



УДК 621.318.395.64

© 2010

Член-корреспондент НАН України А. Е. Божко, Е. М. Иванов,
Е. А. Личкатый

Визуализация процесса изменения магнитного потока в трансформаторе при полигармоническом первичном токе

Пропонується пристрій для аналізу петлі гістерезису ферромагнітного осердя від дії полігармонічного струму.

При исследовании магнитных потоков в ферромагнитных сердечниках в первичной обмотке стандартно используют постоянный ток или синусоидальный ток моногармонического вида [1]. Однако в практике проектирования электромагнитных вибровозбудителей (ЭМВ), особенно предназначенных для виброиспытательных стендов, необходимо учитывать методы вибрационных испытаний изделий на действие полигармонических вибронгрузок [2]. В этом случае управляющие сигналы ЭМВ, являющиеся электрическими токами катушки ЭМВ, представляют собой полигармонические процессы [3]. Кроме того, известно [4], что импульсные процессы могут быть разложены в гармонические ряды, т. е. импульсы также являются полигармоническими процессами. Поэтому очень важно знать изменение магнитного потока Φ в ферромагнитном сердечнике при полигармоническом токе в первичной обмотке. В связи с этим авторы решили экспериментально исследовать поведение магнитного потока Φ в сердечнике трансформатора как при моногармоническом первичном токе, так и при полигармоническом. Для такого эксперимента было создано устройство, способное визуально показывать петлю гистерезиса ферромагнитного сердечника.

Принцип работы этого устройства для моногармонического первичного тока представлен в работе [1]. В нашем случае первичный ток $i_1 = \sum_{k=1}^n I_{ak} \sin \omega_k t$, где I_{ak} — амплитуда k -й гармоники тока i_1 ; ω_k — круговая частота k -й гармоники тока i_1 ; t — время.

Непростым вопросом явился способ формирования тока i_1 . Таких способов может быть несколько. Некоторые из них приведены на рис. 1, а, б, где $\overline{U}_1, \overline{U}_n$ — напряжения источников



Рис. 1

электродвижущих сил (ЭДС); СМ — сумматор; $w_1, w_{1k}, k = \overline{1, n}$, — число витков первичных обмоток трансформатора с ферромагнитным сердечником; ФС — ферромагнитный сердечник; w_2 — вторичная обмотка; E — вторичная ЭДС; $i_1, i_{1k}, k = \overline{1, n}$, — первичные токи.

В схеме, изображенной на рис. 1, а, первичный ток

$$i_1 = \frac{\sum_{k=1}^n U_k - w_1 \frac{d\Phi}{dt}}{z_1}, \quad (1)$$

где z_1 — полное сопротивление первичной стороны трансформатора (Тр); Φ — магнитный поток, наведенный в ФС от тока i_1 .

Величина $E = w_2 d\Phi/dt$. Из (1) видно, что

$$\Phi(t) = \frac{1}{w_1} \int \left(\sum_{k=1}^n U_k - i_1 z_1 \right) dt = \frac{1}{w_2} \int E dt, \quad (2)$$

т. е., интегрируя по времени $E(t)$, можно определить магнитный поток $\Phi(t)$.

Для схемы, изображенной на рис. 1, б, соотношения между физическими величинами следующие (считаем, что первичные обмотки с $w_{1k}, k = \overline{1, n}$, подключены к U_{1k} согласованно):

$$\left. \begin{aligned} U_{1k} &= i_{1k} z_{1k} + w_{1k} \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^n \Phi_k, \\ E &= w_2 \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^n \Phi_k. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь Φ_k — магнитный поток в ФС, создаваемый током i_{1k} и определяемый в соответствии с законом полного тока [5] $i_{1k} w_{1k} G = \Phi_{1k}$, где G — магнитная проводимость ФС, т. е. $G = \mu S/l$, где, в свою очередь, μ — магнитная проницаемость материала ФС; S — площадь поперечного сечения ФС; l — средняя длина магнитной силовой линии (периметра ФС). Заметим, что при переменных $\Phi(t)$ в ФС возникают вихревые токи $i_{\text{в}}(t)$, которые определяются выражением

$$i_{\text{в}}(t) = \frac{E_{\text{в}}(t)}{R_{\text{ФС}}} = \frac{1}{R_{\text{ФС}}} \frac{d}{dt} \Phi(t),$$

где $R_{\text{ФС}}$ — активное сопротивление материала ФС. Для уменьшения $i_{\text{в}}(t)$ ФС изготавливается шихтованным с большим активным сопротивлением каждой пластины (шихты) ФС,

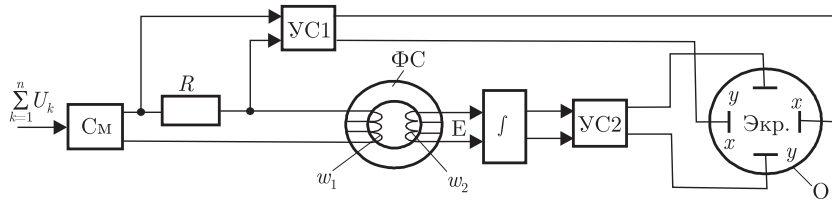


Рис. 2

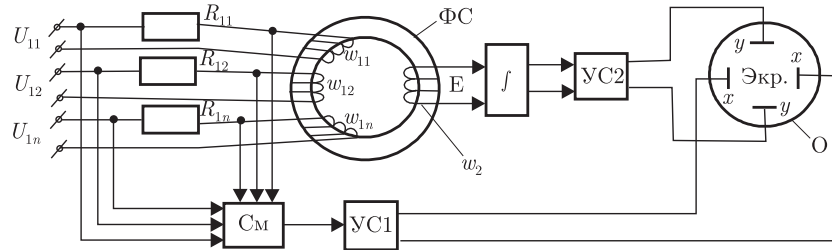


Рис. 3

что обуславливает малое значение вихревого тока i_{bl} , идущего по пластинам (l — одна из пластин в ΦC).

