная обмотка подключена к источнику питания для создания тока намагничивания. Вторичная обмотка подключена к вольтметру, который измеряет напряжение, пропорциональное плотности магнитного потока. Для обработки результатов измерений используется программное обеспечение LabVIEW 8.5, основанное на математическом анализе. Модернизированный метод, основанный на стандартном тесте Эпштейна, используется для оценки потерь в сердечниках асинхронных машин [2], а в аппарате Эпштейна, описанном в [3], возможно измерение потерь в сердечниках на высоких частотах и больших плотностях потока.

Тестер одной полосы (Single strip tester, SST) предназначен для измерения мощности удельных магнитных потерь и магнитной проницаемости при различных частотах намагничивания [4]. Испытательная полоса, имеющая такие же геометрические размеры, как и в предыдущем методе, с размещёнными вокруг нее двумя обмотками, помещается в магнитопровод из анизотропной кремнистой стали. Обработка результатов осуществляется по той же программе.

Основной задачей исследований магнитных свойств электротехнических сталей и мощности магнитных потерь является разделение полных потерь на составляющие и нахождение их соотношения, поэтому не имеет значения, являются ли потери удельными (в ваттах, делённых на килограмм) или абсолютными (в ваттах), найдены ли они для отдельной пластины сердечника или для сердечника в целом. При использовании описанных выше способов изучения мощности удельных магнитных потерь требуются специальное оборудование и лицензированное программное обеспечение. По сравнению с ними широко распространённый ваттметровый метод выгодно отличается простотой и надёжностью.

В работе [5] предложено потери в магнитопроводе на гистерезис P_r и вихревые токи P_v определять на основании результатов двух опытов холостого хода, проведённых на разных частотах перемагничивания f_1, f_2 : $k = f_2/f_1$. Показания ваттметра имеют вид суммарных потерь в стали $P_{ст} = P_r + P_v$, потери на гистерезис P_r и вихревые токи P_v пропорциональны соответственно частоте и квадрату частоты.

Составим системы уравнений в скалярной и матричной формах соответственно:

$$\begin{cases} P_v + P_r = P_1; \\ kP_v + k^2P_r = P_2; \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} P_r \\ P_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k & k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где P_1, P_2 – показания ваттметра на частотах f_1, f_2 соответственно.

Если выполняется условие $k^2P_1 > P_2 > kP_1$, то матрица (1) является хорошо обусловленной, т. е. малые изменения коэффициентов матрицы или её правой части (вызванные ошибками округления, погрешностями измерительных приборов и т. д.) не приводят к существенным изменениям в решении системы [6]. Если это условие не выполняется, то либо недостаточна точность измерений, либо неверна гипотеза частотной зависимости потерь P_r, P_v . Решение (1) имеет вид

$$P_r = (k^2P_1 - P_2) / [k(k-1)]; \quad (2)$$

$$P_v = (P_2 - kP_1) / [k(k-1)]. \quad (3)$$

Чем точнее определены составляющие потерь в стали, тем эффективнее можно оптимизировать магнитопроводы по критерию минимума магнитных потерь, так как по некоторым параметрам P_r, P_v изменяются разнонаправленно. Например, с уменьшением толщины пластин магнитопровода потери P_v снижаются по квадратичной зависимости, а потери P_r несколько увеличиваются [7, с. 272], что позволяет определить оптимальную толщину пластин [8]. В работе [9] оптимальные размеры зерна электротехнической стали выявлены на основании того, что с увеличением диаметра зерна потери P_v линейно увеличиваются, а потери P_r уменьшаются по зависимости, близкой к логарифмической [10]. В [11] предложено совместное использование в магнитопроводах анизотропной и изотропной электротехнических сталей с различным соотношением P_r, P_v . Как утверждают авторы [11], использование такой гибридной структуры позволяет уменьшить потери в стали до 2 %. В указанных способах используется соотношение гистерезисной и вихревой составляющих потерь, поэтому важное значение приобретает оценка точности определения данных составляющих.

Цель настоящей работы – оценить возможные погрешности ваттметрового метода при измерении гистерезисных и вихревых потерь в магнитопроводах трансформаторов.

