

УДК 621.314

В.П. Чайковский, канд. техн. наук  
Е.П. Насыпаная, Ю.И.Доненко

## ВЫБОР НАЧАЛЬНОГО УРОВНЯ ИНДУКЦИИ В МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

*Розглянуто питання про визначення приблизного значення індукції в елементі магнітної системи трансформатора при різних частотах.*

*Рассмотрен вопрос об определении приблизительного значения индукции в элементе магнитной системы трансформатора при разных частотах.*

*Was considered a question about determination of approximate value induction in the element of the transformer magnetic system at the different values frequency.*

Вопрос о правильном выборе индукции в широком диапазоне повышенных частот представляет самостоятельный интерес. Зная зависимость оптимальной индукции от изменения частоты, можно дать обоснованные рекомендации относительно выбора предпочтительных материалов магнитной системы (МС) для различных диапазонов частот с точки зрения обеспечения минимума величины капитализированных затрат для трансформатора [2].

Основным материалом при изготовлении МС трансформаторов остается электротехническая сталь (ЭТС). Характеристики сталей в последнее время существенно улучшены за счет совершенствования ее кристаллографической текстуры ребровой ориентации, уровень которого определяется требованиями потребителей и величиной рабочей продукции. Свойства этой стали зависят также от размеров кристаллов. При низких рабочих индукциях целесообразно использовать сталь с мелким зерном, при высоких индукциях – с крупным, поскольку в такой стали значительна доля потерь от вихревых токов из-за преобладания широких доменов [5].

Магнитные свойства электротехнической стали на переменном токе зависят при одинаковой структуре и текстуре от толщины стального листа и частоты перемагничивания.

Выбор толщины листа определяется оптимальным соотношением требуемых магнитных свойств материала, коэффициента заполнения и трудоемкости изготовления

магнитопровода. Сегодня изготовители сталей предлагают их широкий выбор с различными характеристиками. Изготовитель трансформаторов может выбрать сталь в зависимости от конструкции трансформатора и требуемых его характеристик. В [8] приведены сравнительные характеристики некоторых марок стали при частоте 50 Гц.

Как показано в [9], при частоте до 400 Гц наилучшими магнитными свойствами обладает стальной лист, оптимальная толщина которого равна 0,15 мм, а индукция составляет 1,5 Тл, при частоте 800 Гц оптимальная толщина — 0,08 мм, индукция — 1,0 Тл. Увеличение частоты до 2000 Гц уменьшает оптимальную толщину стального листа до 0,05 мм, а индукцию до 0,5 Тл, сталь этой толщины может успешно применяться для частот менее 3000 Гц. Для более высоких частот до 20000 Гц предназначена сталь толщиной 0,03; 0,02 и 0,01 мм с индукцией равной 0,2 Тл. Снижение рабочей индукции магнитопровода обусловлено резким возрастанием потерь при увеличении частоты.

При проектировании МС трансформаторов с повышенной частотой необходимо выбирать оптимальные технические решения для конструктивного исполнения МС и оптимизировать значение индукции, т.е. решать задачу структурно-параметрической оптимизации.

При определении оптимальной индукции в стержне необходимо учитывать ряд факторов, связанных с конструктивным исполнением МС и расположением обмоток на стержне.

Рассматривая плоскую стержневую МС, можно предположить, что оптимальное зна-

© Чайковский В.П., Насыпаная Е.П.,  
Доненко Ю.И, 2009

чение индукции в стержне может быть на 3...4 % больше, чем в ярме [6]. Допуская, что ярмо – это элемент МС, на который не оказывают влияния другие элементы конструкции трансформатора, можно определить значение индукции в нем, представив его в виде элемента электротехнической стали определенного сечения  $S$  и длины  $l$ , пронизанного потоком  $\Phi$  [7].

