

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАБОЧИХ ЧАСТОТАХ**

*Запропоновано методику розрахунку складових питомих втрат в електротехнічних сталях і алгоритм її реалізації в програмному забезпеченні проектного синтезу магнітних систем перетворювачів електричної енергії при різних частотах. Алгоритм дає змогу розрахувати питомі втрати у діапазоні частот 25-500 Гц, маючи мінімум необхідних початкових даних.*

*Предложена методика расчета составляющих удельных потерь в электротехнических сталях и алгоритм ее реализации в программном обеспечении проектного синтеза магнитных систем преобразователей электрической энергии при различных частотах. Алгоритм позволяет рассчитать удельные потери в диапазоне частот 25-500 Гц при минимуме необходимых исходных данных.*

*The method of the specific losses elements calculation in electrotechnical steels and algorithm of its realization in software of electric energy transformers magnetic systems project synthesis at different frequencies is proposed. Algorithm allows to calculation of specific losses in the frequencies range 25-500 Hz at the minimum of necessary basic data.*

Совершенствование электромагнитных и электромеханических преобразователей электрической энергии идет по направлениям снижения потерь, расхода электромагнитных и конструкционных материалов, повышения надежности и экологичности.

В большинстве электромагнитных и электромеханических преобразовательных устройств (ЭМПУ) основную массу составляет масса магнитной системы (МС), а потери в ней – один из самых затратных видов потерь, поскольку их величина максимальна в большинстве режимов работы включенного в сеть преобразователя. Поэтому проблема снижения массы МС и потерь в МС является одной из важнейших при усовершенствовании ЭМПУ.

Проблема особенно актуальна для силовых трансформаторов, поскольку существующая в энергетических системах необходимость многократной трансформации электрической энергии при ее передаче от электрической станции к потребителям приводит к значительному расходу электротехнической стали и увеличению общих потерь на трансформацию.

Создание в последние десятилетия обмоточных проводов из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) позволяет резко уменьшить массу обмоток трансформаторов и практически устранить нагрузочные потери. При этом уменьшается также масса МС и потери в ней, но все же эти потери остаются еще довольно значительными и основными в таких трансформаторах. Здесь обычно используется традиционный путь снижения массы МС и потерь в МС на основе применения новых, более современных видов электротехнической стали (ЭТС) (аморфной и ЭТС с лазерной обработкой), совершенствование конструктивных исполнений и технологии производства МС.

Наряду с этими мероприятиями дальнейшее и более существенное снижение массы МС и потерь в МС трансформаторных устройств может быть достигнуто повышением уровня рабочей частоты преобразуемого напряжения, особенно в условиях применения новых видов ЭТС, в которых доля потерь от вихревых токов значительно (примерно на порядок) снижена.

Применение электрической энергии с регулируемой (и повышенной) частотой тока получило широкое распространение в преобразовательных установках электроприво-

дов с асинхронными и синхронными электромеханическими преобразователями, которые работают в условиях широкого изменения рабочей частоты и обеспечивают значительную экономию электроэнергии, увеличивают срок эксплуатации технологических установок и оборудования, снижают затраты на ремонт электродвигателей и подключенного к ним оборудования. В ряде технологических процессов в системе преобразования электрической энергии необходимо применение высокочастотных трансформаторов, что позволяет уменьшить массу и габариты электрооборудования, в частности, транспортных и сварочных устройств, к которым предъявляются жесткие ограничения по указанным показателям.

Потери в МС ЭМПУ обусловлены такими факторами, как свойства используемой ЭТС (определяемые каталожными данными в соответствии с ее маркой и толщиной), рабочей частотой  $f$  и индукцией  $B$ , конструктивным исполнением и технологией производства. Конструктивные и технологические факторы увеличивают удельные потери в МС на 10–20 %. Ввиду сложности аналитического описания влияния этих факторов в промышленном проектировании их учитывают с помощью эмпирических коэффициентов [8].

Однако базисной величиной, определяющей уровень потерь в МС, являются удельные потери  $p_{уд}$  в используемой ЭТС.

