

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК И РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА КЛАПАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Кадыков В.К.<sup>1</sup>, Никитина О.А.<sup>2</sup>, Руссова Н.В.<sup>2</sup>, Свинцов Г.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Данио», Чебоксары, Россия (428013, Чебоксары, ул. Калинина, 66), vk\_kadykov@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия (428015, Чебоксары, Московский пр., 15)

Рассмотрены широко известные методики проектного расчета приводных электромагнитов клапанного типа, питающихся от источника постоянного напряжения. При разработке электромагнитных аппаратов, таких как реле, контакторы, магнитные пускатели, производимых в значительных объемах, исчисляемых миллионами штук в год, важнейшими задачами являются ресурс- и энергосбережение, снижение финансовых и временных затрат на доводку опытных образцов аппаратов. Решение этих задач в значительной степени упрощается, если в распоряжении проектировщика имеются эффективные достоверные методики проектного расчета. Поэтому сопоставительный анализ методик и результатов проектного расчета является также важной и актуальной задачей, решение которой способствует разработке конкурентоспособной электромагнитной аппаратуры. Выделены методики проектного расчета, базирующиеся на понятии «конструктивный фактор», определяющий кратность размеров клапанного электромагнита. Сделан вывод о предпочтительности методики проектного расчета, разработанной на основе использования экспериментальной обобщенной нагрузочной характеристики и тепловых параметров (среднеобъемной, среднеповерхностной температур, эквивалентного коэффициента теплопередачи), полученных отдельным учетом теплопередачи конвективной составляющей и лучеиспусканием и коэффициентов неравномерности распределения температуры в обмотке постоянного напряжения клапанного электромагнита.

Ключевые слова: методика проектного расчета, клапанный электромагнит, кратность размеров, конструктивный фактор, усредненная тяговая характеристика, корректирующие функции, обобщенная нагрузочная характеристика, минимизация функции цели.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS AND RESULTS OF DESIGN CALCULATION OF VALVE SOLENOIDS DC VOLTAGE

Kadykov V.K.<sup>1</sup>, Nikitina O.A.<sup>2</sup>, Russova N.V.<sup>2</sup>, Svintsov G.P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC «Danio», Cheboksary, Russia (428013, Cheboksary, street Kalinina, 66), vk\_kadykov@mail.ru;

<sup>2</sup>Chuvash State University, Cheboksary, Russia (428015, Cheboksary, Moskovskii avenue, 15)

The essence of considered well-known methods of design calculation drive electromagnets valve type, powered by direct voltage source. In the development of electromagnetic devices such as relays, contactors, magnetic starters produced in significant amounts in the millions per year, one of the most important tasks are resource and energy saving in them, as well as reducing the cost and time for operational development prototypes of devices. Solution of these problems is largely simplified if at the disposal of the designer are reliable methods of effective design calculation. Therefore a comparative analysis of methods and results of design calculation is also an important and urgent task that contributes to the development of competitive electromagnetic equipment. Highlighted design calculation methods based on the concept of constructive factor determining the size of the multiplicities of the valve solenoid. It is concluded about the preferred technique of design calculation, developed on the basis of experimental generalized load characterization and thermal parameters (volume average, mid surface temperature, equivalent heat transfer coefficient) obtained by separate heat transfer by convection and by radiation component and coefficients of uneven temperature distribution in the thickness of the winding direct voltage valve solenoid.

Keywords: methods of design calculation, the valve solenoid, the multiplicity of dimensions, design factor, averaged traction characteristic, corrective function, the generalized load characteristic, minimizing of the objective function.

Электромагнитные устройства автоматики, управления, распределения электрической энергии выпускаются массово в больших объемах. Среди таких устройств наиболее широко распространены электромагнитные реле, контакторы, пускатели. Техничко-экономические,

эксплуатационные показатели перечисленных аппаратов в значительной степени зависят от свойств, параметров их приводных электромагнитов, которые закладываются на стадии разработки и прежде всего на этапе выполнения проектных работ.

