

Работа № 3

Расчет установившейся температуры обмотки электрического аппарата

Рабочие файлы: [[zdch_31.mcd](#)]

Цель работы

Ознакомление с порядком расчета потерь в обмотке и в магнитной цепи электрического аппарата (в меди и в стали). Сравнительная оценка потерь в шихтованном (из пластин электротехнической стали) и в монолитном магнитопроводе из токопроводящего материала. Приобретение навыка выбора класса изоляции для проводников обмотки электрического аппарата.

Программа работы в лаборатории

1. Прочитать условия задачи, теоретическое описание и методические рекомендации.
2. Запустить Mathcad. Модифицировать рабочие файлы и решить задачи по варианту.
3. Подготовить совокупность документирующих скриншотов. Составить отчет в Word'e.

Задача

Цилиндрическая катушка индуктивности намотана на замкнутый магнитопровод (рис. 1), выполненный из горячекатаной листовой электротехнической стали Э41 (новое название – сталь 1511) с толщиной листа 0,35 мм. По катушке, имеющей число витков w , протекает переменный ток i частоты 50 Гц. Размеры магнитопровода и катушки заданы (табл. 1). Определить потери в катушке и в магнитопроводе (справочные данные в табл. 2 и на рис. 2, 3). Повторно рассчитать потери в магнитопроводе при условии, что он выполнен из сплошного бруска той же стали. Считая, что внутренняя поверхность катушки термически изолирована, рассчитать её установившуюся температуру и выбрать класс изоляции для провода (табл. 3). Катушка находится в спокойном воздухе.