Для определения ориентировочного значения оптимальной индукции в элементе ЭТС воспользуемся выражением для капитализированных затрат [4]

$$\tilde{N}_e = G_{\hat{n}\delta} \ddot{O}_{\hat{n}\delta} + k_e p_1 f^\gamma \hat{A}_i^2, \quad (1)$$

где  $G_{\hat{n}\delta}$  – масса элемента,  $\ddot{O}_{\hat{n}\delta}$  – цена стали, грн.;  $k_e$  – коэффициент капитализации потерь, грн;  $\delta_1$  – удельные магнитные потери, возникающие в тонколистовой электротехнической стали при определенных значениях магнитной индукции и частоты перемагничивания;  $f = \frac{f_d}{f_i}$ ,  $\hat{A}_i = \frac{\hat{A}_d}{\hat{A}_i}$  – относительные

значения частоты и магнитной индукции;  $f_d$ ,  $B_d$  – действительные значения частоты и магнитной индукции, для которых ведется расчет удельных потерь;  $f_i$ ,  $B_i$  – частота и значение магнитной индукции, соответствующие базовому значению;  $\gamma$  – степенной частотный показатель, определяемый расчетным или опытным путем, который для трансформаторов повышенной частоты можно определить в зависимости от применяемого материала для магнитопроводов и базовой частоты [1].

Функция капитализированных затрат является унимодальной [7], поэтому решая задачу безусловной оптимизации, можно определить ориентированно оптимальное значение индукции продифференцировав функцию при условии  $\frac{\partial \tilde{N}_e}{\partial \hat{A}_i} = 0$ . В результате, оп-

тимальное значение индукции в ярме определяется следующим выражением:

$$\hat{A}_{\hat{n}\delta} = \sqrt{\frac{\ddot{O}_{\hat{n}\delta} R f_i^\gamma \hat{A}_i^2}{p_1 f_i^\gamma (12a + T_d b)}}, \quad (2)$$

где  $R$  – средние ежегодные отчисления от капиталовложения, %;  $a$  – первая ставка тарифа за потребляемую мощность в часы мак-

симума нагрузок в энергосистемах,  $T_b$  – продолжительность пребывания трансформатора во включенном состоянии в течении года, ч;  $b$  – вторая ставка тарифа за использованную электроэнергию, которую учитывают приборы коммерческого учета.

Определив оптимальное значение индукции в ярме его можно увеличить на 3...4 % и получить экономичное значение индукции в стержне

$$\hat{A}_{\hat{n}\delta \text{ по}} = 1,04 \hat{A}_{\hat{n}\delta}. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет определить ориентированно оптимальное значение индукции при изменении частоты для сердечников из различных материалов при различных значениях удельных потерь.

Для МС трансформаторов повышенной частоты обычно используются текстурованная электротехническая сталь марки 3421-3423, высокопроницаемые стали типа Hi-B (марка МЗН), стали типа RG-H (марка 30RGH). Образцы стали типа Hi-B, RG-H отличаются от стали марок 3421-3423 более высокой степенью совершенства кристаллографической текстуры [1,3], для которых по предлагаемой методике могут быть определены оптимальные значения индукции при различных частотах.

На рис.1 и 2 представлены зависимости индукции  $\hat{A}_{\hat{n}\delta \text{ по}}$  от частоты  $f$  при разных толщинах стального листа  $\hat{a}_{\hat{n}\delta}$  для стали 3421, рассчитанные по (2).

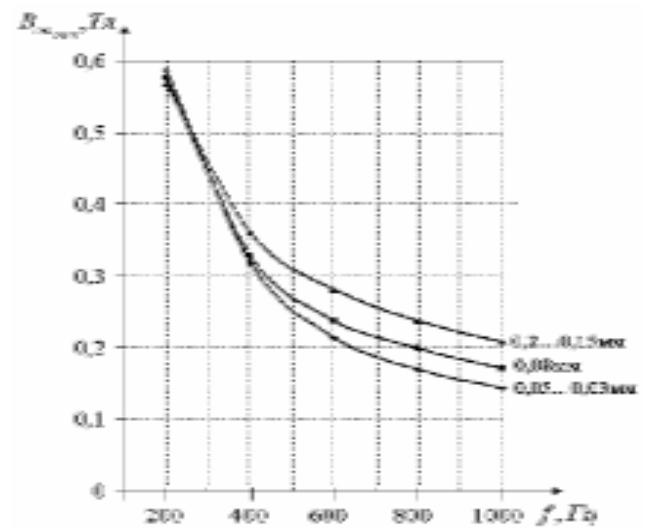


Рис.1. Зависимость  $\hat{A}_{\hat{n}\delta \text{ по}} = f(f)$  для элемента из электротехнической стали марки 3421 при разных толщинах стального листа