Оценка погрешности средств измерений. Погрешности определения потерь на вихревые токи ΔP_v и на гистерезис ΔP_r ваттметровым методом обусловлены погрешностями измерений мощности и частоты в двух опытах. Так как в расчётах используется отношение частот $k = f_2/f_1$, то относительную погрешность измерения частоты выразим через

относительную погрешность измерения коэффициента k в приближённом виде: $\Delta k = 1,7\Delta f$. Для определения вклада данных погрешностей в погрешности потерь на вихревые токи ΔP_B найдём функции чувствительности SV к параметрам P_1 , P_2 , k :

$$SV(P_1) = \frac{dP_B}{dP_1} \frac{P_1}{P_B} = -\frac{P_1}{(k-1)P_B}; \quad (4)$$

$$SV(P_2) = \frac{dP_B}{dP_2} \frac{P_2}{P_B} = -\frac{P_2}{k(k-1)P_B}; \quad (5)$$

$$SV(k) = \frac{dP_B}{dk} \frac{k}{P_B} = \frac{k^2 P_1 - 2k P_2 + P_2}{k^2 (k-1)^2 P_B}. \quad (6)$$

Вероятность наихудшего сочетания данных погрешностей мала, поэтому погрешность определения потерь на вихревые токи ΔP_B найдём как среднеквадратичную [12]:

$$\overline{\Delta P_B} = \sqrt{[SV(P_1)\overline{\Delta P_1}]^2 + [SV(P_2)\overline{\Delta P_2}]^2 + [SV(k)\overline{\Delta k}]^2}, \quad (7)$$

где $\overline{\Delta P_1}$, $\overline{\Delta P_2}$, $\overline{\Delta k}$ – относительные погрешности измерений мощностей и частоты.

После подстановки формул (4)–(6) в выражение (7) рассчитаем относительную погрешность определения потерь на вихревые токи с учётом влияния систематической погрешности путём введения поправочного множителя 1,1:

$$\overline{\Delta P_B} = \frac{1,1}{k(k-1)P_B} \times \sqrt{(kP_1\overline{\Delta P_1})^2 + (P_2\overline{\Delta P_2})^2 + \left[\frac{k^2 P_1 - 2k P_2 + P_2}{k(k-1)}\overline{\Delta k}\right]^2}. \quad (8)$$

Измерения в обоих опытах проводили одним и тем же ваттметром, поэтому $\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P$. Погрешности ваттметра и частотомера считаем одинаковыми $\Delta P = \Delta k = \delta$, где δ – относительная погрешность (класс точности) измерительного прибора. Тогда запишем упрощённое выражение

$$\overline{\Delta P_B} = \frac{1,1\delta}{k(k-1)P_B} \sqrt{(kP_1 + P_2)^2 + \left[\frac{k^2 P_1 - 2k P_2 + P_2}{k(k-1)}\right]^2}. \quad (9)$$

После проведения аналогичных вычислений получим выражение для относительной погрешности определения потерь на гистерезис:

$$\overline{\Delta P_r} = \frac{1,1}{(k-1)P_r} \times \sqrt{(kP_1\overline{\Delta P_1})^2 + \left(\frac{P_2}{k}\overline{\Delta P_2}\right)^2 - \left[\frac{k^2 P_1 - 2k P_2 + P_2}{k^2 (k-1)}\overline{\Delta k}\right]^2}. \quad (10)$$

При равенствах $\overline{\Delta P_1} = \overline{\Delta P_2} = \overline{\Delta P} = \overline{\Delta k} = \delta$ получим упрощённое выражение

$$\overline{\Delta P_r} = \frac{1,1\delta}{(k-1)P_r} \sqrt{\left(kP_1 + \frac{P_2}{k}\right)^2 - \left[\frac{k^2 P_1 - 2k P_2 + P_2}{k^2 (k-1)}\right]^2}. \quad (11)$$

Пример расчёта погрешности определения потерь.

