

Представление шихтованных сердечников в задачах расчета магнитных полей

В.М. Гандшу

Шихтованные сердечники присутствуют практически во всех электротехнических устройствах, работающих не только на переменном, но и на постоянном токе. Поэтому при расчете магнитных полей встает задача корректно задавать свойства таких сердечников, чтобы в максимальной степени исключить погрешность расчета. Эта задача несколько различается при решении задач магнитостатики и задач определения переменных магнитных полей. Рассмотрим эти задачи отдельно.

В задачах магнитостатики для любого блока должны быть заданы магнитная проницаемость, ток, протекающий перпендикулярно плоскости модели, и коэрцитивная сила. Для шихтованных сердечников из этих трех параметров должен быть задан только первый. Если в модели сочетаются блоки разной магнитной природы (ферромагнитные сплошные, ферромагнитные шихтованные, немагнитные), т.е. практически во всех случаях, то надо иметь в виду, что на единицу глубины вдоль оси Z в шихтованных сердечниках приходится проводящего материала (чистой стали) несколько меньше. В традиционных расчетах это принято учитывать с помощью коэффициента заполнения пакета сталью k_{st} , который представляет собой отношение суммарной длины чистой стали к конструктивной длине шихтованного пакета. При современном уровне производства можно принять этот коэффициент равным $k_{st}=0.93$. При расчетах с помощью пакета ELCUT в случае линейной постановки задачи необходимо ввести постоянную магнитную проницаемость по одной или двум осям с учетом шихтовки, который в данном случае можно произвести просто путем умножения реальной проницаемости данной марки стали на k_{st} .

При нелинейной задаче магнитостатики необходимо ввести кривую намагничивания $B(H)$, где B и H индукция и напряженность поля в материале сердечника. Для учета шихтовки следует иметь в виду, что если на входе в рассматриваемый шихтованный пакет имеет место индукция B , то фактическая индукция в шихтованном пакете B_1 будет равна

$$B_1 = B/k_{st}$$

При плоской постановке задачи неравенство индукций вдоль линии потока задать не представляется возможным. Поэтому необходимо учесть шихтовку производящей кривой намагничивания, т.е. величине индукции B поставить в соответствие величину напряженности поля не H , которая определяется свойствами стали при индукции B , а H_1 , которая соответствует индукции B_1 по исходной кривой $B(H)$. Таким образом для шихтованного материала вместо кривой $B(H)$ вводится кривая $B(H_1)$. Для практического перестроения кривой намагничивания это положение лучше переформулировать следующим образом: напряженность магнитного поля H в шихтованном пакете соответствует не индукции B , как это было бы в массивном материале, а индукции на ΔB меньшей, где

$$\Delta B = B \cdot (1/k_{st} - 1) \quad (1)$$

Однако это соотношение справедливо только до определенного уровня индукции (примерно до 1.8 Тл). При дальнейшем росте насыщения магнитная проводимость воздушных промежутков становится уже сравнимой с проводимостью стальных участков, часть потока ответвляется в промежутки, так, как это происходит при сильном насыщении зубцов электрических машин: часть потока при сильном насыщении ответвляется из зубцов в соседние пазы. Ввиду сходства этих явлений метод учета также может быть заимствован из классической теории электрических машин [1]. В результате выражение (1) несколько усложняется и принимает вид

$$\Delta B = (B - \mu_0 H) \cdot (1/k_{st} - 1) \quad (2)$$

где μ_0 – удельная магнитная проводимость воздуха.

При подстановке в (2) значения коэффициента заполнения $k_{st}=0.93$ получаем

$$\Delta B = 0.075 \cdot (B - \mu_0 H) \quad (3)$$

Процесс перестроения кривой намагничивания проиллюстрирован на рис. 1.

