

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ НА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ СТАЛЬНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Ковалев Е.Б., Шавёлкин А.А., Рак А.Н., Сажин В.А.
Донецкий государственный технический университет
vladimir@koe.dgtu.donetsk.ua

The general approach to definition of power dissipations in steel for electric machines is set up. Is rotined, that by virtue of nonlinearity a magnetic circuit the conditioned hysteresis loop conventional computational methods, specially at nonsinusoidal power supply voltage not effective. The writers offer a technique of calculation of losses with usage analytical description of a magnetization curve and hysteresis loop. The convergence of outcomes of calculation executed pursuant for steel 3404 confirms by experimental data.

При расчете магнитных систем трансформаторов, электрических машин и другого оборудования одной из важнейших задач является определение потерь в стали сердечника.

Намагничивание стальных сердечников зависит не только от мгновенного значения намагничивающего тока, но и от предыдущего его намагничивания, что обусловлено гистерезисом магнитной характеристики стали.

При синусоидальном изменении магнитного потока, мгновенное значение намагничивающего тока и потери мощности на гистерезис можно определить в соответствии с полной кривой намагничивания стали.

Обычно такая задача, ввиду отсутствия общепринятого математического описания петли гистерезиса, решается графо-аналитическим способом и, как следствие, достаточно трудоемкая.

Поэтому на практике для определения потерь в стали используются эмпирические зависимости, среди которых можно отметить следующие:

1. Формула Штейнметца [1]:

$$P = \eta B_m^{1,6} f V, \quad (1)$$

2. Формула Рихтера [1]:

$$P_{st} = (f / 100) [a B_m + b B_m^2] G, \quad (2)$$

где f – частота тока в Гц;

B_m – максимальная индукция, Тл ;

G – масса сердечника, кг;

V – объем сердечника, м³;

a , b и η – коэффициенты.

Для листов стали толщиной 0.5мм - $a=0.9$; $b=3.5$ для обычной стали и $b=2.6$ для высоколегированной.

3. Общепринятая упрощенная формула [1,5]:

$$P_{st} = C f / 100 B_m^2, \quad (3)$$

где: C – коэффициент, зависящий от марки стали.

Использование указанных зависимостей (1,2,3) для определения потерь в стали не вызывает сложностей в обыденных расчетах, но и имеет ряд недостатков, а именно:

1. Ввиду нелинейности кривой намагничивания, коэффициенты, входящие в расчетные выражения не постоянны, а зависят от величины максимальной индукции.

2. Приведенные зависимости позволяют определить усредненные потери в стали, и не позволяют оценить гармонический состав этих потерь.

3. Приведенные зависимости не позволяют определять потери в стали при питании обмотки несинусоидальным напряжением, например от тиристорных преобразователей напряжения или частоты.

Для устранения первого недостатка, например в [4] при расчете потерь в стали трансформатора предлагается следующая зависимость:

$$P_{st} = B_m^m f^n, \quad (4)$$

Для холоднокатаной стали в диапазоне индукций 1-1.5 Тл – значения $n=1,25$ $m=2$.

В диапазоне индукций 1,5 – 1,8 Тл – $n=1.25$ и $m=3$.

В [5] для определения потерь в стали зубцов статора асинхронных электродвигателей предлагается использовать следующее выражение:

$$P_{st} = 1.7 P_{1,50} (f / 50)^\beta B_m^2 G, \quad (5)$$

где

для стали 2013 – $\beta=1.5$; $P_{1,50}=2.5 - 2.6$;

для стали 2312 - $\beta=1.4$; $P_{1.50}=1.75$;

для стали 2411 - $\beta=1.3$; $P_{1.50}=1.6$.

Для устранения второго и третьего недостатков необходимо определять потери в стали по зависимостям, учитывающими форму петли гистерезиса.

Иными словами, применение различных эмпирических зависимостей для определенных условий работы магнитной системы не позволяет провести расчет потерь в стали для условий отличных от принятых, например, при питании магнитной системы от несинусоидального напряжения получаемого от тиристорных преобразователей напряжения и частоты и не позволяет провести спектральный анализ этих потерь.

Поэтому для получения универсальных уравнений расчета потерь в стали необходимо в основе их определения учитывать природу их возникновения, в данном случае петлю магнитного гистерезиса.