Решение проблемы снижения массы МС и потерь в МС трансформаторов связано прежде всего с решением задач оптимизации соотношения  $f/B$  при заданном критерии:

определение такого соотношения  $f/B$ , при котором суммарные потери  $\Sigma \Delta P$  в трансформаторе остаются неизменными ( $\Sigma \Delta P = const$ );

определение соотношения  $f/B$ , обеспечивающего минимальную капитализированную стоимость трансформатора  $Z_k$ , т.е.  $Z_k \rightarrow \min$ ;

определение соотношения  $f/B$  при ограничении уровня потерь в  $P_{мс}$  МС и обеспечении минимальной массы МС  $G_{мс}$  ( $\Delta P_{мс} \leq \Delta P_{доп.}, G_{мс} \rightarrow \min$ ).

Для решения проблемы снижения массы МС и потерь в МС путем оптимизации значений рабочей частоты и индукции необходима достаточно точная идентификация зависимостей удельных потерь в стали от индукции и частоты.

Определению оптимальной индукции в зависимости от рабочей частоты в электромагнитных или электромеханических преобразователях посвящено значительное число работ. Однако предложенные методы либо недостаточно точны [9], либо требуют использования эмпирических коэффициентов [4], либо являются трудоемкими при невысокой точности.

В [3] показано, что на основе современной теории ферромагнетизма и математических моделей (ММ) потерь в стали может быть реализован более эффективный подход к решению проблемы идентификации удельных потерь, не требующий использования эмпирических коэффициентов, а основывающийся только на обычных технических данных об ЭТС. Предлагаемая методика определения удельных потерь в стали позволяет достаточно точно ( $\pm 5\%$ ) при заданной частоте и индукции определять удельные потери в ЭТС данной марки и толщины. Она основывается на следующих положениях.

Как известно [9], удельные потери в ЭТС принято рассматривать состоящими из двух составляющих – гистерезисной  $p_{гс}$  и вихревой  $p_{вх}$ , т.е.

$$p_{уд} = p_{гс} + p_{вх}. \quad (1)$$

Для определения составляющих удельных потерь в ЭТС достаточно иметь следующий набор исходных данных:

марку и толщину используемой ЭТС;

кривую намагничивания  $B = f(H)$  для соответствующей толщины, марки стали и некоторой частоты;

зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля  $\mu = f(H)$  для соответствующей толщины, марки стали и некоторой частоты [2,6]. Если нет зависимости  $\mu = f(H)$  в справочной литературе, ее можно получить расчетным путем.

Индукция и напряженность магнитного поля  $H$  связаны следующим соотношением:

$$B = \mu H, \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м.

При повышении частоты приложенного напряжения в ферромагнитном теле все более существенно проявляется действие размагничивающего эффекта вихревых токов. В этом случае индукция распределяется неравномерно по толщине листа, уменьшаясь от края листа к его середине. Амплитуда магнитной индукции при перемещении от поверхности внутрь листа убывает по закону [9], представленному на (рис.1),

$$B(x) = B_{\pi} \left[ \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{2\xi x}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\xi x}{a}\right)}{\operatorname{ch}\xi + \cos\xi} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $\xi$  – отношение толщины стального листа  $a$  к эквивалентной глубине проникновения магнитного потока в стальном листе  $\delta$ .

Эквивалентная глубина проникновения магнитного потока в стальном листе

$$\delta = \frac{1}{k_R} \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}, \quad (4)$$

где  $k_R = 1,4$  – коэффициент уменьшения глубины проникновения для нелинейной ферромагнитной среды [5];  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление стали,  $\Omega \cdot \text{м}$ ;  $f$  – частота приложенного напряжения, Гц.

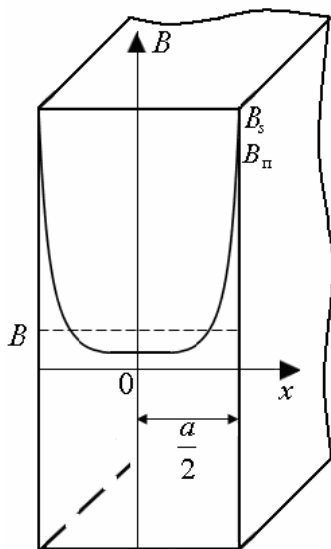


Рис. 1. Распределение индукции в стальном листе при увеличении частоты

Амплитуду магнитной индукции на поверхности листа можно представить [9] следующим соотношением:

$$B_{\pi} = \frac{B \xi}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}\xi + \cos\xi}{\operatorname{ch}\xi - \cos\xi}}. \quad (5)$$

