

Научная статья

УДК 621.314

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-52-57>

Анализ методов определения потерь в магнитопроводе трансформатора

Сергей Михайлович Плотников^{1, 2}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия, smplochnikov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5280-6792>

² Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия

Аннотация. Для эффективной минимизации магнитных потерь и повышения коэффициента полезного действия машин, в частности трансформаторов, необходимо точно разделить полные потери в магнитопроводах электрических машин на гистерезисную и вихрековую составляющие. Для решения указанной задачи предложены три варианта ваттметрового метода, основанные на разной зависимости вихрековых и гистерезисных потерь от частоты перемагничивания, магнитного потока и температуры и названные методами двух частот, двух плотностей и двух температур. Для каждого из трёх методов при разных условиях проведено по два опыта. В опытах холостого хода на двух частотах, при двух плотностях магнитного потока и двух температурах магнитопровода измерены активные мощности, затраченные на нагрев сердечника, и получены выражения мощностей гистерезисных и вихрековых потерь. Результаты экспериментов, проведённых разными методами, согласованы между собой. Проанализированы достоинства и трудности реализации каждого метода. Показано, что комбинация методов позволила определить показатель степени плотности магнитного потока в выражении мощности гистерезисных потерь (коэффициент Штейнмеца) для конкретного трансформатора.

Ключевые слова: магнитопровод, гистерезис, вихревые токи, потери в стали, опыт холостого хода, метод двух частот, метод двух температур

Для цитирования: Плотников С. М. Анализ методов определения потерь в магнитопроводе трансформатора // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 52–57. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-52-57>

Analysis of the methods for determining losses in the transformer magnetic core

Sergey M. Plotnikov^{1, 2}

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, smplochnikov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5280-6792>

² Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Exact separation of total losses in the magnetic cores of electrical machines into hysteresis and eddy current is a serious technical problem, the solution of which is urgently needed to effectively minimise magnetic losses and, therefore, to increase the efficiency of machines, in particular transformers. To solve this problem, the author proposes the wattmeter method, which can be used in three variants. Each of the variants has its own characteristics. This uses the results of two no-load experiments carried out under different conditions. The methods are based on the fact that eddy current and hysteresis losses depend differently on magnetisation frequency, magnetic flux and temperature. Based on measurements in the no-load experiments at two frequencies, two magnetic flux densities and two magnetic core temperatures, expressions for hysteresis and eddy current losses are obtained. The experimental results obtained by the different methods are consistent with each other. The advantages and difficulties of each method are analysed. It is shown that the combination of methods makes it possible to determine the degree of density index for the magnetic flux in the hysteresis loss power expression (Steinmetz factor) in a particular transformer.

Keywords: magnetic core, hysteresis, eddy currents, losses in steel, no-load experiment, two-frequency method, two-temperature method

Введение. Анализ энергоэффективности 25 европейских стран (ЕС-25) показывает, что до трети общих потерь энергии в системах передачи и распределения происходит в распределительных трансформаторах, причём до 70 % теряется в сердечниках магнитопроводов [1]. Для оптимальной конструкции магнитопровода и выбора электротехнических сталей, используемых в электрических устройствах,

важно точное прогнозирование потерь в сердечниках. Ваттметровый метод определения потерь даёт точный прогноз вне зависимости от многочисленных параметров материала сердечника и не требует какого-либо специального испытательного оборудования [2].

Цель статьи – оценить преимущества и недостатки трёх принципиально различных вариантов ваттметрового метода

определения составляющих потерь в магнитопроводе трансформатора – методов двух частот, двух плотностей и двух температур.

Ваттметровый метод. Метод основан на том, что в опыте холостого хода ваттметр показывает суммарную мощность гистерезисных и вихрековых потерь в стали. При изменении условий измерения (частоты, плотности магнитного потока или температуры) меняется соотношение между этими составляющими, за счёт чего их можно вычислить.

