



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01F 27/24 (2024.01); G01R 33/12 (2024.01); G01R 31/62 (2024.01)

(21)(22) Заявка: 2023113571, 24.05.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
24.05.2023Дата регистрации:  
22.03.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.05.2023

(45) Опубликовано: 22.03.2024 Бюл. № 9

Адрес для переписки:

664074, г. Иркутск-74, ул. Чернышевского, 15,  
ФГБОУ ВО "ИрГУПС", отдел организации  
научной работы, специалист отдела, И.С.  
Чернецкая

(72) Автор(ы):

Плотников Сергей Михайлович (RU),  
Щеголева Татьяна Владимировна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования Иркутский государственный  
университет путей сообщения (ФГБОУ ВО  
ИрГУПС) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете

о поиске: RU 2764780 C1, 21.01.2022. RU  
2788080 C1, 16.01.2023. RU 2750134 C1,  
22.06.2021. CN 106249068 A, 21.12.2016. CN  
105929250 A, 07.09.2016.

(54) Способ определения показателя степени магнитной индукции в аномальных потерях сердечника трансформатора

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике, а именно к электрическим машинам и может быть использовано при определении магнитных потерь в трансформаторах. Техническим результатом является возможность определения показателя степени  $\gamma$  магнитной индукции в аномальных потерях для стали сердечника трансформатора. Способ определения показателя степени  $\gamma$  магнитной индукции в аномальных потерях сердечника трансформатора заключается в проведении опытов холостого хода при номинальном и пониженном напряжении и расчет показателя  $\gamma$  по формуле, содержащей значение предварительно найденных гистерезисных,

вихретоковых классических и аномальных потерь ( $P_{\Gamma}$ ,  $P_{\text{В}}$  и  $P_{\text{а}}$ ) на трех частотах  $f_1, f_2, f_3$  при номинальном напряжении, значение полных потерь ( $P_{\Pi}$ ) в стали при пониженном напряжении, и отношение пониженного и номинального напряжений ( $m$ ). Показатель степени магнитной индукции в аномальных потерях определяют по формуле:

$$\gamma = \frac{\ln \left( \frac{P_{\Pi} - m^{1,6} P_{\Gamma} - m^2 P_{\text{В}}}{P_{\text{а}}} \right)}{\ln m}.$$



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

## (12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

H01F 27/24 (2024.01); G01R 33/12 (2024.01); G01R 31/62 (2024.01)

(21)(22) Application: 2023113571, 24.05.2023

(24) Effective date for property rights:  
24.05.2023Registration date:  
22.03.2024

Priority:

(22) Date of filing: 24.05.2023

(45) Date of publication: 22.03.2024 Bull. № 9

Mail address:

664074, g. Irkutsk-74, ul. Chernyshevskogo, 15,  
FGBOU VO "IrGUPS", otdel organizatsii nauchnoj  
raboty, spetsialist otdela, I.S. Chernetskaya

(72) Inventor(s):

Plotnikov Sergej Mikhajlovich (RU),  
Shchegoleva Tatyana Vladimirovna (RU)

(73) Proprietor(s):

Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya Irkutskij gosudarstvennyj  
universitet putej soobshcheniya (FGBOU VO  
IrGUPS) (RU)

## (54) METHOD OF DETERMINING THE DEGREE OF MAGNETIC INDUCTION IN ABNORMAL LOSSES OF A TRANSFORMER CORE

(57) Abstract:

FIELD: electrical engineering.

SUBSTANCE: invention relates to electrical engineering, namely to electrical machines and can be used in determining magnetic losses in transformers. Method of determining the exponent of magnetic induction in abnormal losses of the transformer core consists in conducting open-circuit experiments at nominal and reduced voltage and calculation of index  $\gamma$  by formula containing value of previously found hysteresis, eddy current classical and abnormal losses ( $P_h$ ,  $P_e$  and  $P_a$ ) at three frequencies  $f_1, f_2, f_3$  at rated voltage, value of total losses ( $P_t$ ) in steel at reduced

voltage, and ratio of reduced and rated stress ( $m$ ). Magnetic induction index in abnormal losses is determined by formula:

$$\gamma = \frac{\ln \left( \frac{P_t - m^{1,6} P_h - m^2 P_e}{P_a} \right)}{\ln m}.$$

EFFECT: enabling determination of magnetic induction degree  $\gamma$  in abnormal losses for steel of transformer core.