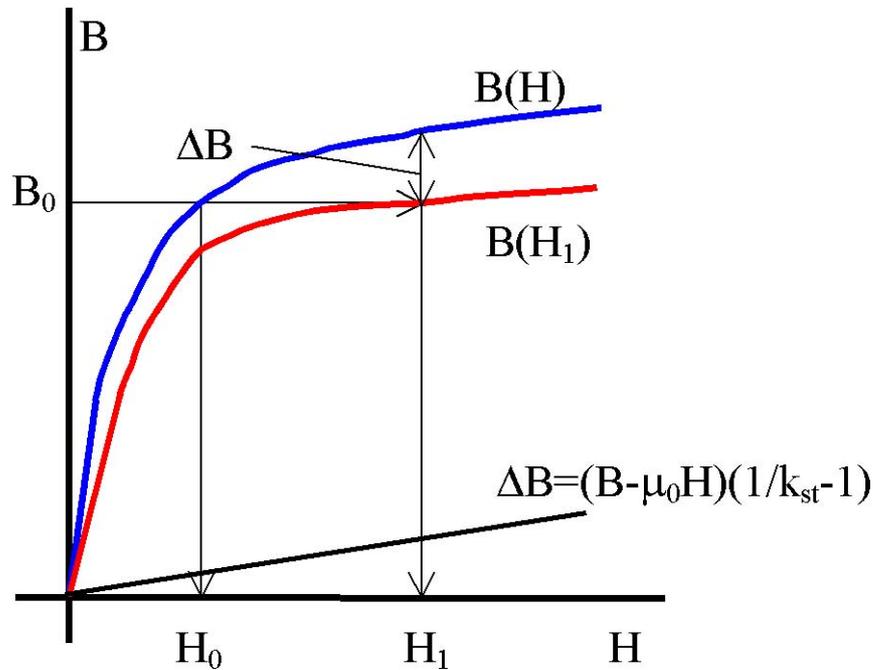


Рис 1. Процесс перестроения кривой намагничивания

Из каждой ординаты B исходной кривой $B(H)$ вычитается величина ΔB , определенная по формуле (3). Таким образом получается требуемая кривая $B(H_1)$. Для какого-либо произвольного значения индукции B_0 , которому на исходной кривой соответствует напряженность магнитного поля H_0 , теперь соответствует величина напряженности H_1 . Разумеется, для снижения трудоемкости целесообразнее это перестроение провести программным методом с помощью любого пакета математических программ, например MathCAD.

В сильных полях разница между H и H_1 становится весьма существенной. Так, для весьма распространенной холоднокатаной изотропной стали марки 2211 индукции $B=1.3$ Тл соответствует напряженность поля $H=550$ А/м. При учете шихтовки получаем фактическую индукцию

$$B_1 = 1.3/0.93 = 1.4 \text{ Тл,}$$

а этой индукции соответствует напряженность поля $H_1=1000$ А/м, т.е. при различии индукций в 7% получаем различие в напряженности поля более 80%. Очевидно, что с ростом насыщения это различие становится еще больше. Следует отметить, что подобным же образом можно учитывать различие в размерах по оси Z и для массивных блоков, если они включены последовательно в магнитном отношении.

При расчете переменных магнитных полей для шихтованного блока необходимо кроме магнитной проницаемости ввести еще и электропроводность. Для ориентировочных расчетов ее можно задавать равной нулю, но тогда полностью исключается влияние вихревых токов, которое сказывается и в явлениях вытеснения, и в появлении потерь в сердечнике. Эти потери в машинах и трансформаторах составляют порядка 20-30% от общих потерь, вследствие чего пренебрегать ими нецелесообразно. Пакет ELCUT допускает только линейную постановку задачи расчета на переменном токе, поэтому, как и в предыдущем случае, естественные значения магнитной проницаемости для ввода просто должны быть умножены на коэффициент заполнения.

Затем необходимо определить значение электропроводности. В реальности физическая картина протекания переменного магнитного потока по шихтованному сердечнику весьма сложна. Вихревые токи замыкаются и внутри каждого листа, и, вследствие несовершенства межлистовой изоляции, между листами. Учесть эти реальные явления в рамках ELCUT не представляется возможным. Поэтому надо ввести некую эквивалентную электропроводность, которая при заданных амплитуде и частоте колебаний потока порождало бы в условном массивном блоке те же потери, которые возникают при этих условиях в шихтованном блоке. Для практической реализации этой идеи была создана специальная математическая модель, некое виртуальное подобие аппарата Эпштейна, на котором определяют характеристики магнитных материалов. Только если в реальных условиях определяют потери в образцовом магнитопроводе при заданных параметрах потока, то в нашем случае подбиралась такая электропроводность, которая при заданных параметрах потока обеспечивала бы величину потерь, заданную стандартом на данную марку стали.