Для разделения мощностей потерь в сердечнике, т. е. для определения двух неизвестных величин – мощности гистерезисных потерь P_r и мощности вихрековых потерь P_v , необходимо составить два уравнения. В этих уравнениях использованы результаты измерений мощности полных потерь в опыте холостого хода. Если в качестве базового значения мощности потерь P_1 взять результат измерения, сделанного при номинальных частоте перемагничивания, плотности магнитного потока и при температуре окружающей среды (т. е. результат первого опыта, одинаковый во всех методах), получится значение полных потерь, близкое к паспортному значению потерь холостого хода (потери в стали). Тогда второе измерение можно провести либо на частоте перемагничивания выше или ниже номинальной, либо при плотности магнитного потока ниже номинальной, либо при температуре выше температуры окружающей среды.

Мощности потерь на гистерезис и вихревые токи определяются известными выражениями [3–6]:

$$P_r = k_r B_{\max}^{\beta} f; \quad (1)$$

$$P_v = (\pi B_{\max} f \delta)^2 / (6\rho), \quad (2)$$

где k_r – коэффициент, зависящий от материала сердечника; $B_{\max}$ – максимальное значение плотности магнитного потока; β – коэффициент Штейнмеца; f – частота перемагничивания; δ – толщина листов сердечника; ρ – удельное сопротивление стали сердечника.

Мощности гистерезисных потерь P_r и вихрековых потерь P_v нельзя непосредственно измерить, но их суммарную мощность P (мощность полных потерь в сердечнике) можно определить по показанию ваттметра в опыте холостого хода

$$P = P_r + P_v. \quad (3)$$

Все параметры в формулах (1), (2), за исключением удельного сопротивления стали ρ , не зависят от температуры сердечника. С увеличением температуры сердечника параметр ρ увеличивается, что ведёт к уменьшению мощности вихрековых потерь P_v . Таким образом, для определения составляющих полных потерь в стали, исходя из минимального набора экспериментальных данных, можно выделить три параметра опытов холостого хода: частоту f , плотность магнитного потока $B_{\max}$, температуру T :

$$P_r \propto f; \quad P_v \propto f^2;$$

$$P_r \propto B_{\max}^{\beta}; \quad P_v \propto B_{\max}^2;$$

$$P_r = \text{const}; \quad P_v \propto 1/T.$$

Далее значения частот и плотностей магнитного потока представим в виде отношений, т. е. в виде безразмерных величин, поэтому описанные ниже методы применимы для нахождения как удельных потерь в ваттах, делённых на килограмм, так и для абсолютных потерь в ваттах. Произведение температурного коэффициента сопротивления на температуру – также безразмерная величина. Каждый из трёх вариантов ваттметрового метода прогнозирования потерь имеет свои условия применения.

Метод двух частот (МДЧ). Рассмотрим случай, когда плотность магнитного потока изменяется по синусоидальному закону и постоянна по сечению листа сердечника, а температура сердечника одинакова при проведении опытов холостого хода на любой частоте.

Мощности гистерезисных и вихрековых потерь в магнитопроводе трансформатора можно определять методом двух частот [7]. Однако выражения, содержащие частоты в герцах, неудобны для инженерных расчётов.

В рассматриваемом методе при разомкнутой обмотке низкого напряжения (опыт холостого хода) к обмотке высокого напряжения трансформатора подают номинальное напряжение частотой f_1 и с помощью ваттметра измеряют мощность полных потерь P_1 в указанной обмотке. Затем изменяют частоту подводимого напряжения до значения f_2 и измеряют мощность полных потерь P_{2f} . Мощности гистерезисных и вихрековых потерь вычисляют соответственно по формулам [2]:

$$P_r = (k^2 P_1 - P_{2f}) / [k(k-1)]; \quad (4)$$

$$P_v = (P_{2f} - k P_1) / [k(k-1)], \quad (5)$$

где $k = f_2/f_1$; P_1 , P_{2f} – измеренные ваттметром мощности полных потерь на частотах f_1 , f_2 соответственно.

В работе [8] показано, что коэффициент k_r в уравнении (1) меняется с изменением частоты (до 20 % при изменении частоты от 50 Гц до 2000 Гц). Поэтому при проведении опыта холостого хода частоту f_2 необходимо устанавливать ближе к частоте f_1 . С другой стороны, слишком близкие значения частот дают столь же близкую разность измеренных значений потерь, что ведёт к появлению методической погрешности измерений. Эмпирически установлено, что оптимальной является область частот 50–70 Гц, в которой коэффициент k_r изменяется менее чем на 0,2 %.