Рассмотрим однофазный трансформатор ОСМ1-1,6М (ООО «Новочебоксарский электромеханический завод», Россия) мощностью 1600 ВА, сердечник магнитопровода которого набран из анизотропной электротехнической стали марки 3412. Суммарные потери в магнитопровode на частоте $f_1 = 50$ Гц составили $P_1 = 20$ Вт. На частоте $f_2 = 60$ Гц ($k = 1,2$) – $P_2 = 25,9$ Вт. Подставив данные значения в формулы (2), (3), получим значения потерь на вихревые токи $P_B = 7,9$ Вт и на гистерезис $P_r = 12,1$ Вт. Погрешности определения потерь в зависимости от класса точности приборов, рассчитанные соответственно по формулам (9), (11), составили: $\overline{\Delta P_r} = 20,7\delta$; $\overline{\Delta P_B} = 35,2\delta$.

Таким образом, при измерении мощности потерь и частоты приборами с классом точности 0,1 для данного трансформатора погрешности определения потерь на гистерезис и вихревые токи составят 2,1 и 3,5 % соответственно.

Оценка погрешности, вызванной электрической составляющей потерь. Несмотря на то, что при проведении опыта холостого хода по обмотке трансформатора протекает малый ток, он вносит искажения в результаты измерения. Оценим эти искажения.

Фактически измеренные в двух опытах холостого хода значения содержат собственно магнитные потери P_{01} , P_{02} (потери в стали при допущении, что электрические потери отсутствуют) и электрические потери в обмотке P_{06} (потери в меди), которые не зависят от частоты перемagnetивания. С учётом тока холостого хода в данных опытах результаты измерений имеют вид

$$P_1 = P_{01} + P_{06}; \quad P_2 = P_{02} + P_{06}.$$

Мощность, выделяющуюся в первичной обмотке при проведении опыта холостого хода, можно определить по паспортным данным трансформатора при допущении, что потери в меди $P_{к.з}$ (потери короткого замыкания) распределены одинаково на первичную и вторичную обмотки [13]:

$$P_{06} = I_0^2 r_1 = \left(\frac{I_0}{100} I_{1н}\right)^2 \frac{P_{к.з}}{2 I_{1н}^2} = \left(\frac{I_0}{100}\right)^2 \frac{P_{к.з}}{2}, \quad (12)$$

где I_0 – ток холостого хода в процентах от номинального тока первичной обмотки $I_{1н}$; r_1 – активное сопротивление первичной обмотки.

Для рассмотренного выше трансформатора ($I_0 = 13$ %, $P_{к.з} = 60$ Вт) потери в обмотке, вызываемые током холостого хода и найденные по формуле (12), равны $P_{06} = 0,51$ Вт.

Чтобы получить уточнённое значение магнитных потерь, необходимо из результата измерений в опыте холостого хода

вычесть электрические потери, возникающие в первичной обмотке при холостом ходе. Тогда скорректированные выражения (2), (3) примут вид

$$P'_r = \frac{k^2 P_1 - P_2 - (k^2 - 1) P_{об}}{k(k-1)}; \quad (13)$$

$$P'_B = \frac{P_2 - k P_1 + (k-1) P_{об}}{k(k-1)}. \quad (14)$$

Из формул (13), (14) следует, что учёт влияния тока холостого хода занижает потери на гистерезис и завышает потери на вихревые токи. Для рассматриваемого примера $P'_r = 11,15$ Вт; $P'_B = 8,34$ Вт; уточнённое значение полных потерь в стали $P'_{ст} = P'_B + P'_r = 19,49$ Вт. Оставшаяся мощность $P_{ст} - P'_{ст} = P_{об} = 0,51$ Вт была затрачена на потери в меди при проведении опытов холостого хода. Рассчитанные потери на гистерезис оказались заниженными на 8,2 %, а потери на вихревые токи – завышенными на 5,4 %. Расчётные формулы:

$$\Delta P_B = \frac{P_B - P'_B}{\sqrt{P_B P'_B}} \cdot 100;$$

$$\Delta P_r = \frac{P_r - P'_r}{\sqrt{P_r P'_r}} \cdot 100.$$

Паспортные данные однофазных сухих трансформаторов многоцелевого назначения ОСМ1 (номинальная мощность S_H , ток холостого хода I_0 , коэффициент полезного действия (КПД), потери в стали P_0 и в меди $P_{к.з.}$) (Каталог трансформаторов серии ОСМ1: [сайт]. URL: <http://itsar.biz/wp-content/uploads/2015/08/ocm1.pdf>), расчётные значения электрических потерь на холостом ходу $P_{об}$ и погрешность определения потерь в стали $\Delta P_0 = P_{об}/P_0 \cdot 100$ представлены в табл. 1.

