

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В.А. ЧАГИН, О.А. ШТРАУХМАН

Для надежной работы электромагнитов постоянного тока уже на стадии проектирования необходима оптимизация их конструкции по целому ряду различных критериев качества.

Основной целью проектирования электромагнитов является разработка электромеханического устройства, обеспечивающего заданное притягивающее усилие подвижной части конструкции (якоря). В связи с этим заданная величина тяговой силы является основным критерием работоспособности создаваемого изделия. Однако тяговая сила является не единственным фактором, определяющим выбор проектного решения. Критериями качества проектного решения могут служить также другие показатели, отражающие большое число конкретных требований, предъявляемых к электромагниту. К их числу можно отнести минимумы объема, массы, стоимости, потребляемой мощности и другие. Свести эти частные критерии в один, наиболее полно учитывающий основные физические процессы, определяющие работоспособность изделия, возможные режимы эксплуатации, физические характеристики материалов, конфигурацию и размеры основных элементов конструкции, а также экономические и технологические нормы, практически невозможно. Поэтому одним из подходов для решения задачи оптимизации конструкции электромагнита может служить подход, основанный на декомпозиции процесса проектирования и оптимизации изделия на последовательности критериев. К числу наиболее важных критериев необходимо отнести критерии теплового режима, так как габариты и вес изделия будут во многом определяться степенью использования ресурса нагревостойкости применяемых в конструкции материалов. В связи с этим оптимизация электромагнита по тепловому критерию помогает выбрать наиболее рациональную конструкцию электромагнита в смысле материалоемкости  $a$ , следовательно, и стоимости.

Ниже излагаются результаты применения разработанной методики для проектирования V-образного электромагнита постоянного тока.

Конструкция указанного электромагнита приведена на рис. 1. Основными ее элементами являются сердечник (1), катушки (2) и якорь (3). Задачей оптимизации являлось определение рациональных размеров изделия: диаметра сердечника  $d$ , внешнего диаметра обмотки  $D$  и ее высоты  $H$ . Заданными условиями служили: критический зазор (8 мм), тяговая сила на полюс (30 Н), номинальное напряжение питающей сети (220 В) и тип обмоточного провода (ПЭВ-1).

С целью выбора начальной точки оптимизации был произведен предварительный эскизный расчет конструкции. При этом использовались методики изложенные в [1]. В результате этого расчета были определены основные геометрические размеры изделия: диаметр сердечника 20 мм, внешний диаметр обмотки 55 мм, высота обмотки 100 мм. Указанные размеры соответствовали намагничивающей силе 3500 А, количеству витков в одной катушке  $w = 11000$ , току в обмотке  $I = 0,35$  А, электрическому сопротивлению одной обмотки  $r = 312$  Ом при диаметре провода 0,25 мм.

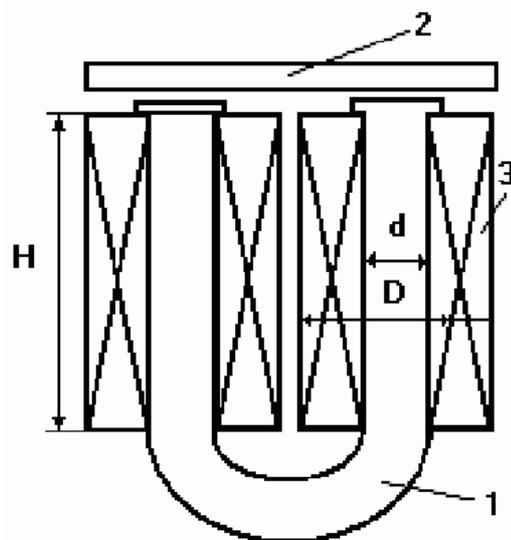


Рисунок 1 – Конструкция электромагнита:  
1 – сердечник, 2 – якорь, 3 – обмотка

Критерием качества теплового режима при оптимизации было выбрано выражение [2]:

$$J = [(u - u_3)^2]^l Q(u - u_3)^2, \quad (1)$$

где под  $u_3$  понимается заданное допустимое превышение температуры материалов обмотки электромагнита над температурой окружающей среды, соответствующая классу нагревостойкости Е (120°C), При температуре окружающей среды 40 °С заданное превышение температуры  $u_3 = 80$  К.