Недостаток МДЧ – необходимость источника синусоидального напряжения регулируемой частоты. При питании обмотки трансформатора в опыте холостого хода от полупроводникового преобразователя частоты в кривой магнитного потока неизбежно наличие высших гармоник, что искажает результаты опыта.

Метод двух плотностей магнитного потока (МДПМ). Данный метод применим для малого участка петли гистерезиса (размер участка менее 10 % расстояния от рабочей точки до нулевого значения) при условии линейного уменьшения плотности магнитного потока со снижением приложенного

напряжения. Кроме того, должен быть известен показатель степени β в выражении (1).

Потери на гистерезис P_r для большинства магнитомягких электротехнических сталей зависят от магнитного потока в степени $\beta=1,6$ [9–11]. Так как плотность магнитного потока пропорциональна приложенному напряжению, то при неизменной частоте перемагничивания с уменьшением подводимого к первичной обмотке напряжения пропорционально некоторому $m < 1$ потери на гистерезис согласно (1) уменьшаются с коэффициентом m^β , т. е. $m^{1,6}$, а потери на вихревые токи согласно (2) – с коэффициентом m^2 . При снижении напряжения U_n относительно номинального напряжения U_n так, что $U_n = mU_n$, суммарные потери в стали магнитопровода

$$P_{2U} = m^{1,6}P_r + m^2P_v, \quad (6)$$

С уменьшением коэффициента m растёт погрешность адекватности модели, связанная с нелинейностью петли гистерезиса, а с увеличением m (т. е. с приближением его к единице) растёт методическая погрешность. Эмпирически установлено, что рациональным значением m является значение, близкое к 0,9.

Решив систему уравнений (3), (6) с двумя неизвестными P_r, P_v , получим выражения [12]:

$$P_r = (P_{2U} - m^2P_1) / (m^{1,6} - m^2); \quad (7)$$

$$P_v = (m^{1,6}P_1 - P_{2U}) / (m^{1,6} - m^2), \quad (8)$$

где P_1, P_{2U} – измеренные ваттметром мощности полных потерь при номинальном и пониженном напряжениях соответственно.

Изменение подводимого к первичной обмотке напряжения не требует специального оборудования, необходимого для изменения частоты этого напряжения при сохранении синусоидальности формы кривой. Этим МДПМ выгодно отличается от МДЧ. Недостаток метода – для некоторых сталей коэффициент β отклоняется от значения 1,6.

Метод двух температур (МДТ). В диапазоне 20–100 °С мощность потерь на гистерезис не зависит от температуры сердечника, а удельное сопротивление стали сердечника возрастает с увеличением температуры линейно. Правомочность этих допущений обосновывается, в частности, в работах [13, 14], в которых рассмотрены модели потерь в стали, учитывающие её температуру. В [15] исследуются зависимости магнитной проницаемости и сопротивления стали сердечника от температуры для разных плотностей магнитного потока, устанавливается, что мощность потерь на гистерезис P_r практически не зависит от температуры сердечника.

МДТ основан на том, что согласно закону Ома величина вихревых токов обратно пропорциональна величине удельного электрического сопротивления стали и, следовательно, температуре. Считаем также, что в установившемся режиме сердечник и обмотки сухого трансформатора имеют одинаковую температуру.

Первыми двумя рассмотренными методами определяют значения составляющих потерь только для определённой

температуры. Как правило, это температура проведения опыта холостого хода, при котором нагрев магнитопровода практически отсутствует, т. е. температура окружающей среды. Большую часть времени магнитная система трансформатора имеет установившуюся рабочую температуру, превышение которой над температурой окружающей среды допускается на 75 °С, согласно ГОСТ 52719-2007 «Трансформаторы силовые. Общие технические требования». МДТ позволяет определять составляющие потерь для любой температуры.