Большую группу приводных электромагнитов, с внешним по отношению к катушке якорем, совершающим ограниченное вращательное перемещение, принято [5 и др.] называть клапанными. Наиболее широкое применение [1-13] получила разновидность таких электромагнитов, питающихся от источников постоянного напряжения [9], выполненных на основе магнитной системы (рис. 1) с Г-образной скобой магнитопровода (КЭМ). Известно значительное число методик проектного расчета (определение размеров по заданным условиям функционирования) КЭМ, часть из которых указана в списке использованной литературы.

Нами предпринята попытка сопоставления известных методик проектного расчета КЭМ.

При проектировании заданы одинаковые исходные данные:

$P_{\text{мх}} = 8 \text{ кг} = 78,4 \text{ Н}$  – механическое усилие, которое должен преодолеть приводной электромагнит; (усилие, приведенное к оси сердечника);

$\delta = 0,39 \text{ см} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – рабочий воздушный зазор вдоль оси сердечника;

$\theta_{\text{доп}} = 120 \text{ }^\circ\text{С}$  – допустимая температура нагрева обмотки;

$T_o = 40 \text{ }^\circ\text{С}$  – расчетная температура окружающей среды для электромагнитных контакторов общепромышленного применения;

$U_{\text{max}} = 1,05 U_{\text{н}}$  – максимальное напряжение (в долях номинального  $U_{\text{н}}$ ), которое длительно может быть приложено к обмотке.

Результаты проектного расчета КЭМ сведены в табл. 1.

В первых трех методиках, соответственно [3, 5, 10], определение размеров  $d_{\text{п}}$ ,  $d_{\text{с}}$  базируется на использовании конструктивного фактора  $K_{\text{ф}} = \sqrt{P_{\text{мх}}}/\delta$  в зависимости от значения которого по кривой отсчитывается магнитная индукция ( $B_{\delta}$ ) в рабочем воздушном зазоре и коэффициент

рассеяния магнитного потока ( $\sigma_o$ ) в основании сердечника (в месте сочленения сердечника с

Г-образной скобой). В рассматриваемом примере:  $K_{\text{ф}} = \sqrt{8}/0,39 = 7,25 \text{ кг}^{0,5}/\text{см}$ ;  $B_{\delta} = 0,35 \text{ Тл}$ ;

$\sigma_o = 1,48$ . Сечение полюсного наконечника ( $S_{\text{п}}$ ) рекомендуется [5] рассчитывать по

выражению

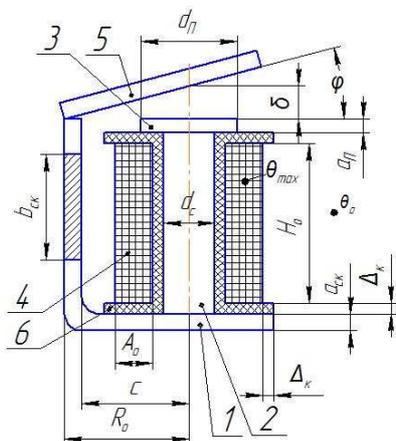


Рис.1 Наименование и расшифровка позиций КЭМ

$$S_{\Pi} = \frac{1,67 P_{\text{мх}} \mu_0}{B_{\delta}^2} = \frac{1,67 \cdot 78,4 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}{0,35^2} = 13,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$\text{В работе [10] – по } S_{\Pi} = \frac{P_{\text{мх}}}{4B_{\delta}^2 \cdot 10^5} = \frac{78,4}{4 \cdot 0,35^2 \cdot 10^5} = 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

В работе [3] этот момент не оговаривается; поэтому для вычисления  $S_{\Pi}$  можно принять последнее выражение.

Для КЭМ с круглым полюсным наконечником диаметр ( $d_{\Pi}$ ) полюсного наконечника рассчитывается по формуле  $d_{\Pi} = 2\sqrt{S_{\Pi}/\pi}$ .

Для расчета площади поперечного сечения сердечника ( $S_c$ ) используется  $S_c = \sigma_0 B_{\delta} S_{\Pi} / B_0$ .

Приняв в первой [5] методике  $B_0 = 1,5 \text{ Тл}$ , а во второй [10] –  $B_0 = 1,2 \text{ Тл}$ , согласно с последним выражением можно получить соответственно  $d_c = 24,3 \text{ мм}$  и  $d_c = 29,7 \text{ мм}$ .