Исходя из условий удобства конструирования на конфигурацию электромагнита по налагаются конструктивные ограничения вида:

$$0,25 \leq n \leq 0,8 \quad (2)$$

и

$$0,5 \leq \beta \leq 10, \quad (3)$$

где

$$n = A/d, \quad (4)$$

$$\beta = H/A, \quad (5)$$

Здесь

$$A = \frac{D - d}{2} - \quad (6)$$

толщина обмотки.

Алгоритм оптимизации электромагнита по критерию стационарного теплового режима имеет свои особенности. Они обусловлены функциональными ограничениями, поэтому на каждом шаге оптимизационного процесса решается линейная задача вида

$$J + \delta J - \text{MIN} \quad (7)$$

при условиях (2)-(6).

В качестве математического описания стационарного теплового режима электромагнита использовалась система уравнений сформированная на основе применения метода узловых потенциалов для тепловых схем замещения, сформулированная для эквивалентной тепловой схемы, изображенной на рис. 2 [3].

Компонентами схемы являются  $R_{1-3}$ ,  $R_{1-4}$ ,  $R_{1-9}$ ,  $R_{1-13}$  – тепловые сопротивления, обусловленные теплопроводностью обмотки;  $R_{1-9}$  и  $R_{1-13}$  – в радиальном направлении,  $R_{1-4}$ ,  $R_{1-3}$  – в осевом;  $R_{2-10}$ ,  $R_{10-11}$ ,  $R_{11-7}$ ,  $R_{7-8}$  – тепловые сопротивления, обусловленные теплопроводностью сердечника;  $R_{4-5}$ ,  $R_{5-6}$ ,  $R_{6-12}$  – тепловые сопротивления, обусловленные теплопроводностью якоря;  $R_{8-0}$ ,  $R_{3-0}$ ,  $R_{9-0}$ ,  $R_{12-0}$  – тепловые сопротивления, обусловленные

конвекцией и излучением в окружающую среду с сердечника, торцевой поверхности, с боковой поверхности катушки и с якоря, соответственно. Источник тепловой мощности  $p$ , обусловленный протеканием тока по обмотке электромагнита, приложен к 1 – ому узлу тепловой схемы замещения.

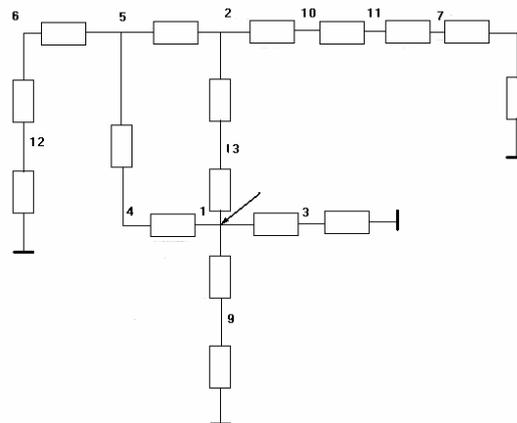


Рисунок 2 – Тепловая схема замещения электромагнита

Выражения для градиента целевого функционала  $J$  имеет вид [4]:

$$\delta J = W \delta G_u + W \delta p. \quad (8)$$

Расчет вариаций матрицы тепловых проводимостей  $\delta G$  при изменении размеров  $D$ ,  $d$  и  $H$  производился через вариации тепловых сопротивлений.

Вычисление вариации источника тепловой мощности имеет специфические особенности, связанные с конструкцией обмотки. Выражение для  $\delta p$  было получено на основе следующих выкладок.

Тепловая мощность, выделяемая в обмотке электромагнита рассчитывается как

$$P = I^2 r = \frac{U^2}{r}, \quad (8)$$

а намагничивающая сила  $F$

$$F = Iw = w. \quad (9)$$

Выражая  $r$  как

$$r = \frac{Uw}{F} \quad (10)$$

и подставляя его в (34) будем иметь

$$p = \frac{UF}{w}. \quad (11)$$

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Число витков в обмотке  $w$  и коэффициент заполнения обмотки  $f_3$  связаны следующими соотношениями:

$$f_3 = \frac{\pi d_m^2}{2H(D-d)H} w. \quad (12)$$

Тогда

$$w = \frac{2f_3H(D-d)}{\pi d_m^2}. \quad (13)$$

В линейном приближении для провода ПЭВ-1  $f_3$  можно рассчитать по формуле

$$f_3 = 0,4 + 0,315(d_m - 0,2). \quad (14)$$

Окончательное выражение для мощности будет иметь вид

$$P = \frac{\pi U^2 F d_m^2}{2 f_3 H (D - d)}. \quad (15)$$

При вариации  $D$ ,  $H$  и  $d$  вариацию  $\delta P$  можно рассчитать как

$$\delta P = P \left[ \frac{H(\delta D - \delta d) - \delta H(d-d)}{H(D-d) + H(\delta D - \delta d) + \delta H(D-d)} \right]. \quad (16)$$

Данное выражение для  $\delta P$  и было использовано для решения задачи оптимизации.

Уравнение сопряженное к исходному имело вид

$$GW = -4 [(u - u_3)^2] (u - u_3). \quad (17)$$

Расчеты показали, что решение задачи оптимизации не единственно. Задаваясь различными начальными условиями получали разные решения. Таким образом было установлено, что минимуму  $J$  соответствует целая область квазиоптимальных значений  $D$ ,  $H$ ,  $d$  (рис. 3).

Чтобы сузить область квазиоптимальных решений использовалось условие постоянства намагничивающей силы  $F$ :  $F = \text{const}$ .

Введем в рассмотрение плотность тока в обмотке  $j$ :

$$j = \frac{I}{S_M}, \quad (18)$$

где

$$S_M = f_3 \frac{(D-d)H}{2}, \quad (19)$$

поэтому

(38)

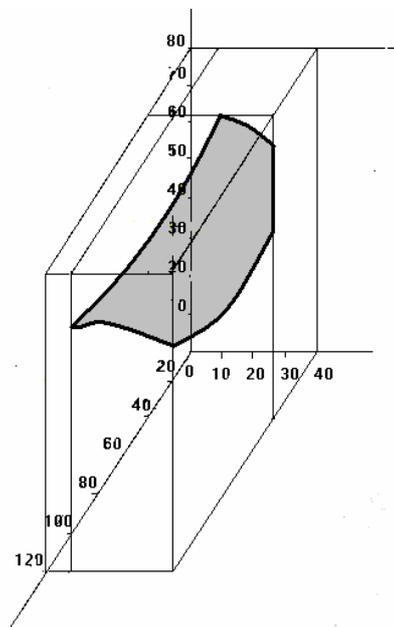


Рисунок 3 – Область оптимальных значений  $D$ ,  $H$ ,  $d$  в мм

$$j \frac{(D-d)}{2} H f_3 w = F. \quad (20)$$

Выразим  $w$  в (20) через (14)

$$j [(D-d)H]^2 f_3 \frac{1}{\pi d_m^2} = F. \quad (21)$$

Подставляя в (21) выражение для  $f_3$  и перегруппируя члены, будем иметь

$$[(D-d)H]^2 = \frac{\pi F d_m^2}{(d_m^2 - 1,03d_m + 0,326)j}. \quad (22)$$

Значение допустимой плотности тока принимается для продолжительного режима работы  $4 \text{ A/mm}^2$ .

Задаваясь диаметром провода  $d_m$  можно построить в координатах  $DdH$  поверхность

$$[(D-d)H]^2 = \Phi(d_m) = \text{const}. \quad (23)$$

На рис. 4 эта поверхность спроецирована на плоскость Dd – при различных заданных значениях H. Пересечение плоскостей дает отрезок оптимальных решений – KL.