Полные потери в стали при температуре T_1

$$P_1 = P_r + P_{v1}, \quad (9)$$

при температуре T_2

$$P_{2T} = P_r + P_{v2}, \quad (10)$$

где P_{v1}, P_{v2} – мощности потерь на вихревые токи при температурах T_1, T_2 соответственно.

С учетом линейной зависимости сопротивления стали от температуры соотношение между потерями P_{v1}, P_{v2} имеет вид

$$P_{v1} = P_{v2} [1 + \alpha(T_2 - T_1)], \quad (11)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления стали магнитопровода.

Если значение α неизвестно, но известны значения удельных сопротивлений стали при различных температурах [16], то коэффициент α вычислим по формуле

$$\alpha = (\rho_2 - \rho_1) / [\rho_1(T_2 - T_1)],$$

где ρ_1, ρ_2 – удельные сопротивления стали при температурах T_1, T_2 соответственно.

В результате вычитания (10) из (9) получим

$$P_1 - P_{2T} = P_r + P_{v1} - P_r - P_{v2} = P_{v1} - P_{v2}. \quad (12)$$

Таким образом, величина P_r исключена из уравнений. Подставив (11) в (12), найдём

$$P_{v2} = (P_1 - P_{2T}) / [\alpha(T_2 - T_1)], \quad (13)$$

где P_1, P_{2T} – измеренные ваттметром мощности полных потерь при температурах T_1, T_2 соответственно.

Подставив (13) в (11), получим

$$P_{v1} = (P_1 - P_{2T}) [1 + \alpha(T_2 - T_1)] / [\alpha(T_2 - T_1)]. \quad (14)$$

Таким образом, измерив полные потери P_1 при температуре T_1 , полные потери P_{2T} при температуре T_2 и зная коэффициент температурного сопротивления стали α , по формулам (13) и (14) можно вычислить мощность потерь на вихревые токи при данных температурах.

Температурный коэффициент сопротивления электро-технической стали α изменяется от 0,0007 °С⁻¹ для стали

с высоким (до 5 %) содержанием кремния до $0,005\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ для сталей, не содержащих кремний [17]. В диапазоне температур 20–100 $^{\circ}\text{C}$ разность между измеренными мощностями ($P_1 - P_{2T}$) для высоколегированных сталей составляет 5,6 % от P_1 , что соизмеримо с погрешностью измерений. Для сталей, не содержащих кремний, эта разность составляет 40 %. Поэтому метод двух температур более точен при определении составляющих потерь в сердечниках из низколегированных сталей при максимальной разнице температур измерения.

Выбор того или иного метода и точность нахождения составляющих потерь во многом определяются наличием и точностью работы соответствующего оборудования (преобразователя частоты, регулятора напряжения, омметра или термопреобразователя). Сложность математической обработки результатов измерений во всех трёх методах равноценна.

Экспериментальное опробование результатов. Полученные теоретические положения проверяли экспериментально на сухом однофазном сухом трансформаторе ОСМ1-1,6М (Россия) с магнитопроводом из холоднокатаной анизотропной стали марки 3412 (температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,0024\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) и толщиной листов 0,35 мм. Мощность трансформатора 1600 Вт, номинальное первичное напряжение $U_{1н} = 220\text{ В}$. Напряжение на первичную обмотку подавали с лабораторного синхронного генератора, ротор которого приводили во вращение двигателем постоянного тока. Этим обеспечивали синусоидальность напряжения на обмотке при любой частоте перемагничивания. Частоту измеряли частотомером Ф5043 (класс точности 0,1, диапазон измерений 25–110 Гц), потери холостого хода фиксировали ваттметром Д5105 (класс точности 0,1, диапазон частот 45–500 Гц), напряжение – вольтметром Д5103 (класс точности 0,1), все указанные приборы российского производства. Во всех трёх методах мощность потерь P_1 , измеренная при частоте 50 Гц, номинальном напряжении $U_n = 220\text{ В}$ и температуре окружающей среды $T_1 = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, составила 20,1 Вт, что близко паспортному значению потерь холостого хода трансформатора.