Согласно выражению (5), с увеличением частоты магнитного потока или толщины стального листа, значение амплитуды магнитной индукции на поверхности листа может значительно возрасти и превысит индукцию насыщения  $B_s = 2,03$  Тл, что недопустимо [4]. На высоких частотах потери на вихревые токи зависят только от состояния внешней поверхности образца, а величина  $\xi \gg 1$ , поэтому выражение (5) можно записать

$$B_{\pi} = \xi B / \sqrt{2}. \quad (6)$$

Тогда величину магнитной проницаемости с учетом ограничений по насыщению можно уточнить по выражению

$$\mu = \frac{8\rho}{k_R^2 a^2 \pi f B^2}. \quad (7)$$

Удельные потери на гистерезис [10]

$$p_{гс} = \frac{f S_f}{\mu \gamma} \frac{B^2 a}{\delta} \left( \frac{\operatorname{sh} \frac{a}{\delta} + \sin \frac{a}{\delta}}{\operatorname{ch} \frac{a}{\delta} - \cos \frac{a}{\delta}} \right), \quad (8)$$

где  $S_f$  – фактор формы петли гистерезиса;  $\gamma$  – удельная плотность стали,  $\text{кг/дм}^3$ .

Для определения фактора формы необходимо знать площадь петли гистерезиса. Однако в справочной литературе чаще всего петля гистерезиса отсутствует, что затрудняет определение значения этого фактора. Чтобы определить фактор формы реальную петлю гистерезиса можно заменить эквивалентным ей эллипсом, на основе зависимостей  $B = f(H)$  и  $\mu = f(H)$ . В полях, напряженность которых близка по значению к величине коэрцитивной силы, проницаемость достигает максимума [1]. Поэтому, воспользовавшись зависимостью  $\mu = f(H)$ , можно определить напряженность магнитного поля  $H_{\mu \max}$ , в котором проницаемость достигает максимума (рис.2).

Коэрцитивная сила связана с напряженностью  $H_{\mu \max}$  связаны соотношением [1]:

$$H_c = \frac{H_{\mu \max}}{(1,2 \dots 1,4)}, \quad (9)$$

где 1,2 – используется для ЭТС толщиной 0,15 мм и менее и аморфных сплавов; 1,4 – для ЭТС толщиной 0,23 мм и более;

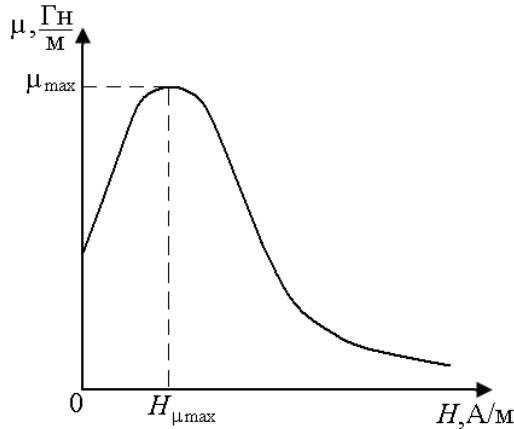


Рис.2. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Зависимость максимальной магнитной проницаемости от остаточной индукции и коэрцитивной силы можно представить соотношением [7]

$$\mu_{\max} = \frac{1}{2} \frac{B_r}{H_c}. \quad (10)$$

Тогда остаточная индукция

$$B_r = 2\mu_{\max} H_c. \quad (11)$$

По полученным значениям коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной индукции  $B_r$  можно построить эллипс, равновеликий по площади петле гистерезиса (рис.3).