Площадь поперечного сечения ( $S_{\text{як}}$ ) якоря выполняется:

$$\text{в методике [5] по выражению } S_{\text{як}} = 0,8S_c = 0,8 \cdot 4,63 \cdot 10^{-4} = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\text{в методиках [1 и 3] по выражению } S_{\text{як}} = B_{\delta} S_{\Pi} / B_0 = 0,35 \cdot 15,9 \cdot 10^{-4} / 1,2 = 4,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Заметим, что первоначально выбранное значение индукции  $B_0$  в методике [3] в последующем уточняется и не является величиной «произвольно» влияющей на размеры электромагнита.

Толщина ( $a_{\Pi}$ ) полюсного наконечника определяется [5, 10] согласно выражению

$$a_{\Pi} \geq 0,25d_c [1 - (d_c/d_{\Pi})^2].$$

В [5] утверждается, что если сердечник имеет шляпку нерационально выбирать внешний диаметр обмотки больше в  $(2,5 \div 3)$  раза диаметра сердечника. Следовательно, (в среднем) можно принять  $A_0 = 0,75d_c$ .

Здесь же рекомендуется целесообразная длина ( $H_0$ ) обмотки, составляющая  $H_0 = (4 \div 7)d_c$ . Выбрав  $H_0 = 4d_c$ , имеем  $H_0 = 97,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Ширина F-образной скобы принимается  $b_{\text{ск}} = 3d_c$ , а ее толщина  $a_{\text{ск}} = 0,25d_c$ . Следовательно  $b_{\text{ск}} = 73 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $a_{\text{ск}} = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Ширину якоря ( $b_{\text{як}}$ ) можно принять равной  $b_{\text{ск}}$ , тогда толщина якоря  $a_{\text{як}}$  составит  $a_{\text{як}} = S_{\text{як}} / b_{\text{як}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Таким образом, в соответствии с методикой [9] определены все размеры КЭМ.

Необходимая магнитодвижущая сила ( $F$ ) обмотки определяется в [10, 11]

$$F = K_{\text{зап}} K_{\Pi} \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta,$$

где  $K_{\text{зап}} = 1,4 \div 2$  – коэффициент запаса;  $K_{\text{п}} = 1,2 \div 1,5$  – коэффициент потерь.

Приняв  $K_{\text{зап}}$ ,  $K_{\text{п}}$  на среднем уровне, получим

$$F = 1,7 \cdot 1,3 \cdot \frac{0,35}{12,56 \cdot 10^{-7}} \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} = 2402 \text{ А.}$$

Выбирается толщина ( $\Delta_k$ ) каркаса катушки  $\Delta_k = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м, коэффициенты –  $m = A_o/d_o = 0,6$ ;  $\beta_T = 1,7$  (обмотка намотана на металлическую трубу);  $K_3 = 0,5$  – заполнения обмоточного окна;  $K_{\text{т.н}} = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$  – теплопередачи с наружной боковой поверхности обмотки. Рассчитывается: внутренний диаметр обмотки:  $d_o = d_c + 2\Delta_k \approx 35 \cdot 10^{-3}$  м;  $A_o = 0,6 \cdot 35 \cdot 10^{-3} = 21 \cdot 10^{-3}$  м;  $D_o = d_o + 2A_o = (35 + 2 \cdot 21) \cdot 10^{-3} = 77 \cdot 10^{-3}$  м;  $\alpha_m = m(m + \frac{1 + \beta_T}{2}) / (m + 1) = 0,6(0,6 + \frac{1 + 1,7}{2}) / (0,6 + 1) = 0,731$ .

Полагая, что среднеобъемная температура в обмотке равна допустимой, рассчитывается удельное электрическое сопротивление обмоточной меди:

$$\rho_r = \rho_o(1 + \alpha\theta_{\text{доп}}) = 1,65 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0043 \cdot 120) = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Далее в методике [10, 11] рассчитывается высота ( $H_o$ ) обмотки:

$$H_o = F \left( \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} \right) \sqrt{\frac{\rho_r}{2K_{\text{т.н}}K_3\tau_{\text{доп}}\alpha_m d_o}} = 2402 \cdot \frac{1,05}{0,85} \cdot \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot (120 - 40) \cdot 0,6 \cdot 35 \cdot 10^{-3}}} = 103,7 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

где  $\tau_{\text{доп}} = \theta_{\text{доп}} - T_o$  – превышение температуры поверхности ( $S$ ) охлаждения обмотки (среднеповерхностная температура обмотки принята равной среднеобъемной).