В соответствии с рис. 1, а, б схемы для визуального исследования магнитного потока Φ в ΦC трансформатора будут такие, какие представлены на рис. 2 и 3, соответственно.

По принципу функционирования, схемы, изображенные на рис. 2, 3, одинаковые, но схема рис. 3 более громоздкая. В эксперименте мы изготовили схему, изображенную на рис. 2. В этих схемах следующие обозначения: $R, R_{1k}, k = \overline{1, n}$, — первичные активные сопротивления; $УС1, УС2$ — усилители; \int — интегратор; O — осциллограф; Экр. — экран осциллографа; x, y — пластины осциллографа, соответствующие осям абсцисс x , ординат y ; C_m — сумматор.

Известно [1], что $iw = Hl$, где H — напряженность магнитного поля; l — средняя длина магнитной силовой линии, а $\Phi = BS$, где B — магнитная индукция в ΦC ; S — площадь поперечного сечения ΦC . С учетом этих выражений петля гистерезиса ΦC может быть в координатах B и H , а также Φ и i_1 . В схемах, изображенных на рис. 2, 3, эти координаты Φ и i_1 . Известно [1, 5], что в материале ΦC под действием токов $i_1, \sum_{k=1}^n i_{1k}$ магнитный поток Φ образуется в результате соответствующей ориентации доменов ферромагнетика. Из эксперимента мы выявили (видно было на экране осциллографа), что каждой гармонике $i_1, \sum_{k=1}^n i_{1k}$ соответствует свое движение доменов по полной своей петле гистерезиса.

Вид общей петли гистерезиса показан на рис. 4. Заметим, что при уменьшении величины $U_{1k}, k = \overline{1, n}$, петля гистерезиса $F_k, k = \overline{1, n}$, превращается в наклонный эллипс. Из рис. 4 видно, что, несмотря на превышение U_1 над U_{2k}, \dots, U_{nk} домены материала ΦC реагируют на действия каждого тока $i_{1k}, k = \overline{1, n}$, т.е. поглощение магнитных потоков $\Phi_k, k = \overline{2, n}$, магнитным потоком Φ_1 не происходит. А это означает, что изменение магнитных потоков $\Phi, k = \overline{1, n}$, обуславливает создание соответствующих им вихревых токов $i_{bk}, k = \overline{1, n}$.

Таким образом, в результате эксперимента и его анализа мы пришли к выводу об исключении избирательных доменов в пользу одной гармоники первичного тока, но размах петли гистерезиса зависит от модуля $i_{1k}, k = \overline{1, n}$. Кроме того, в линейной части петли гистерезиса

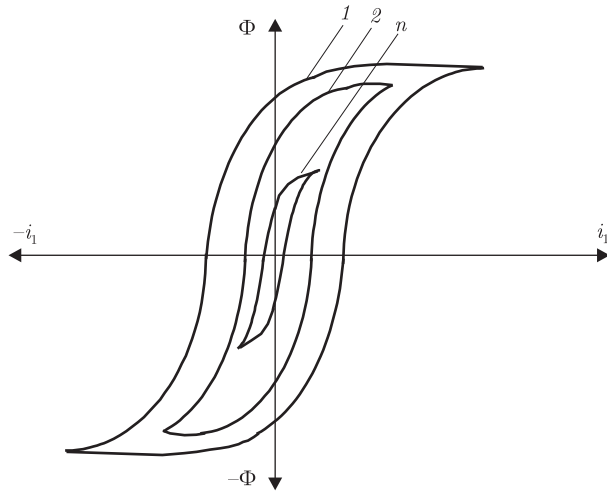


Рис. 4

с максимальным i_{1k} , $k = \overline{1, n}$, остальные петли, соответствующие другим токам i_{1k} , также линейны и поэтому здесь можно применить принцип суперпозиции.

1. Дроздов А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. – Москва; Ленинград: Энергия, 1965. – 240 с.
2. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 1982. – Кн. 1. – 528 с.
3. Божко А. Е., Белых В. И., Иванов Е. М., Мякозлеб К. Б. Теория электромагнитных вибровозбудителей. – Харьков: Изд-во Харьк. нац. автодорожн. ун-та, 2008. – 436 с.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. – Москва: ГИТТЛ, 1956. – 608 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – Москва: Высш. шк., 1978. – 528 с.

Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков
Харьковский национальный автомобильный университет

Поступило в редакцию 28.04.2009

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. E. Bozhko, E. M. Ivanov,**
E. A. Lichkaty

Visual observation of a magnetic flow in a transformer in the presence of a polyharmonic input current

A unit for the analysis of a dynamic hysteresis loop of a ferromagnetic core in the presence of a polyharmonic current is proposed.