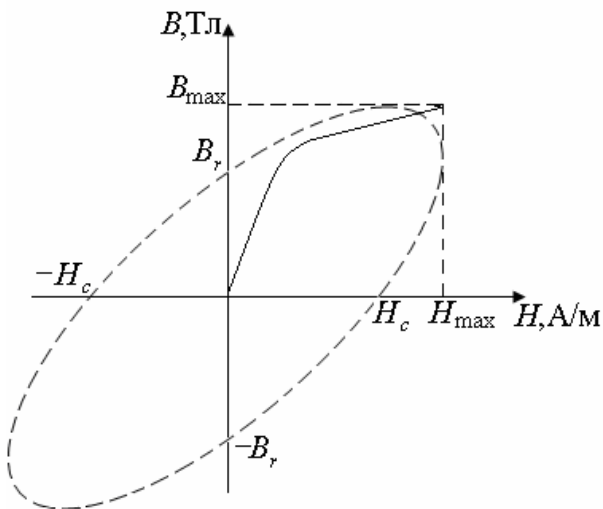


Рис.3. Эллиптическая петля гистерезиса

Площадь эллиптической петли гистерезиса

$$S = \pi B_{\max} H_c. \quad (12)$$

Тогда фактор формы петли гистерезиса [3] можно представить соотношением

$$S_f = \frac{\pi H_c}{2H_{\max}}. \quad (13)$$

Удельные вихревые потери в стальном листе при принятых условиях [9] выражаются зависимостью

$$P_{\text{вх}} = \frac{\pi^2 f^2 B^2 a \delta}{2\rho\gamma} \left( \frac{\text{sh} \frac{a}{\delta} - \sin \frac{a}{\delta}}{\text{ch} \frac{a}{\delta} - \cos \frac{a}{\delta}} \right). \quad (14)$$

Полные удельные потери в листе электротехнической стали с учетом (8) и (14)

$$P_{\text{уд}} = P_{\text{гс}} + P_{\text{вх}} = \frac{f S_f B^2 a}{\mu \gamma \delta} \left( \frac{\text{sh} \xi + \sin \xi}{\text{ch} \xi - \cos \xi} \right) + \frac{\pi^2 f^2 B^2 \delta}{2\rho\gamma} \left( \frac{\text{sh} \xi - \sin \xi}{\text{ch} \xi - \cos \xi} \right). \quad (15)$$

При условии  $\xi \ll 1$  выражение (15) принимает вид

$$P_{\text{уд}} = \frac{2f S_f B^2}{\gamma \mu} + \frac{\pi^2 f^2 B^2 a^2}{6\rho\gamma}. \quad (16)$$

При условии  $\xi \gg 1$  полные удельные потери в стали

$$P_{\text{уд}} = \frac{\pi^2 f^2 B^2 a}{\gamma \sqrt{\mu \rho}} \left( \frac{\pi}{2k_R} + S_f \right). \quad (17)$$

На основе изложенных положений может быть предложена методика расчета удельных потерь в стали МС при заданных значениях магнитной индукции и частоты, алгоритм которой представлен на рис. 4.

**Пример.** Определить удельные потери в сталях 3404, 3408 толщиной 0,35 мм и стали М120–S23 толщиной 0,23 мм, для значений амплитуд магнитной индукции в интервале 0,2÷2 Тл, в диапазоне частот от 50 до 500 Гц по предложенной методике. Кривые намагничивания для данных сталей при частоте 50 Гц представлены в [2,6].

По кривым намагничивания определяют значения напряженностей магнитного поля, соответствующие значениям магнитной индукции в интервале 0,2÷2 Тл, и значения магнитных проницаемостей для соответствующих значений магнитных индукций и



Рис.4. Алгоритм методики расчета удельных потерь в ЭТС

частот. Результаты расчетов удельных потерь по предложенному алгоритму при изменении частот в диапазоне от 50 до 500 Гц и индукций в диапазоне 0,2÷2 Тл для сталей 3404, 3408 толщиной 0,35 мм и стали М120–S23 толщиной 0,23 мм представлены на рис.5.

Анализ полученных результатов и сопоставление их с данными, полученными экспериментальным и расчетным путем [2,6,8], показывают, что предложенная методика обеспечивает достаточно высокую точность ( $\pm 5\%$ ) при определении удельных потерь. При уменьшении толщины стального листа потери от вихревых токов уменьшаются, а гистерезисные потери растут. Поэтому для каждой частоты целесообразно выбирать сталь оптимальной толщины, такой, чтобы уменьшение потерь на вихревые токи не перекрывалось увеличением гистерезисных потерь.