Уточняется коэффициент теплопередачи  $K_{\text{т.н}}$ :

$$S = \pi H_o (D_o + \beta_T d_o) = 3,14 \cdot 103,7 \cdot 10^{-3} \cdot (77 + 1,7 \cdot 35) \cdot 10^{-3} = 444 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$K_{\text{т.н}} = \frac{3,6 \cdot (1 + 0,005\tau_{\text{доп}})}{S^{1/5}} = \frac{3,6 \cdot (1 + 0,005 \cdot 80)}{(4,44 \cdot 10^{-2})^{1/5}} = \frac{5,04}{0,536} = 9,4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C.}$$

Таблица 1

## Результаты проектного расчета КМС по различным методикам

п/п	Источник информации	$d_c$ , мм	$A_o$	$H_o$	$d_{п}$	$c$	$a_{п}$	$a_{ск}$	$b_{ск}$	$a_{як}$	$b_{як}$	$\Delta_k$	Примечание
1	[5]	24,3	$\frac{0,75}{18,2}$	$\frac{4}{97,2}$	41,3	30,4	3,97	$\frac{0,25}{6,0}$	$\frac{3}{73}$	5,0	$\frac{3}{73}$	2,5	$\beta_T = 1,7$ ; $14 \text{ Тл} \leq B_o \leq 1,7 \text{ Тл}$ ; на основе конструктивного фактора
2	[10]	29,7	21	$\frac{103}{7}$	45,1	35,9	4,2	9,66	71,7	7,7	71,7	2,5	$\sigma_o = 1,48$ ; $\beta_T = 1,7$ ; $0,7 \text{ Тл} \leq B_o \leq 1,2 \text{ Тл}$ ; на основе конструктивного фактора
3	[3]	34,0	10,3	106	45,1	29,5	3,97	8,4	$\frac{3}{102}$	8,4	$\frac{3}{102}$	$\frac{0,1}{3,4}$	$B_o = 1,4 \text{ Тл}$ (уточняется); $\beta_T = 1,7$
4	[12,13]	19,7	$\frac{0,635}{12,5}$	$\frac{2,91}{57,3}$	$\frac{1,36}{26,8}$	$\frac{1,51}{29,7}$	$\frac{0,127}{2,5}$	$\frac{0,363}{7,2}$	$\frac{3,05}{60,1}$	$\frac{0,272}{5,4}$	$\frac{3,05}{60,1}$	$\frac{0,1}{2,0}$	на основе экспериментальной усредненной безразмерной тяговой характеристики
5	[6]	25,7	$\frac{0,635}{16,5}$	$\frac{2,91}{75,7}$	$\frac{1,36}{35,6}$	$\frac{1,40}{36,0}$	$\frac{0,127}{3,3}$	$\frac{0,36}{9,4}$	$\frac{3,05}{79,3}$	$\frac{0,36}{9,4}$	$\frac{3,05}{79,3}$	$\frac{0,065}{1,7}$	$k_o = 1,35$ ; $K_{U_{\min}} = 0,85$ ; $\xi_o = 0,88$ ; на основе корректирующих функций
6	[8]	27,3	$\frac{0,635}{17,3}$	$\frac{2,91}{79,4}$	$\frac{1,37}{37,1}$	$\frac{1,51}{41,2}$	$\frac{0,127}{3,47}$	$\frac{0,36}{9,83}$	$\frac{3,05}{83,3}$	$\frac{0,36}{9,83}$	$\frac{3,05}{83,3}$	$\frac{0,065}{1,77}$	$\beta_T = 1,7$ ; $K_z = 0,4$ ; $K_{U_{\min}} = 0,85$ ; $K_{U_{\max}} = 1,1$ ; на основе приведенной площади поперечного сечения рабочего воздушного зазора
7	[7]	25,1	$\frac{0,648}{2,08}$	$\frac{2,08}{2,08}$	$\frac{1,6}{1,6}$	$\frac{1,448}{1,448}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,314}{0,314}$	$\frac{2,5}{2,5}$	$\frac{0,314}{0,314}$	$\frac{2,5}{2,5}$	$\frac{0,1}{0,1}$	1. Минимизация массы активных материалов $m_M = 0,550 \text{ кг}$ ; $m_{ст} = 1,113 \text{ кг}$
8	[2]	19,8	$\frac{0,616}{3,11}$	$\frac{3,11}{3,11}$	$\frac{1,82}{1,82}$	$\frac{1,77}{1,77}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,25}{0,25}$	$\frac{3,14}{3,14}$	$\frac{0,25}{0,25}$	$\frac{3,14}{3,14}$	$\frac{0,1}{0,1}$	1. Минимизация массы активных материалов $m_M = 0,377 \text{ кг}$ ; $m_{ст} = 0,673 \text{ кг}$ 2. Экспериментальная обобщенная нагрузочная характеристика