1 cl

Предлагаемый способ относится к области электротехники и может быть использован для уменьшения магнитных потерь холостого хода в трансформаторах и других электрических машинах.

Согласно действующим в настоящее время представлениям, полные потери в стали  
5 состоят из трех компонентов

$$P = P_{\Gamma} + P_{\text{в}} + P_{\text{а}}. \quad (1)$$

где  $P_{\Gamma}$  - потери на гистерезис;

$P_{\text{в}}$  - вихретоковые классические потери;

10  $P_{\text{а}}$  - вихретоковые аномальные (избыточные) потери.

Для качественного проектирования сердечников с низкими магнитными потерями необходимы уточненные данные о всех трех составляющих полных потерь в стали.

В работе [Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials // IEEE Transactions on Magnetics, 1988, vol. 24, no. 1, pp.621-630. doi: 10.1109/20.43994],  
15 указано, что гистерезисные потери зависят от максимального значения магнитной индукции  $B_m$  в степени  $\alpha$ , вихретоковые классические потери - в степени 2, а вихретоковые аномальные потери - в степени  $\gamma$ .

$$P = k_{\Gamma} \cdot B_m^{\alpha} \cdot f + k_{\text{в}} \cdot B_m^2 \cdot f^2 + k_{\text{а}} \cdot B_m^{\gamma} \cdot f^{1,5}, \quad (2)$$

20 где  $k_{\Gamma}$ ,  $k_{\text{в}}$ ,  $k_{\text{а}}$  - коэффициенты, зависящие от материала и конструкции сердечника;

$f$  - частота перемагничивания. Если степень максимального значения магнитной индукции  $\alpha=1,6$  для гистерезисной составляющей (коэффициент Штейнмеца) определена достаточно точно, степень 2 для вихретоковой классической составляющей получена из формулы, которая описывают известные физические закономерности, то степень  $\gamma$   
25 для вихретоковой аномальной составляющей получена на основании наилучшего соответствия модели и опытных данных с использованием процедуры подбора.

Аномальная составляющая потерь в стали обусловлена микровихревыми токами, генерируемыми движущимися доменными стенками, и считается наименее изученной. Впервые понятие аномальных потерь ввел в 1988 году Бертоцци [Bertotti G. General  
30 properties of power losses in soft ferromagnetic materials // IEEE Transactions on Magnetics, 1988, vol. 24, no. 1, pp.621-630. doi: 10.1109/20.43994], он же эмпирически (используя процедуру подгонки модели к результатам измерений) установил значение показателя  $\gamma=1,5$ . С тех пор это значение повторяется во многих работах, причем оно не зависит от марки стали магнитопровода, толщины листов, из которых набран сердечник, и от  
35 мощности электрической машины. Однако с 1988 года электротехническая сталь претерпела существенные изменения, в то время как показатель  $\gamma$  по-прежнему считается равным 1,5. В работе [Jieli Li, T. Abdallah, C.R. Sullivan. Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms // Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications.2001, pp.2203-2210, vol.4, doi: 10.1109/IAS.2001.955931] указано, что показатель  $\gamma$  может  
40 принимать значение 2.

Известен способ определения показателя магнитной индукции в потерях на гистерезис для стали сердечника трансформатора [патент РФ 2764780, МПК H01F 27/24, G01R 33/12, G01R 31/62, G01R 35/02, опублик. 21.01.2022]. Известный способ определяет показатель степени  $\alpha$ , с которым магнитная индукция входит в гистерезисные потери (коэффициент Штейнмеца), однако он не позволяет найти показатель степени магнитной индукции в аномальных потерях в стали.

Известен способ определения потерь в стали магнитопровода, включающий измерение полных потерь в магнитопроводе тремя опытами холостого хода на трех частотах и

вычисление гистерезисной, вихретоковой классической и вихретоковой аномальной составляющих полных потерь по результатам измерений [патент РФ 2750134, МПК G01R 27/26, опубл. 22.06.2021].