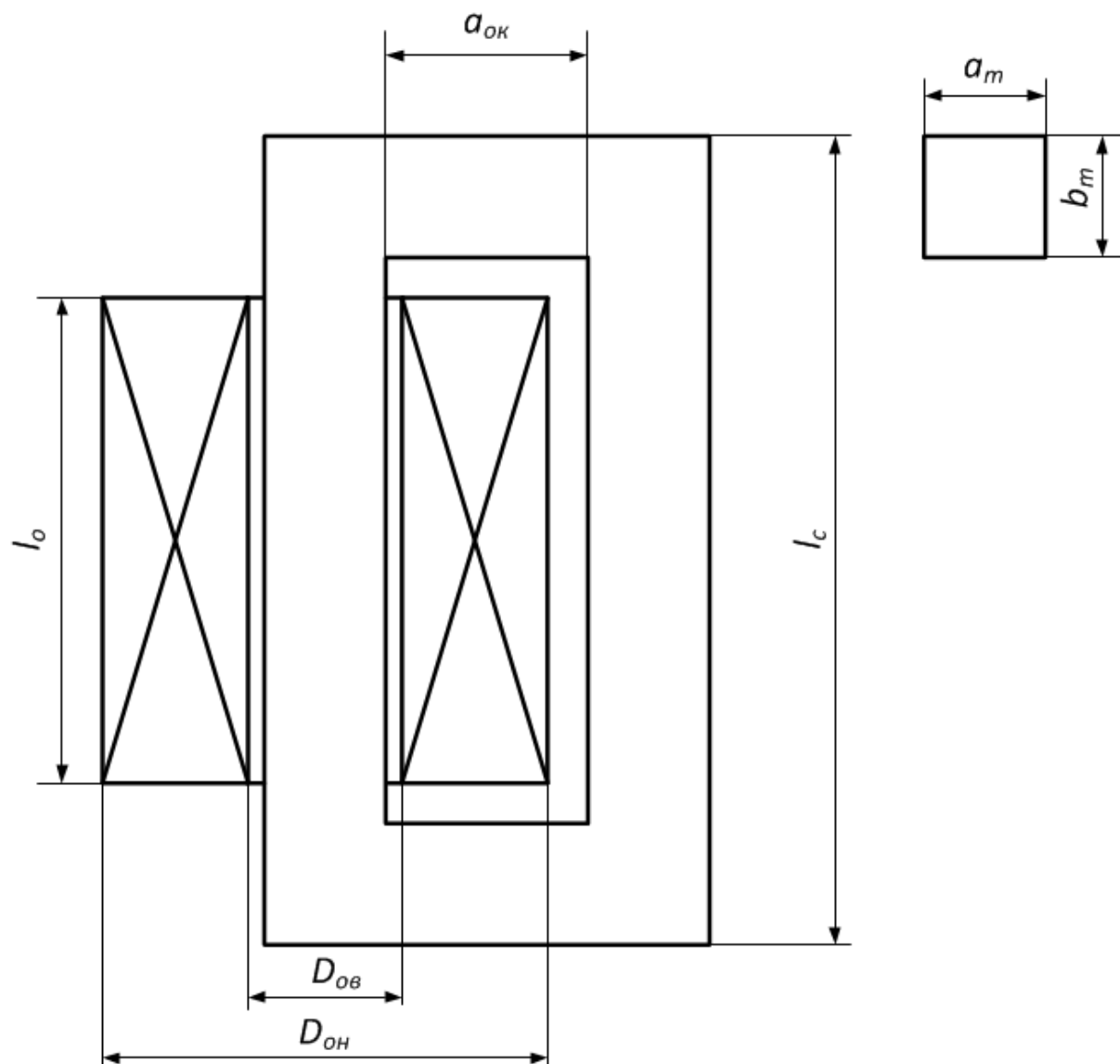


Рис. 1. Эскиз катушки на замкнутом магнитопроводе

Таблица 1

Вар.	I , А	w , мм	l_o , см	a_m , см	$D_{ов}$, см	$D_{он}$, см	$S_{пр}$, мм ²	l_c , см	$a_{ок}$, см
1	11	180	11	2,5	4,0	6,5	2,270	17	2,5
2	10	120	10	2,0	3,3	4,8	1,767	16	2,0
3	12	150	8	3,0	4,7	6,2	1,094	16	1,8
4	4	180	5	2,5	4,0	5,1	0,442	12	1,6
5	2	500	6	1,5	2,6	3,8	0,196	11	1,7
6	6	100	3	1,5	2,6	3,6	0,442	8	1,6
7	6	50	2	1,5	2,6	3,6	0,442	10	1,6
8	2	500	5	1,5	2,6	4,0	0,196	10	1,8
9	4	250	4	1,5	2,6	3,6	0,246	9	1,6
10	15	180	10	3,0	4,7	6,2	1,227	18	1,8
11	15	120	8	3,0	4,7	6,0	1,227	16	1,7
12	7	180	6	2,0	3,3	4,3	0,503	12	1,6
13	12	100	5	1,0	2,0	3,0	0,785	9	1,6

14	18	50	4	2,0	3,3	4,8	1,767	10	1,8
15	1	75	2	1,0	2,0	2,2	0,078	6	1,2
16	3	200	2	1,0	2,0	3,8	0,283	6	2,0
17	3	250	3	1,5	2,6	4,2	0,283	8	1,9
18	1	100	2	1,0	2,0	2,4	0,126	6	1,3
19	18	75	6	2,0	3,3	4,8	1,767	12	1,8
20	12	50	4	1,0	2,0	3,3	1,539	8	1,8

Таблица 2

- $\gamma_{st} = 7.8 E - 3$ – плотность стали, кг/см³
 $k_z = 0.9$ – коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью
 $\rho_0 = 1.72 E - 8$ – удельное сопротивление меди, Ом×м²/м
 $\Theta_0 = 35$ – температура окружающей среды, град.×С
 $\alpha = 0.0043$ – температурный коэффициент сопротивления меди, Ом/град.×С
 $f = 50$ – частота тока, Гц
 $k_{T0} = 0.008$ – коэффициент теплообмена с воздухом, Вт/(см²·К)