Уточненное значение  $K_{т.н}$  отличается от первоначально-принятого на 5 %. В методике [3] рекомендуется (табл. 2) задаваться отношениями  $\frac{d_o}{D_o} = X$ ,  $\frac{H_o}{D_o} = Y$ . Внутренний диаметр обмотки  $d_o$  уточняется по выражению

$$d_o = X \sqrt[3]{\frac{1+X}{(1-X)(1+\beta_1 X)} \cdot \frac{\rho_r F^2}{K_3 K_{т.н} \cdot \tau_{доп}}}$$

**Таблица 2**

Основные кратности, рекомендуемые в [3]

Критерий оптимальности	X	Y
Минимальные габариты	0,62-0,69	1,0
Минимальная стоимость активных материалов	0,65-0,80	1,8-1,9

При принятых  $X=0,65$ ;  $Y=1,8$  имеем

$$d_{o1} = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{(1+0,65) \cdot 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 2522^2}{(1-0,65)(1+1,7 \cdot 0,65) \cdot 1,8^2 \cdot 0,5 \cdot 9,7 \cdot 80}} \approx 42,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$d_{c1} = \frac{d_{o1}}{1+2 \cdot 0,1} = \frac{42,7 \cdot 10^{-3}}{1,2} = 35,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Расхождение составляет  $\frac{28-35,6}{28} \cdot 100 = -27,1 \%$ .

Принимаем  $B_{c2} = 1 \text{ Тл}$  и тогда  $S_{c2} = 1,48 \cdot 0,35 \cdot 16 \cdot 10^{-4} = 8,29 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

$$d_{c2} = 2 \sqrt{S_{c2} / \pi} = 2 \sqrt{\frac{8,29 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 32,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Расхождение  $\frac{35,6-32,5}{35,6} \cdot 100 = 8,7 \%$ . Можно принять  $d_c = 34 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Методика [12,13] базируется на экспериментальных тяговых характеристиках, усредненных по силе и представленных в безразмерной критериальной форме. При проектировании изначально задаются кратностями (соразмерностями) в КЭМ в долях диаметра сердечника указанными (табл. 1) над чертой:  $d_* = d_{п} / d_c = 1,36$ ;  $c_* = c / d_c = 1,51$ ;  $A_* = A_o / d_c = 0,635$ ;  $H_* = H_o / d_c = 2,91$ ;  $a_{п*} = a_{п} / d_c = 0,127$ ;  $a_{ск*} = a_{ск} / d_c = 0,363$ ;  $b_{ск*} = b_{ск} / d_c = 3,05$ ;  $b_{як*} = b_{як} / d_c = 3,05$ ;  $a_{як*} = a_{як} / d_c = 0,272$ .