Для трансформаторов малой мощности, ток холостого хода которых может составлять до 30 % номинального тока, дополнительная погрешность определения потерь в стали ΔP_0 с учётом этого тока соизмерима с систематическими погрешностями, вносимыми измерительными приборами при проведении опыта холостого хода. При этом погрешность ΔP_0 не отражает реальной погрешности определения составляющих магнитных потерь, так как погрешности ΔP_B , ΔP_r разнонаправлены. Если сами мощности потерь суммируются, то погрешности определения этих мощностей вычитаются: $\Delta P_0 = \Delta P_r - \Delta P_B$. Как следует из табл. 1, для рассматриваемого трансформатора мощностью 1600 ВА погрешность определения полных потерь в стали $\Delta P = 2,6$ %, в то время как составляющие этой погрешности $\Delta P_B = 5,4$ %, $\Delta P_r = -8,2$ %.

Электрические потери от протекания тока холостого хода для трёхфазных силовых трансформаторов распределены на три фазы [14]:

$$P_{об} = I_0^2 r_1 = \left(\frac{I_0}{100} I_H \right)^2 \frac{P_{к.з.}}{6 I_H^2} = \left(\frac{I_0}{100} \right)^2 \frac{P_{к.з.}}{6}.$$

Таблица 1

Паспортные и расчётные данные трансформаторов ОСМ1 и погрешность определения потерь в стали

S_H , ВА	I_0 , %	КПД, %	P_0 , Вт	$P_{к.з.}$, Вт	$P_{об}$, Вт	ΔP_0 , %
63	24	83,0	2,7	8,0	0,23	8,50
100	24	87,0	3,2	9,8	0,28	8,82
160	23	88,2	4,7	14,5	0,38	8,16
250	22	90,2	6,1	18,4	0,45	7,30
400	20	93,2	6,8	20,4	0,41	6,00
630	19	93,5	10,2	30,8	0,56	5,40
1000	18	94,2	14,5	43,5	0,70	4,90
1600	13	95,0	20,0	60,0	0,51	2,60
2500	12	96,0	25,0	75,0	0,54	2,20
4000	13	96,5	35,0	105,0	0,85	2,40

Таблица 2

Паспортные и расчётные данные и погрешность определения потерь в стали трансформаторов серии ТМ

S_H , кВА	I_0 , %	P_0 , кВт	$P_{к.з.}$, кВт	$P_{об}$, Вт	ΔP_0 , %
25	3,0	0,12	0,6	0,09	0,075
100	2,2	0,305	2,0	0,16	0,053
400	1,8	0,90	5,9	0,32	0,036
1000	1,7	1,9	12,2	0,87	0,046
6300	0,8	7,4	46,5	0,50	0,007

Кроме того, у таких трансформаторов малы относительные величины параметров I_0 , $P_{к.з.}$. Паспортные данные некоторых силовых трансформаторов наиболее распространённой серии ТМ 6(10)/0,4 кВ (Каталог трансформаторов серии ТМ ООО «Уралэнергосила»: [сайт]. URL: <http://uralenergy.ru/catalog/r-7.html>) и погрешность определения потерь в стали ΔP_0 представлены в табл. 2.

Таким образом, для силовых трансформаторов погрешность определения потерь в стали ΔP_0 пренебрежимо мала, и даже если считать, что погрешности определения составляющих этих потерь ΔP_r и ΔP_B в 2-3 раза превышают ΔP_0 , ими также можно пренебречь.

Закключение. Ваттметровый метод определения составляющих магнитных потерь в конкретном трансформаторе намного проще используемых в настоящее время методов определения мощности удельных магнитных потерь, при его применении не требуется специальное оборудование и программное обеспечение. Однако этому методу присущи специфические погрешности двух видов. По полученным выражениям для погрешностей определения составляющих магнитных потерь в зависимости от класса точности измерительных приборов, найденные при измерении мощности и частоты приборами с классом точности δ погрешности определения потерь трансформатора ОСМ1-1600 на гистерезис и вихревые токи составляют 20,7 δ и 35,2 δ соответственно.