Поскольку потери энергии на перемагничивание стали за один период изменения индукции прямо пропорциональны площади ограниченной петлей гистерезиса, то для получения зависимостей расчета потерь в стали необходимо получить математическое описание петли магнитного гистерезиса.

Для математического описания петли магнитного гистерезиса предложено целый ряд зависимостей. Наиболее интересной можно считать зависимость, предложенную в [3], в которой для определения напряженности поля ветвей петли предлагается величину магнитной напряженности для заданной величины магнитной индукции разложить на две составляющие:

$$H = H_1 \pm H_0 = f_1(B) \pm f_0(B), \quad (7)$$

где H_1 - обуславливающая основную кривую намагничивания и описываемая функцией $f_1(B)$;

H_0 - обуславливающая петлю гистерезиса и описываемая функцией $f_0(B)$.

В [3] зависимость $H_0 = f_0(B)$ предложено описать уравнением эллипса, т.е. выражением вида:

$$H_0^2 / H_{0m}^2 + B^2 / B_m^2 = 1, \quad (8)$$

Откуда:

В этом случае, если положить в (8) $B = B_m \sin \alpha$ получим, что $H_0 = H_{0m} \cos \alpha$.

$$H_0 = H_{0m} \sqrt{1 - B^2 / B_m^2},$$

Следовательно, подставив значение H_0 в (7) получим:

На практике значение H_{0m} не постоянно, а зависит от H_m , $H_{0m} = f_0(H_m)$ и поэтому для получения формулы

$$H = f_1(B) + H_{0m} \cos \omega t, \quad (9)$$

расчета потерь в стали необходимо экспериментальное получение этой зависимости для определенного сортамента стали.

Если принять, что значение $H_{0m} = const$ и не зависит от предельного значения H_{1m} , то при определении потерь мощности на магнитный гистерезис можно использовать зависимость:

$$P = KfB_m^2, \quad (10)$$

которая применяется довольно часто, но не отражает нелинейный характер зависимости потерь в стали от индукции в квадрате.

Можно предложить другой подход к описанию петли магнитного гистерезиса, а именно, положить, что не напряженность поля, а индукция B , определяющая противо-Э.Д.С в обмотке состоит из двух составляющих:

$$B = B_1 \pm B_0, \quad (11)$$

где B_1 - основная индукция, создаваемая МДС обмотки;

B_0 - остаточная индукция, сохранившаяся от предыдущего состояния магнитной цепи.

Значение индукции B_1 может быть использовано для определения напряженности поля по основной кривой намагничивания.

Для получения гистерезиса необходимо, чтобы остаточная индукция B_0 опережала индукцию B во времени на некоторый угол, например на 90 градусов.

Если положить, что $B = B_m \sin \alpha$, то $B_0 = B_{0m} \cos \alpha$, где $B_{0m} = f(B_m)$ определенным образом заданная функция.

Так как для каждой марки стали имеется предельная величина остаточной индукции B_{00m} для представления функции $B_{0m} = f(B_m)$ можно воспользоваться экспоненциальной зависимостью вида:

$$B_{0m} = B_{00m} (1 - e^{-kB_m^n}), \quad (12)$$

где k и n - коэффициенты, полученные экспериментальным путем.

Предельная величина остаточной индукции может быть определена из экспериментальных данных потерь на гистерезис для каждой марки стали по рассмотренной ниже методике.

Для расчета были использованы экспериментальные данные [4] по определению потерь в стали 3404. Следует отметить, что полные потери мощности в стали включают в себя потери на вихревые токи $P_{вт}$ и на гистерезис $P_{гис}$.

По данным, приведенным в [4] для холоднокатанной стали с толщиной листа 0,3-0,35 мм потери на гистерезис составляют 25-35 % от общих потерь. Потери на вихревые токи составляют 65-75% от общих потерь и зависят от индукции и толщины листа.

В соответствии с [1] потери на вихревые токи не зависят от формы питающего напряжения и могут быть определены из следующего выражения:

$$P_{вт} = K(fdB_m)^2 / \rho G, \quad (13)$$

где K – коэффициент,

f – частота, Гц;

d – толщина листа, мм;

B_m – максимальная индукция, Тл;

ρ – удельное сопротивление стали, Ом·м;

G – масса сердечника, кг.

Для определения потерь на вихревые токи можно воспользоваться данными [4] по потерям мощности в стали при различной толщине листа d .