МДЧ. Методика проведения опытов данным методом описана в [2]. Для частоты 60 Гц мощность полных потерь P_{2T} составила 25,9 Вт. Потери на гистерезис и вихревые токи для частоты 50 Гц, рассчитанные по выражениям (4) и (5), – 12,68 Вт и 7,42 Вт соответственно.

МДПМ. При первичном пониженном напряжении $U_n = 198\text{ В}$ зафиксировали показание ваттметра $P_{2U} = 16,6\text{ Вт}$. Коэффициент $m = U_n / U_n = 198 / 220 = 0,9$, коэффициент Штейнмеца $\beta = 1,6$. Рассчитанные по формулам (7) и (8) мощности потерь на гистерезис и вихревые токи для номинальной плотности магнитного потока составили 12,02 Вт и 8,08 Вт соответственно.

МДТ. Оба опыта холостого хода проводили на частоте 50 Гц в следующей последовательности. При разомкнутой обмотке низкого напряжения к обмотке высокого напряжения подавали номинальное напряжение 220 В и непосредственно после включения трансформатора измеряли потери мощности P_1 в этой обмотке. При этом считали, что магнитопровод имел температуру окружающей среды T_1 (согласно ГОСТ 12119.0-98 «Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Общие требования», измерения

потерь холостого хода необходимо проводить при температуре окружающей среды от 18 до 28 $^{\circ}\text{C}$). Затем к вторичной обмотке подключали номинальную нагрузку, поддерживали рабочий режим в течение 130 минут. Указанное время необходимо для достижения установившейся рабочей температуры (приблизительно четырёхкратное значение постоянной времени нагрева трансформатора, рассчитанное по методике [18]), отключали нагрузку и измеряли потери мощности P_{2T} при температуре T_2 . При этом считали, что обмотки, примыкавшие к сердечнику, успевали нагреться до своей температуры, повысившейся в результате джоулевого тепла. В связи с отсутствием встроенных термопреобразователей температуру T_2 определяли по значению сопротивления первичной обмотки, измеренному до включения трансформатора R_1 и непосредственно после отключения трансформатора от сети R_2 по формуле [19]:

$$T_2 = (R_2 - R_1) / (\alpha R_1) - T_1.$$

При температуре сердечника 95 $^{\circ}\text{C}$ мощность полных потерь $P_{2T} = 18,9\text{ Вт}$.

Мощность потерь на вихревые токи при температуре 23 $^{\circ}\text{C}$, рассчитанная по формуле (14), составила 8,14 Вт, а мощность потерь на вихревые токи при температуре 95 $^{\circ}\text{C}$, рассчитанная по формуле (13), – 6,94 Вт. Мощность потерь на гистерезис при температуре T_1 составила $P_1 - P_{B1} = 20,1 - 8,14 = 11,96\text{ Вт}$, при температуре $T_2 - P_2 - P_{B2} = 18,9 - 6,94 = 11,96\text{ Вт}$.

Результаты измерений тремя методами представлены в таблице.

Максимальное расхождение между результатами, полученными разными методами при 23 $^{\circ}\text{C}$, определяли из выражений

$$\Delta P_r = \frac{P_{r \max} - P_{r \min}}{\sqrt{P_{r \max} P_{r \min}}} \cdot 100,$$

$$\Delta P_B = \frac{P_{B \max} - P_{B \min}}{\sqrt{P_{B \max} P_{B \min}}} \cdot 100,$$

где $P_{r \max}$, $P_{r \min}$ – максимальное и минимальное значения гистерезисных потерь соответственно; $P_{B \max}$, $P_{B \min}$ – максимальное и минимальное значения вихревых потерь соответственно.

Максимальное расхождение результатов трёх методов на частоте 50 Гц, при номинальной плотности потока и температуре 23 $^{\circ}\text{C}$ для гистерезисных потерь $\Delta P_r = 5,8\%$ для вихревых потерь $\Delta P_B = 9,3\%$, что соизмеримо с погрешностями, присущими ваттметровому методу [20].