Согласно полученным оценкам дополнительная погрешность, вносимая электрическими потерями при проведении

опыта холостого хода, уменьшается с увеличением паспортной мощности трансформатора. Для трансформаторов малой мощности (до 5 кВА) эта погрешность может превышать приборную погрешность. Для мощных трансформаторов (более 25 кВА) данная погрешность пренебрежимо мала.

Учёт электрических потерь холостого хода завышает потери на вихревые токи и занижает потери на гистерезис, в результате чего погрешность определения полных потерь в стали не отражает реальных значений этих составляющих погрешностей. Если сами составляющие полных потерь суммируются, то погрешности определения этих составляющих вычитаются. Для трансформатора ОСМ1-1600 погрешность потерь на гистерезис составила –8,2 %, на вихревые токи 5,4 %, в то время как погрешность расчета полных потерь равна 2,6 %.

Список литературы

1. Mthombeni T. L., Pillay P., Strnat R., *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, vol. 2 (3), pp. 614–620. <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.895875>
2. Su W.-M., et al., *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, vol. 99, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2886155>
3. Manyage M. J., Pillay P., *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.51>
4. Eldieb A., Evaluation of loss generated by edge-burrs in electrical steel, PhD Thesis, Cardiff University, 2017, 141 p., URL: <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/105536> (дата обращения: 22.11.2020).
5. Плотников С. М. Определение потерь на вихревые токи и на гистерезис в магнитопроводах электрических машин // Измерительная техника. 2020. № 6. С. 54–58. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-54-58>
6. Антюфеев В. С. Вероятностная оценка числа обусловленности матрицы // Сибирский журнал чистой и прикладной математики. 2018. Т. 18. № 1. С. 28–34. <https://doi.org/10.17377/PAM.2018.18.3>
7. Богородицкий М. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. Л.: Энергатоиздат. 1985. 304 с.
8. Plotnikov S. M., Kolmakov V. O., *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, no. 19, pp. 39–42. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-19-39-42>
9. Plotnikov S. M., *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, no. 21, pp. 64–67. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-21-62-67>
10. De Campos M. F., Teixeira J. C., Landgraf F. J. G., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, vol. 301, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.06.014>
11. Guan W. et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29 (2), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2894947>

12. Тойберт П. Оценка точности результатов измерений: Пер. с нем. В. Н. Храменкова; Под ред. Е. И. Сычева. М.: Энергоатомиздат, 1988. 88 с.

13. Plotnikov S. M., *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2019, no. 17, pp. 125–128.

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-17-125-128>

14. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.

References

1. Mthombeni T. L., Pillay P., Strnat R., *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, vol. 2 (3), pp. 614–620. <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.895875>
2. Su W.-M., et al., *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, vol. 99, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2886155>
3. Manyage M. J., Pillay P., *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.51>
4. Eldieb A., Evaluation of loss generated by edge-burrs in electrical steel, PhD Thesis, Cardiff University, 2017, 141 p., available at: <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/105536> (accessed: 22.11.2020).
5. Plotnikov S. M., *Measurement Techniques*, 2020, no. 11, pp. 54–58. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-54-58>
6. Antyufeev V. S., *Siberian Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 28–34. <https://doi.org/10.17377/PAM.2018.18.3>
7. Bogoroditskiy M. P., Pasyunkov V. V., Tareev B. M., *Elektrotehnicheskie materialy*, Leningrad, Energatomizdat Publ., 1985. 304 p. (in Russ.).
8. Plotnikov S. M., Kolmakov V. O., *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, no. 19, pp. 39–42. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-19-39-42>
9. Plotnikov S. M., *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, no. 21, pp. 64–67. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-21-62-67>
10. De Campos M. F., Teixeira J. C., Landgraf F. J. G., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, vol. 301, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.06.014>
11. Guan W. et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29 (2), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2894947>
12. Toybert P. *Ocenka tochnosti rezul'tatov izmerenij*, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 88 p. (in Russ.).
13. Plotnikov S. M., *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2019, no. 17, pp. 125–128. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-17-125-128>
14. Voldek A. I., Popov V. V., *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory*, St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p. (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.11.2020; принята к публикации 04.12.2020.