Таблица 1 - Потери для стали 3404 при разной толщине листа

Вт, Тл	1.0		1.5		2.0	
d , мм	0.300	0.350	0.30	0.35	0.30	0.35
P , Вт/кг	0.450	0.475	1.03	1.10	2.82	3.00

С учетом данных таблицы 1 из (13) можно получить следующее выражение для определения удельных потерь мощности на вихревые токи:

$$P_{вт} = 0.41510^{-3} f^2 B_m^2 d^2, \quad (14)$$

Для частоты 50 Гц и толщины листа 0,35 мм это выражение (14) принимает вид:

$$P_{вт} = 0.127 B_m^2,$$

Исходя из полных потерь в стали по расчетным потерям на вихревые токи $P_{вт}$ можно определить потери на гистерезис $P_{гис} = P_{ст} - P_{вт}$.

Все составляющие потерь, рассчитанные для различных значений индукции приведены в таблице 2.

Анализируя эти потери можно определить коэффициенты k и n для расчета остаточной индукции по выражению (12).

В частности, для стали 3404 при описании основной кривой намагничивания стали зависимостью:

$$H = k1B + k5B^5 + k7B^7, \quad (15)$$

позволяющей аппроксимировать магнитную цепь до 1.5 Тл при коэффициентах регрессии: $k1 = 1.265442$, $k5 = -1.01162$ и $k7 = 0.679789$ получены следующие коэффициенты для расчета потерь на гистерезис по уравнению (12): $B_{овм} = 0.56$, $K = 1.4$, $n = 2$.

Таблица 2 - Потери мощности в стали 3404 с толщиной листа 0,35мм

Вт, Тл	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.3
P , Вт/кг	0.028	0.093	0.19	0.32	0.475	0.675	0.785
$P_{вт}$, Вт/кг	0.0051	0,0203	0,0457	0,0813	0,127	0,183	0,215
$P_{гис}$, Вт/кг	0.0229	0,0727	0,1443	0,2387	0,330	0,492	0,57
Вт, Тл	1.4	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.0
P , Вт/кг	0.93	1.10	1.295	1.60	2.00	2.45	3.00
$P_{вт}$, Вт/кг	0,249	0,286	0,325	0,367	0,411	0,458	0,508
$P_{гис}$, Вт/кг	0,681	0,814	0,970	1,233	1,589	1,992	1,492

В дальнейшем, исходя из заданного значения напряжения, определяется значение индукции и напряженности поля. В соответствии с законом полного тока рассчитывается мгновенное значение тока намагничивающей катушки и мгновенной мощности потерь с последующим усреднением.

В таблице 3 произведено сопоставление опытных и расчетных данных потерь на гистерезис полученных на основании выражения (12). Следует отметить, что разработанная методика расчета позволяет получить мгновенное значение мощности потерь. Это дает возможность производить спектральный анализ потерь, что важно при несинусоидальном (полигармоническом питании).

Таблица 3 - Сравнительная оценка экспериментальных данных и результатов расчета

Вт, Тл	0.6	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
Роп, Вт/кг	0.144	0.239	0.330	0.492	0.570	0.621	0.813	0.970	1.23
Ррас., Вт/кг	0.144	0.274	0.406	0.524	0.587	0.667	0.783	0.96	1.23

Анализируя сказанное можно сделать следующие выводы:

1. Применение различных эмпирических зависимостей для определенных условий работы магнитной системы не позволяет провести расчет потерь в стали для условий отличных от принятых, например при питании магнитной системы от несинусоидального напряжения получаемого от тиристорных преобразователей частоты и не позволяет провести спектральный анализ этих потерь.
2. Для получения универсальных уравнений расчета потерь в стали необходимо в основу их определения положить природу их возникновения, в данном случае петлю магнитного гистерезиса.
3. Поскольку в настоящее время нет данных по математическому описанию магнитной петли гистерезиса целесообразно провести работы по экспериментальному изучению кривых магнитного гистерезиса различных электротехнических сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Круг К.А. Основы электротехники. Т.1 и Т2. М.: ГОСЭНЕРГОИЗДАТ. 1946.
2. Зевеке Г.В., Ионкин И.Л., Нетушил А.В., Страхов С.А. Основы теории цепей. Энергия. Москва. 1975. С. 750.
3. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. Энергия. Москва. 1968. С.503.
4. Тихомиров П.М. Проектирование трансформаторов. М.: Энергоатомиздат. 1981. с.525.
5. Гурин, Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. Энергия. М. 1978. С.480.