Известный способ не оперирует с таким параметром, как магнитная индукция, поэтому не позволяет определить показатель степени магнитной индукции, с которой аномальная составляющая потерь в сердечнике входит в полные потери.

Изобретение решает задачу непосредственного определения показателя степени магнитной индукции в аномальных потерях сердечника конкретного трансформатора.

Техническим результатом от использования изобретения является возможность определения показателя степени магнитной индукции  $\gamma$ , с которым она входит в выражение аномальных потерь в стальном сердечнике конкретного трансформатора при его работе на номинальной частоте и при номинальном напряжении по результатам трех измерений на разных частотах перемагничивания и одному измерению на номинальной частоте и пониженном напряжении. Знание показателя  $\gamma$  позволит эффективно конструировать материал сердечника и снизить магнитные потери в трансформаторах.

Это достигается тем, что в способе определения показателя степени магнитной индукции в аномальных потерях сердечника трансформатора, включающим вычисление составляющих потерь  $P_{\Gamma}$ ,  $P_{\text{в}}$  и  $P_{\text{а}}$  на основании трех опытов холостого хода, проведенных на трех частотах  $f_1, f_2$  и  $f_3$  при номинальном напряжении  $U_{\text{н}}$  и расчет показателя степени магнитной индукции в аномальных потерях с помощью процедуры подбора, отличающийся тем, что дополнительно проводят опыт холостого хода на частоте  $f_1$  и пониженном номинальном напряжении  $U_{\text{п}}$ , а показатель степени магнитной индукции в аномальных потерях определяют по формуле

$$\gamma = \frac{\ln \left( \frac{P_{\text{п}} - m^{1,6} P_{\Gamma} - m^2 P_{\text{в}}}{P_{\text{а}}} \right)}{\ln m},$$

где  $P_{\Gamma}$ ,  $P_{\text{в}}$ ,  $P_{\text{а}}$  - соответственно потери на гистерезис, классические вихретоковые потери и аномальные вихретоковые потери, определенные по результатам опытов холостого хода на трех частотах  $f_1, f_2$  и  $f_3$  при номинальном напряжении  $U_{\text{н}}$ ;

$P_{\text{п}}$  - полные потери в стали при пониженном напряжении  $U_{\text{п}}$  на частоте  $f_1$ ;

$$m = \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{н}}}.$$

Заявляемый способ определения показателя степени магнитной индукции в аномальных потерях в сердечнике трансформатора отличается расчетом данного коэффициента по предварительно найденным потерям на гистерезис, классическим и аномальным потерям на вихревые токи при номинальном напряжении, измеренному значению потерь в стали при пониженном напряжении и отношению пониженного и номинального напряжений. Заявляемый способ не является математическим методом, так как основан на результатах конкретных измерений.

Формула, связывающая показатель степени магнитной индукции со значениями гистерезисных, вихретоковых классических и вихретоковых аномальных потерь, рассчитанными по результатам опытов холостого хода на трех частотах при номинальном напряжении, результату опыта холостого хода при пониженном напряжении и отношению пониженного и номинального напряжений, получена автором

впервые.

Способ осуществляют следующим образом.

При разомкнутой вторичной обмотке (опыт холостого хода) первичную обмотку трансформатора включают на номинальное напряжение  $U_H$ , с помощью ваттметра  
5 измеряют полные потери в стали на трех частотах  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  и вычисляют гистерезисные потери  $P_a$ , вихретоковые классические потери  $P_b$  и вихретоковые аномальные потери  $P_a$  для частоты  $f_1$  по методике [патент РФ 2750134, МПК G01R 27/26, опубл. 22.06.2021],  
10 Затем подключают к первичной обмотке пониженное на 5... 10% напряжение  $U_{II}$  и на частоте  $f_1$  измеряют полные потери в стали  $P_{II}$ .