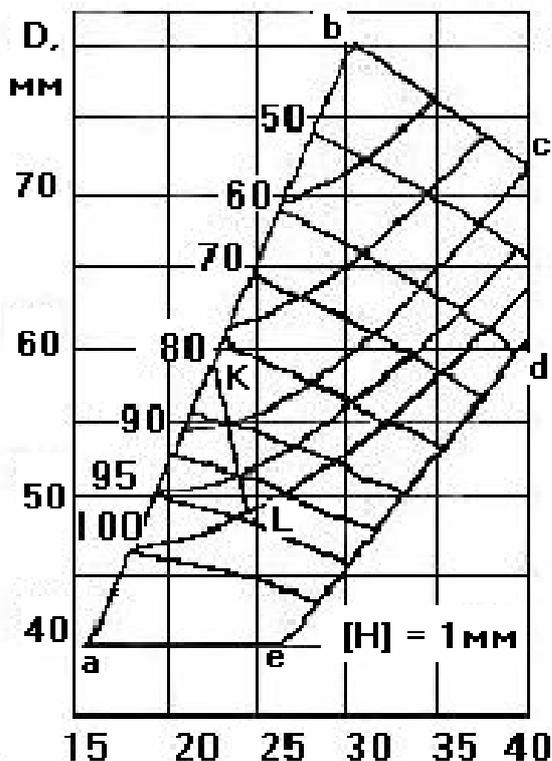


Рисунок 4 – Область оптимальных значений в Dd – координатах

Для выбора единственного решения определим точку, соответствующую минимуму массы изделия.

Расчет массы электромагнита проводился согласно следующей формуле:

$$M = \gamma_m V_m + \gamma_{cm} V_{cm}, \quad (24)$$

где M – масса электромагнита;

$\gamma_m$ ,  $V_m$  – плотность и объем меди;

$\gamma_{cm}$ ,  $V_{cm}$  – плотность и объем стали;

$\gamma_m = 8,89 \text{ кг/м}^3$ ;

$\gamma_{cm} = 7,8 \text{ кг/м}^3$ .

Объемы меди и стали рассчитывались как

$$V_m = f_3 \frac{\pi (D^2 - d^2) H}{2}, \quad (25)$$

соответственно, где h – расстояние между обмотками, равное 10 мм.

Для определения точки с минимумом массы M на отрезке KL использовался метод "золотого сечения". Для чего определялись значения на концах отрезка интервала KI в

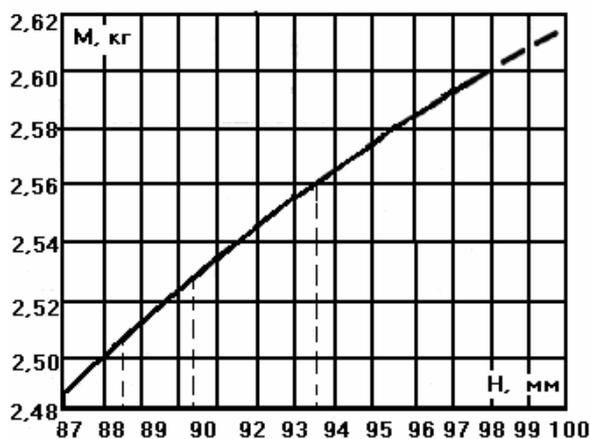


Рисунок 5 – Поиск точки, соответствующей минимуму массы активных материалов

точках. После чего отрезок делился пополам так, чтобы конец интервала с наименьшей массой входил в новый отрезок и процедура повторялась. Результаты расчета приведены на рис. 5.

В результате вычислений была определена оптимальная точка в координатах DdH пространства. Ею оказалась граничная точка отрезка KL.

Электромагнит, соответствующий приведенному расчету, имеет следующие параметры: D = 58 мм, d = 22,5 мм, H = 87 мм, w = 11000 (на одну катушку), r = 330 Ом, P = 75 Вт, dh = 0,22 мм, M = 2,5 кг.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог изложенному, можно заключить, что разработанная методика оптимизации электромагнитов постоянного тока по тепловым критериям может быть использована как составная часть в общем комплексном процессе проектирования этих изделий, отличающихся как по конструкции, так и по назначению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. – М.: Энергия, 1968. – 212 с.
2. Чагин В.А. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов по критериям теплового режима: Дисс. на соискание учёной

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

- степени канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1984. – 252 с.
3. Сутченков А.Н., Чагин В.А. Методическое и программное обеспечение тепловых режимов электротехнических устройств при неточных входных данных. Тезисы докладов Второй Международной конференции «Физико-технические проблемы электротехнических материалов и компонентов». г. Клязьма, 1-4 декабря 1997 г.
  4. Тихонов А.И., Чагин В.А. Алгоритмы расчета тепловых характеристик резисторов электро-энергетического назначения / Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1982. Вып. 3 (125).