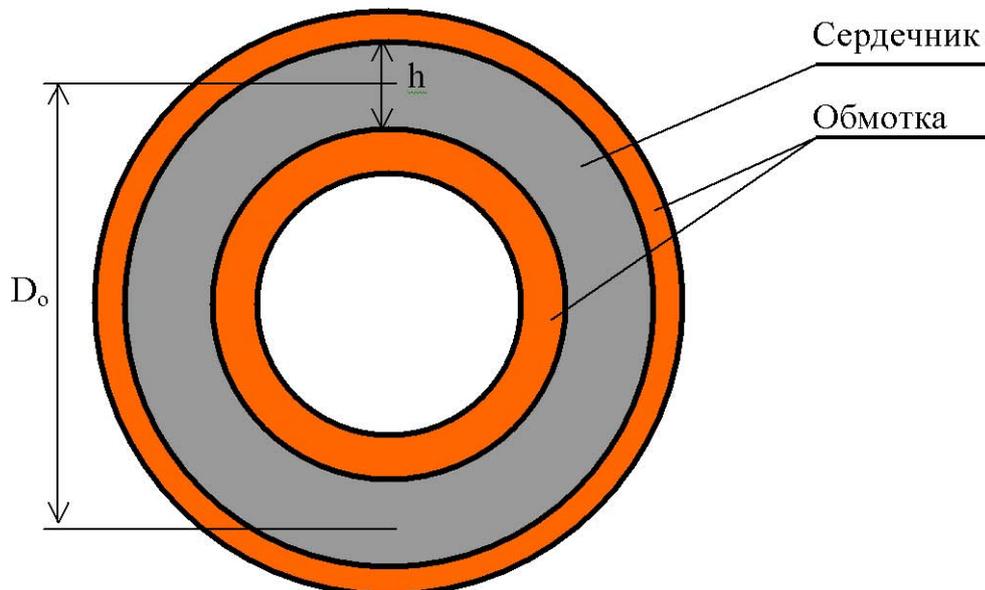


Рис 2. Схема численного эксперимента

Схема численного эксперимента представлена на рис. 2. На цилиндрическом сердечнике со средним диаметром D_0 и шириной h намотана обмотка. Задавая различные значения тока в обмотке, проницаемости и электропроводности сердечника, с помощью программы ELCUT определялась мощность тепловыделения в этом условном сердечнике и сравнивалась с мощностью, которая выделялась бы в шихтованном сердечнике при заданных марках стали. Наиболее употребительные марки стали и их характеристики выбирались в соответствии со стандартами России [2,3] и официальным справочником изготовителя [4]. Параметры стали и результаты расчетов приведены в таблице.

Характеристика стали	Марка стали	Удельные потери, Вт/кг	Относительная проницаемость	Плотность, кг/м ³	Электропроводность, См/м
Изотропная	2011	3.5	1190	7820	11
	2111	3.0	1160	7800	9
	2211	2.6	1120	7750	8
	2312	1.7	1120	7700	5
	2412	1.3	1080	7600	4
Анизотропная	3414	0.7	1420	7650	2.2
		1.2	1100		4

Примечания:

- 1) Для анизотропной стали в первой строке указаны параметры вдоль направления проката, во второй – поперек;
- 2) Относительная магнитная проницаемость измерена на постоянном токе при $H=1000\text{А/м}$;
- 3) Удельные потери измерены на переменном токе при частоте 50 Гц и амплитуде индукции 1 Тл.

Численные эксперименты проводились при частоте перемагничивания 50 Гц при варьировании амплитуды напряженности магнитного поля от 15 до 1000 А/м и относительной магнитной проницаемости - от 1000 до 8000. При этом производились следующие вычисления:

- Масса сердечника $G = \rho \pi D_o h L k_{st}$, кг
- Стандартный уровень мощности тепловыделения при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц $[Q_{j1}] = 1.6 p_o G$, Вт
- Средняя индукция в сердечнике $B_j = \Phi / (h L k_{st})$, Тл
- Расчетная мощность тепловыделения, приведенная к индукции 1 Тл, $Q_{j1} = Q_j / (B_j^2)$, Вт

В этих формулах использованы следующие обозначения:

D_o, h – размеры сердечника, указанные на рис. 1, м (при расчетах было принято $D_o = 2.2$ м и $h = 0.4$ м);

L – размер сердечника по оси Z (1 м);

ρ – плотность данной марки стали, кг/м³;

$[Q_{j1}], Q_{j1}$ – мощность тепловыделения при частоте 50 Гц и амплитуде индукции 1 Тл по стандарту и по расчету, Вт;

Φ, B_j – магнитный поток и средняя индукция в сердечнике по расчету;

Q_j – мощность тепловыделения при индукции B_j , Вт;

p_o – удельные потери в стали по стандарту при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц.

Особо следует отметить коэффициент 1.6 в формуле для расчета нормированных потерь. Этот коэффициент учитывает влияние различных технологических операций, проводимых в условиях реального производства при штамповке и сборке пакета. Величину 1.6 этот коэффициент принимает при расчете потерь в спинке сердечника, при расчете потерь в зубцах он увеличивается до 1.8.

При проведении серии расчетов при различных сочетаниях внешних условий (магнитной проницаемости и напряженности магнитного поля) величина электропроводности варьировалась таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$[Q_{j1}] = Q_{j1}$$

При этом выявилось, что величина эквивалентной электропроводности зависит практически только от величины удельных потерь, т.е. только от марки стали. Приближенно эквивалентную электропроводность шихтованного пакета из любой стали γ (См/м) можно определить из элементарных соотношений:

$\gamma=3\rho_0$ при моделировании спинки и $\gamma=3.5\rho_0$ при моделировании зубцов.

Различие этих выражений свидетельствует о том, что для повышения точности расчетов зубцы и ярмо целесообразно моделировать отдельными блоками. Целесообразность этого усложнения повышается еще более при расчетах крупногабаритных мощных машин, для которых используется анизотропная сталь. При наружных диаметрах сердечника превышающих 1 м сердечники набирают не из полных круговых листов, а из сегментов, при вырубке которых обеспечивалась определенная их ориентировка относительно направления проката. Например, в современных турбогенераторах направление проката выбирается вдоль средней линии спинки и, соответственно, поперек оси зубцов. Как следует из вышеприведенной таблицы, различия этих зон составляют по магнитной проводимости порядка 30%, а по эквивалентной электропроводности более 80%. При столь различных характеристиках зон их просто необходимо задавать отдельно, хотя конструктивно они представляют собой единое целое.

Литература

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 1. ГЭИ, М.-Л., 1957.
2. ГОСТ 21427.1-83. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая.
3. ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая.
4. Холоднокатаные электротехнические стали. Справочник. Под ред. Молотилова Б.В. "Металлургия", М., 1989.