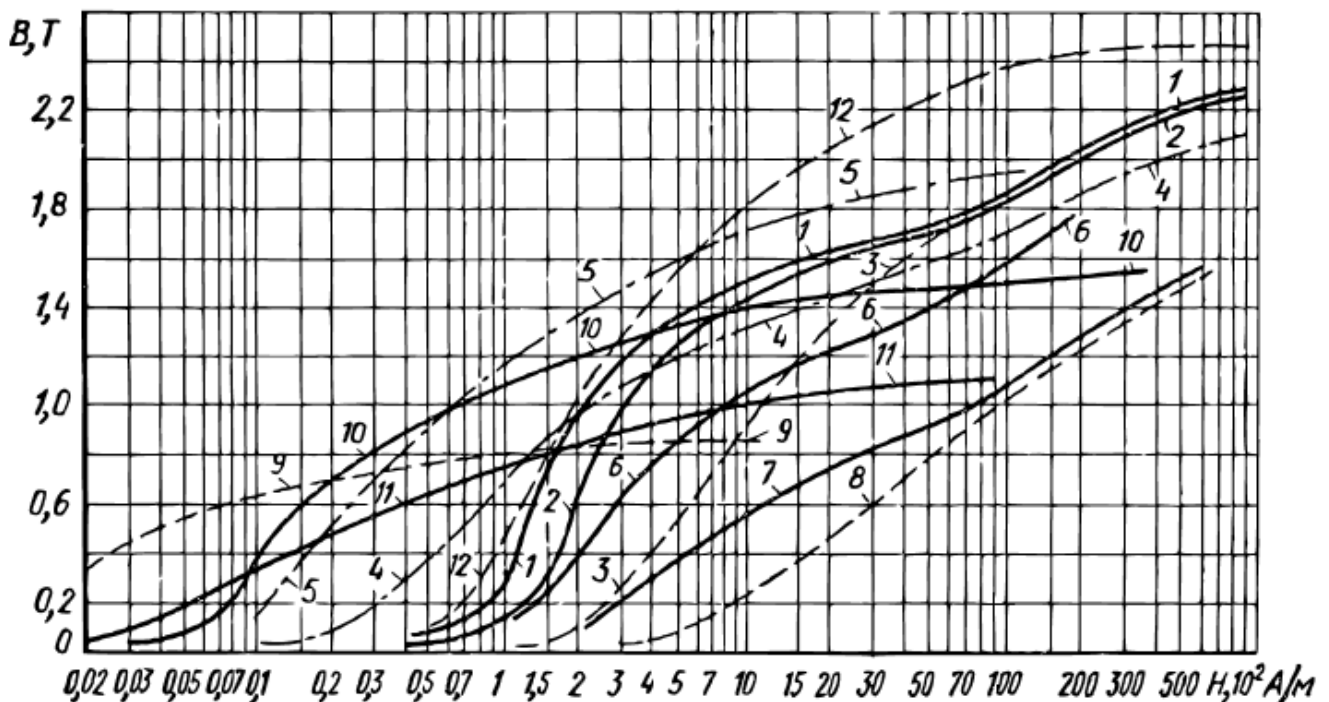


Рис. 2. Кривые намагничивания магнитных материалов: 1 — сталь низкоуглеродистая электротехническая марки Э отожжённая; 2 — качественная конструкционная марки сталь 10 отожжённая; 3 — качественная конструкционная марки сталь 20 отожжённая; 4 — сталь листовая электротехническая марки Э41 (новое название — сталь 1511); 5 — сталь электротехническая холоднокатаная марки Э330; 6 — чугун ковкий отожжённый; 7 — чугун серый легированный марки № 00 отожжённый; 8 — чугун марки № 00 неотожжённый; 9 — высоконикелевый пермаллой марки 79НМ; 10 — пермаллой марки 79НМ; 11 — пермаллой марки 79НМ; 12 — пермаллой марки 79НМ.

низконикелевый пермаллой марки 50Н; 11 – низконикелевый пермаллой марки 50НКС; 12 – пермендюр

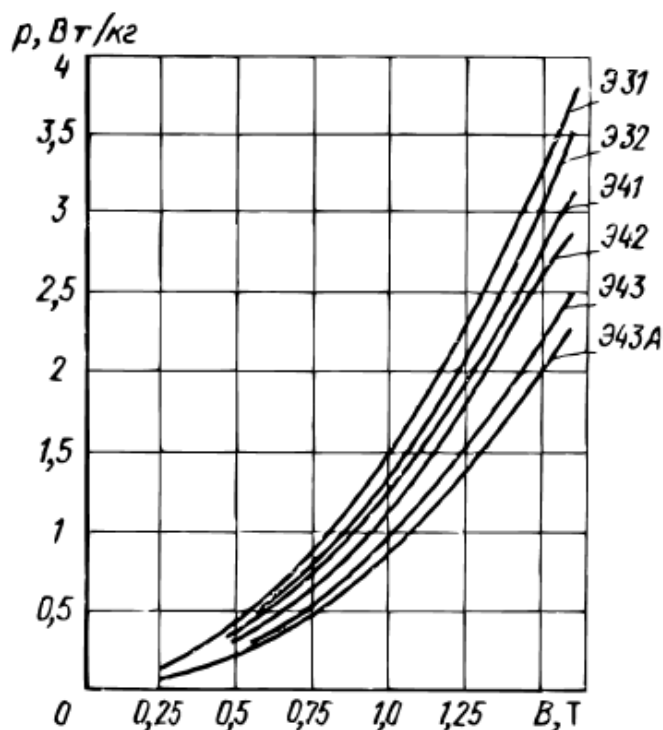


Рис. 3. Зависимость удельных тепловых потерь от магнитной индукции для горячекатаных трансформаторных сталей толщиной $\delta = 0,35$ мм ($f = 50$ Гц)