Преимуществом предложенной методики является возможность идентифицировать удельные потери в стали при минимуме необходимых исходных данных (обычно каталожных) для какой-либо частоты в диапазоне от 25 до 500 Гц.

Предложенная методика позволяет определить удельные потери в стали не только

при намагничивании ЭТС вдоль прокатки, но и при изменении угла намагничивания (при наличии кривой намагничивания под соответствующим углом [2]).

Предлагаемый алгоритм определения удельных потерь в стали используется в программе подготовки исходных данных для автоматизированного проектного синтеза распределительных трансформаторов на кафедре электрических машин ОНПУ.

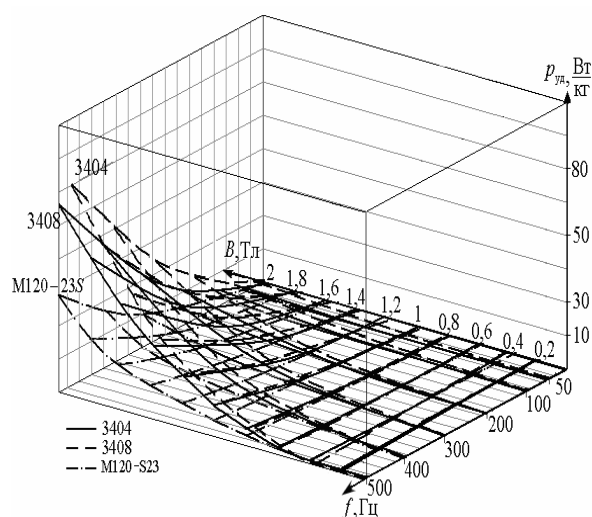


Рис. 5. Удельные потери в сталях 3404, 3408 толщиной 0,35 мм и стали М120–S23 толщиной 0,23 мм в интервале частот 50–500 Гц в зависимости от индукции

## Список использованной литературы

1. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов / И.И.Кифер – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 544 с.

2. Молотилев Б.В. Холоднокатаные электротехнические стали / Б.В.Молотилев –М. : Металлургия, 1989. – 168 с.

3. Насыпаная Е.П. Подход к расчету удельных потерь в электротехнических сталях / Е.П. Насыпаная // Тр. Одес. нац. политехн. ун.: Науч. и производственно-практический сб. по техн. и естествен. наукам. – 2010. – № 1(33). – С. 116-123.

4. Пентегов И.В. Метод определения потерь в стали трансформатора, ориентированный на использование в САПР / И. В. Пентегов, С.В. Рымар // Техн. эл. динамика. – 1995. – № 6. – С. 35-40.

5. Пентегов И.В. Расчет удельных потерь в ферромагнитных материалах при повышенных частотах с учетом нелинейности магнитных характеристик среды / И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Електротехніка і Електромеханіка, 2008. – №2. – С. 64-67.

6. Прокат холоднокатаной тонколистовой электротехнической стали. Каталог продукции. ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат"[Электронный ресурс]// Режим доступа: <http://www.nlmk.ru>

7. Рабкин Л.И. Высокочастотные ферромагнетики / Л.И.Рабкин – М.: Физ-мат. изд., 1960. – 528 с.

8. Трансформаторы силовые. Расчет потерь и тока холостого хода. РТМ 317-86.

9. Шуйский Р.П. Расчет электрических машин / Р.П.Шуйский – Энергия, 1968. – 732 с.

10. Barranger J. Hysteresis and eddy-current losses of a transformer lamination viewed as an application of the pointing theorem [Электронный ресурс] / J. Barranger. – Washington: NASA Technical note. – November 1965. – Режим доступа: [ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.../19660001049\\_1966001049.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.../19660001049_1966001049.pdf).

Получено 07.02.2011



Пуйло  
Глеб Васильевич,  
д-р техн. наук, проф.  
каф. электр. машин  
Одес. нац.  
политехн. ун-та  
тел. (+38048) 734-8479



Насыпаная  
Елена Петровна,  
аспирантка каф.  
электр. машин  
Одес. нац.  
политехн. ун-та.