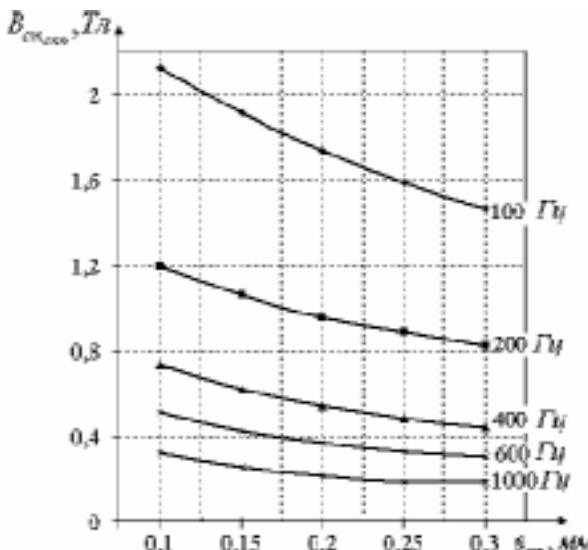


Рис.2. Зависимость  $\hat{A}_{\text{нод}} = f(\hat{a}_{\text{нод}})$  для элемента из электротехнической стали марки 3421 при разных частотах

Полученные зависимости позволяют выбрать наиболее выгодный материал для изготовления МС, ориентировочно определить расчетную индукцию в нем и оценить основные параметры проектируемых трансформаторов в широком диапазоне частот.

#### Список использованной литературы

- Балъян Р.Х., Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств / Балъян Р.Х., В.П. Обрусник. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987. – 168 с.
- Балъян Р.Х. Изменение показателей сухих трансформаторов при повышении рабочей частоты / Балъян Р.Х. // Электричество. – 1989. – №6. – С. 39-46.
- Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / Казаджан Л.Б. Под ред. В.Д. Дурнева. – М.: ООО «Наука и технология», 2000. – 224 с.
- Насыпаная Е.П. Изменение показателей силовых трансформаторов при повышении частоты / Насыпаная Е.П. // Електромашинобуд. та електрообладн.: Міжвід. наук.-техн. Вип. 74. – 2009. – С. 102-106.

5. Пуйло Г.В. Современные тенденции совершенствования силовых трансформаторов / Пуйло Г.В. И.С. Кузьменко, В.В. Тонгалюк. // Електротехніка та електромеханіка. 2008. – № 2. – С. 48–52.

6. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов / Тихомиров П.М. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – С.308-310.

7. Чайковский В.П. Экономическое значение индукции в магнитопроводе распределительных трансформаторов. / Чайковский В.П., В.А. Матухно, Е.П. Насыпаная. // Електромашинобуд. та електрообладн.: Міжвід. наук.-техн.– К.: Вип.62. – 2004. – С.122–124.

8. Силовые трансформаторы: Справ. книга/ Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат. – 2004. – С.114-115.

9. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Т.3. – 3-е изд., перераб. – Л.: Электроатомиздат., 1988. – 728 с.

Получено 9.10.2009



Чайковский  
Владимир Павлович,  
канд. техн. наук, доцент  
каф. электрич. машин  
Одес. нац. политехн.ун-та  
тел: 734-86-81(р);  
743-09-87(д)



Насыпаная  
Елена Петровна,  
аспирант каф.  
электрич. машин  
Одес. нац. политехн. ун-та

Доненко  
Юрий Иванович  
студент магистратуры  
каф. электрич. машин  
Одес. нац. политехн. ун-та