Результаты измерений мощности потерь тремя методами

Метод	f , Гц	$U_{1н}$, В	T , $^{\circ}\text{C}$	P_r , Вт	P_B , Вт	P , Вт
МДЧ	50	220	23	12,68	7,42	20,1
	60	220	23	–	–	25,9
МДП	50	220	23	12,02	8,08	20,1
	50	198	23	–	–	16,6
МДТ	50	220	23	11,96	8,14	20,1
	50	220	95	11,96	6,94	18,9

Комбинация МДПМ с МДЧ или МДТ позволила решить обратную задачу – определить коэффициент Штейнмеца по формуле [21]:

$$\beta = \ln \left\{ \left[P_{2U} - m^2 (P_1 - P_r) \right] / P_r \right\} / \ln m.$$

Уточнение данного показателя позволило повысить точность вычисления гистерезисных потерь по формуле (1). При значениях $P_{2U}=16,6$ Вт, $P_r=12,68$ Вт (получено в МДЧ) для магнитопровода исследуемого трансформатора

$$\beta = \ln \left\{ \left[16,6 - 0,9^2 (20,1 - 12,68) \right] / 12,68 \right\} / \ln 0,9 = 1,71.$$

Для уточнения составляющих потерь в магнитопроводе значения β подставляли в формулы (7) и (8) вместо значения 1,6. Таким образом, процесс вычисления потерь с помощью МДПМ следует отнести к итеративным.

Закключение. Сравнение методов показало, что преимуществом МДЧ является то, что значения показателей степеней частот составляющих потерь определены достаточно точно в работах многих исследователей, однако данный метод требует дорогостоящего источника синусоидального напряжения регулируемой частоты.

МДПМ прост в использовании, так как изменение напряжения в опыте холостого хода не требует специального оборудования. Однако точность метода зависит от точности определения коэффициента Штейнмеца. Комбинация МДПМ с МДЧ или МДТ позволяет уточнить коэффициент Штейнмеца для стали конкретного трансформатора.

МДЧ и МДПМ определяют значения составляющих потерь только для температуры опыта холостого хода, т. е. для температуры окружающей среды. МДТ позволяет определить составляющие потерь для любой температуры, в частности для установившейся рабочей температуры трансформатора. Методическая погрешность МДТ снижается с увеличением разности температур измерения и с уменьшением процентного содержания кремния в стали магнитопровода.

Сравнение методов определения составляющих потерь для конкретного трансформатора показало, что их результаты согласуются между собой с погрешностью 5,8 % для гистерезисных потерь и с погрешностью 9,3 % для вихревых потерь.

Список источников

1. Hajipour E., Vakilian M., Ghafouri M., *International Transaction of Electrical and Computer Engineers System*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 34–38. <https://doi.org/10.12691/iteces-2-1-6>
2. Плотников С. М. Определение потерь на вихревые токи и на гистерезис в магнитопроводах электрических машин // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 54–58. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-54-58>
3. Bertotti G., *IEEE Transactions on Magnetism*, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 621–630. <https://doi.org/10.1109/20.43994>
4. Chen Y., Pillay P., *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting*, 2002, vol. 2, pp. 759–766. <https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1042645>

5. De Campos M. F., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, vol. 301, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.06.014>
6. Zirka S. E., Moroz Y. I., Marketos P., Moses A. J., *IEEE Transactions on Magnetism*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 286–289. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2032858>
7. Olivares-Galván J. C. et al., *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)*, 2010, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1049/cp.2010.0900>
8. Popescu M., Miller T. J. E., McGilp M., Ionel D. M., Dellinger S. J., Heidemann R. J., *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 2007, pp. 60–66. <https://doi.org/10.1109/07IAS.2007.14>
9. Najgebauer M., Models for Prediction of Energy Loss in Soft Magnetic Materials, *Conference: XII International PhD Workshop OWD*, Wisla, Poland, 23–26 October 2010, pp. 487–482.
10. Ibrahim M., Pillay P., *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342536>
11. Parthasaradhy P., Ranganayakulu S. V., Hysteresis and eddy current losses of magnetic material by Epstein frame method-novel approach, *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 2014, pp. 85–93.
12. Пат. № 2755053 РФ / С. М. Плотников // Изобретения. Полезные модели. 2021. № 26.
13. Xue S., Feng J., Guo S., Peng J., Chu W. Q., Zhu Z. Q., *IEEE Transactions on Magnetism*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2755593>
14. Chen J., Wang D., Cheng S., Wang Y., Zhu Y., Liu Q., *IEEE Transactions on Magnetism*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2432081>
15. Takahashi N., Morishita M., Miyagi D., Nakano M., *IEEE Transactions on Magnetism*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 548–551. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2033122>
16. Марочник сталей и сплавов / Под общей ред. А. С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
17. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. 238 с.
18. Пат. № 2743902 РФ / С. М. Плотников // Изобретения. Полезные модели. 2021. № 7.
19. Иванов И. И., Равдоник В. С. Электротехника. М.: Высш. школа, 1984. 375 с.
20. Плотников С. М. Оценка погрешностей ваттметрового метода определения магнитных потерь в трансформаторах // Измерительная техника. 2021. № 3. С. 40–44. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-40-44>
21. Пат. № 2764780 РФ / С. М. Плотников // Изобретения. Полезные модели. 2022. № 3.