Магнитная индукция в трансформаторе пропорциональна приложенному первичному напряжению, причем с увеличением напряжения выше  $U_H$  сердечник переходит в режим насыщения и магнитная индукция практически не меняется. При незначительном  
15 понижении напряжения  $U_H$  (на 5... 10%) магнитная индукция уменьшается в той же пропорции. Поэтому в опыте холостого хода, проведенном при пониженном в  $m$  раз напряжении, при прочих равных условиях потери на гистерезис уменьшатся в  $m^{1,6}$  раз,  
20 классические вихретоковые потери - в  $m^2$  раз, а аномальные вихретоковые потери - в  $m^\gamma$  раз. Зная величины трех составляющих потерь при номинальном напряжении, при вычислении которых показатель  $\gamma$  не использовался, а также зная величину полных потерь при пониженном напряжении, можно определить показатель  $\gamma$ . Полные потери при пониженном в  $m$  раз напряжении

$$P_{II} = m^{1,6}P_{\Gamma} + m^2P_{\text{В}} + m^\gamma P_a, \quad (3)$$

откуда

$$m^\gamma = \frac{P_{II} - m^{1,6}P_{\Gamma} - m^2P_{\text{В}}}{P_a}. \quad (4)$$

30 Формула показателя степени  $\gamma$  имеет вид

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{P_{II} - m^{1,6}P_{\Gamma} - m^2P_{\text{В}}}{P_a}\right)}{\ln m}. \quad (5)$$

35 Пример осуществления способа.

В опыте холостого хода, проведенном на сухом однофазном трансформаторе ОСМ1-1,6М мощностью 1600 ВА, при напряжении первичной обмотки  $U_H=220$  В были зафиксированы следующие показания ваттметра: полные потери в стали на частоте  
40  $f_1=50$  Гц составили  $P_1=20,0$  Вт, на частоте  $f_2=60$  Гц -  $P_2=25,9$  Вт и на частоте  $f_3=70$  Гц -  $P_3=32,4$  Вт. Для частоты  $f_1=50$  Гц вычислены следующие потери:  $P_{\Gamma}=10,4$  Вт,  $P_{\text{В}}=6,5$  Вт и  $P_a=3,1$  Вт. Полные потери в стали при напряжении первичной обмотки  $U_{II}=198$  В

45 на частоте  $f_1=50$  Гц составили  $P_{II}=16,6$  Вт. Коэффициент  $m = \frac{U_{II}}{U_H} = \frac{198}{220} = 0,9$ .

Значение показателя степени  $\gamma$  для стали сердечника определялось из выражения (5)

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{16,6 - 0,9^{1,6} \cdot 10,4 - 0,9^2 \cdot 6,5}{3,1}\right)}{\ln 0,9} = 1,86.$$

5 Таким образом, для сердечника исследуемого трансформатора показатель степени  $\gamma$ , с которым магнитная индукция входит в выражение аномальных потерь, составил 1,86, что соответствует современным представлениям о составляющих потерь в стали. Представленный способ определения показателя  $\gamma$  справедлив также для любого

10

(57) Формула изобретения

Способ определения показателя степени магнитной индукции в аномальных потерях сердечника трансформатора, включающий вычисление составляющих потерь  $P_{\Gamma}$ ,  $P_{\text{В}}$  и  $P_{\text{а}}$  на основании трех опытов холостого хода, проведенных на трех частотах  $f_1, f_2$  и  $f_3$  при номинальном напряжении  $U_{\text{н}}$  и расчет показателя степени магнитной индукции в аномальных потерях с помощью процедуры подбора, отличающийся тем, что проводят дополнительный опыт холостого хода на частоте  $f_1$  и пониженном напряжении  $U_{\text{п}}$ , а показатель степени магнитной индукции в аномальных потерях определяют по формуле

20

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{P_{\text{п}} - m^{1,6} P_{\Gamma} - m^2 P_{\text{В}}}{P_{\text{а}}}\right)}{\ln m},$$

25

где  $P_{\Gamma}$ ,  $P_{\text{В}}$ ,  $P_{\text{а}}$  - соответственно потери на гистерезис, классические вихретоковые потери и аномальные вихретоковые потери, определенные по результатам опытов холостого хода на трех частотах  $f_1, f_2, f_3$  при номинальном напряжении  $U_{\text{н}}$ ;  $P_{\text{п}}$  - полные потери в стали при пониженном напряжении  $U_{\text{п}}$  на частоте  $f_1$ ;

30

$$m = \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{н}}}.$$

35

40

45