Таблица 3

Класс нагревостойкости изоляции	Температурный индекс	Марки проводов
A	105	ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2
E	120	ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2, ПЭВТЛК
B	130	ПЭТВ-1, ПЭТВ-2
F	155	ПЭТ-155, ПЭТВ
H	180	ПСДК, ПСДКТ
C	180 и выше	ПЭТ-200

Теоретическое описание

Для решения задачи необходимо рассчитать состояние четырёх энергопреобразующих цепей. Каждая характеризуется своей энергонесущей материей. В катушке течет ток электрический – нагревает медь. В магнитопроводе – ток магнитный – нагревает сталь (переориентируя магнитные домены). И ток электрический (Фуко) – если магнитопровод изготовлен из проводящего

электрический ток материала. Четвертая цепь – тепловая – от электрического аппарата в окружающее пространство течет ток тепловой.

Методические указания

Вычислите среднюю длину витка и длину провода обмотки (число витков известно). Сечение провода заданно, удельное сопротивление меди – справочная величина. Найдите активное сопротивление обмотки. Вычислите потери в меди.

В рассматриваемом случае магнитная цепь неразветвленная и однородная. Поэтому МДС и падение магнитного напряжения на всей длине магнитной цепи можно уравнивать $wI = HI$. МДС и средняя длина магнитной силовой линии заданы условием и геометрией сердечника. Рассчитайте напряженность магнитного поля. Воспользуйтесь кривыми намагничивания (рис. 2, кривая 4), уточните магнитную индукцию в сердечнике (тип стали магнитопровода задан условием задачи). Зная магнитную индукцию, воспользуйтесь эмпирическими данными об удельных тепловых потерях в электротехнических сталях (рис. 3), вычислите потери в стали вызванные перемагничиванием (плотность стали и коэффициент заполнения магнитопровода сталью см. в табл. 2).

Если бы магнитопровод был изготовлен из монолитного бруска стали (подобные конструкции никогда не используются за исключением "магнитных замков", которые составляют лишь сотые доли объема магнитопровода), то по периметру сечения бруса протекал бы ток Фуко. Т.е. периметр сердечника можно было бы рассматривать, как вторичную обмотку трансформатора из одного витка, с током в коэффициент трансформации большим тока первичной обмотки. Плотность тока Фуко неоднородна. Ближе к центру стержня сердечника противо-ЭДС больше, здесь ток Фуко ограничивается и вытесняется во внешние слои. В какой степени он будет вытеснен и как повлияет неоднородность сечения по пути тока Фуко (стержни сердечников квадратные, а не круглые) – неизвестно. К расчету электрических потерь в сердечниках (с приемлемой погрешностью +/-20 %) предлагается эмпирическая формула Лысова, учитывающая поверхностный эффект:

$$P = 0.7 \cdot 10^{-4} (I_{\Phi} / \Pi)^{5/3} \times (S \cdot f^{1/2}),$$

где: S – площадь охлаждающей поверхности, см²; $I_{\Phi} = wI$ – вторичный ток (ток Фуко), А; Π – периметр, внутри которого протекает ток Фуко (длина средней линии сердечника – $\Pi = l$), см.

Суть расчета тепловой цепи заключена в том, что зная тепловой ток и тепловое сопротивление можно вычислить тепловое напряжение – искомую разность температур электрического аппарата и окружающей среды:

$$\Theta_a - \Theta_0 = \Phi \cdot R_T,$$

где: $R_T = 1 / (k_T \cdot S)$ – тепловое сопротивление (тем меньше, чем больше площадь охлаждающей поверхности электрического аппарата, см^2), k_T – обобщенный коэффициент теплообмена, учитывающий теплопроводность воздуха, естественную конвекцию и инфракрасное излучение, $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$, $\Phi = \Sigma P$ – тепловой ток, равный сумме всех потерь в электрическом аппарате.

Решение следует завершить повторным расчетом задачи. Цель – уточнение результата. При вычислении потерь в меди не была учтена зависимость сопротивления от температуры – $R = R_0 [1 + \alpha (\Theta_a - \Theta_0)]$. Последняя была неизвестна. Таким образом, решив задачу первый раз, мы получили лишь первое приближение к результату.

21.09.2013



Информатика	Моделирование	Электротехника	Электропривод	Аппараты	ТАУ	«	»
-------------	---------------	----------------	---------------	----------	-----	---	---

© А.И. Согрин, Н.В. Клиначёв, 2013.