References

1. Hajipour E., Vakilian M., Ghafouri M., *International Transaction of Electrical and Computer Engineers System*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 34–38. <https://doi.org/10.12691/iteces-2-1-6>
2. Plotnikov S. M., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, pp. 904–909. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01866-9>

3. Bertotti G., *IEEE Transactions on Magnetism*, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 621–630. <https://doi.org/10.1109/20.43994>
4. Chen Y., Pillay P., *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting*, 2002, vol. 2, pp. 759–766. <https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1042645>
5. De Campos M. F., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, vol. 301, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.06.014>
6. Zirka S. E., Moroz Y. I., Marketos P., Moses A. J., *IEEE Transactions on Magnetism*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 286–289. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2032858>
7. Olivares-Galván J. C. et al., *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)*, 2010, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1049/cp.2010.0900>
8. Popescu M., Miller T. J. E., McGilp M., Ionel D. M., Dellinger S. J., Heidemann R. J., *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 2007, pp. 60–66. <https://doi.org/10.1109/07IAS.2007.14>
9. Najgebauer M., Models for Prediction of Energy Loss in Soft Magnetic Materials, *Conference: XII International PhD Workshop OWD*, Wisla, Poland, 23–26 October 2010, pp. 487–482.
10. Ibrahim M., Pillay P., *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342536>
11. Parthasaradhy P., Ranganayakulu S. V., Hysteresis and eddy current losses of magnetic material by Epstein frame method-novel approach, *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 2014, pp. 85–93.
12. Plotnikov S. M., RF Patent no. 2755053, *Byull. Izobret.*, no. 26 (2021).
13. Xue S., Feng J., Guo S., Peng J., Chu W. Q., Zhu Z. Q., *IEEE Transactions on Magnetism*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2755593>
14. Chen J., Wang D., Cheng S., Wang Y., Zhu Y., Liu Q., *IEEE Transactions on Magnetism*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2432081>
15. Takahashi N., Morishita M., Miyagi D., Nakano M., *IEEE Transactions on Magnetism*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 548–551. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2033122>
16. *Marochnik staley i splavov [Grade of steels and alloys]*, ed. A. S. Zubchenko, Moscow, Mashinostroenie, 2003, 784 p. (In Russ.)
17. Druzhinin V. V., *Magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskoy stali [Magnetic properties of electrical steel]*, Moscow, Energiya, 1974, 238 p. (In Russ.)
18. Plotnikov S. M., RF Patent no. 2743902, *Byull. Izobret.*, no. 7 (2021).
19. Ivanov I. I., Ravdonik V. S., *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, Moscow, Vysshaya shkola, 1984, 375 p. (In Russ.)
20. Plotnikov S. M., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, pp. 217–222. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01921-5>
21. Plotnikov S. M., RF Patent no. 2764780, *Byull. Izobret.*, no. 3 (2022).

Статья поступила в редакцию 07.10.2021; одобрена после рецензирования 22.11.2021; принята к публикации 29.11.2021.
The article was submitted 07.10.2021; approved after reviewing 22.11.2021; accepted for publication 29.11.2021.