На основании формулы Максвелла при принятой первоначально индукции  $B_s = 0,6 \text{ Тл}$  определяется  $S_{п}$  и  $d_{п}$ :

$$S_{п} = 5,47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad d_{п} = 26,4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Определяется  $\delta^{**} = \delta / d_{\text{п}} = 3,9 \cdot 10^{-3} / 26,4 \cdot 10^{-3} = 0,148$ . По безразмерной усредненной тяговой характеристике [13] определяется  $P_{\text{эм}}^{**} = 4,35$ .

$$F_{\text{min}} = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{P_{\text{эм}}^{**}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{эм}}}{\mu_0}} = \frac{1,596}{4,35} \cdot 7906 = 2901 \text{ А.}$$

$$\text{Рассчитывается } F_{\text{max}(1)} = F_{\text{min}} / K_{\text{з}} = \frac{2901}{0,85U_{\text{н}} / 1,05U_{\text{н}}} = 3584 \text{ А.}$$

$$d_{\text{с}} = d_{\text{п}} / d_{*} = 26,4 \cdot 10^{-3} / 1,36 = 19,4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

В соответствии с [13] определяется коэффициент  $N_{\text{с1}} = 1,2 \cdot 10^6$ .

$$\text{Рассчитывается } F_{\text{max}(2)} = N_{\text{с1}} \sqrt{d_{\text{с}}^3} = 1,2 \cdot 10^6 \sqrt{(19,4 \cdot 10^{-3})^3} = 3243 \text{ А.}$$

Выполняются аналогичные расчеты при  $d_{\text{п}} = 27 \cdot 10^{-3}$  м и  $d_{\text{п}} = 28 \cdot 10^{-3}$  м, результаты которых занесены в табл. 3.

**Таблица 3**

К определению диаметра сердечника по методике [12,13]

Номер варианта	$d_{\text{п}} \cdot 10^{-3}$ , м	$d_{\text{с}} \cdot 10^{-3}$ , м	$F_{\text{max}(1)}$ , А	$F_{\text{max}(2)}$ , А
1	26,4	19,4	3584	3243
2	27	19,9	3315	3365
3	28	20,6	3245	3548

Решив графически уравнение  $F_{\text{max}(1)}(d_{\text{п}}) = F_{\text{max}(2)}(d_{\text{п}})$ , относительно  $d_{\text{п}}$  получим  $d_{\text{п}} = 26,8 \cdot 10^{-3}$  м. Тогда  $d_{\text{с}} = d_{\text{п}} / d_{*} = 26,8 \cdot 10^{-3} / 1,36 = 19,7 \cdot 10^{-3}$  м.

Принимая во внимание соразмерности в КЭМ (записаны в табл. 1 над чертой) очевидным образом определяются размеры КЭМ (записаны в табл. 1 под чертой). Методика [5] предварительного (проектного) расчета электромагнитов названа «по определяющему размеру». Позже [7] она получила название метода «корректирующих функций». Суть обсуждаемой методики проиллюстрируем с использованием принятых исходных данных проектного расчета.

Выбирается основные коэффициенты кратностей геометрических размеров КЭМ:  $A_{*} = 0,635$ ;  $H_{*} = 2,91$ ;  $\Delta_{*} = 0,065$ ;  $d_{*} = 1,37$ ;  $a_{\text{п}*} = 0,127$ .

Выбираются основные физические параметры и коэффициенты:  $\tau_{\text{доп}} = 80$  °С;  
 $\tau_{\text{о}} = \xi_{\text{о}} \tau_{\text{доп}} = 0,94 \cdot 80 = 75$  °С;  $K_{\text{т.н}} = 9,3(1 + 0,006\tau_{\text{о}}) = 13,5$  Вт/м<sup>2</sup>·°С;  
 $K_{\text{т.в}} = \beta_{\text{т}} K_{\text{т.н}} = 1,7 \cdot 13,5 = 23$  Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $\rho_{\text{г}} = 2,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м; коэффициент заполнения обмоточного окна  $f_{\text{з}} = 0,55$ ; коэффициент запаса по силе  $K_{\text{о}} = 1,35$ ;  $K_{U_{\text{min}}} = 0,85$ .

В КЭМ принимается допущение, что электромагнитный момент создается за счет усилия в рабочем воздушном зазоре ( $K_c = 0$ ).

Для однокатушечного КЭМ  $K_o = 2/f_3 = 2/0,55 = 3,64$ .

Комплекс коэффициентов ( $K_3$ ) запаса  $K_3 = \frac{K_o}{K_{U_{\min}}^2 \xi_o} = 2$ .

Комплекс физических параметров:

$$K_{\phi.\Pi} = \frac{\rho_\Gamma}{\mu_o K_{T.H} \tau_{\text{доп}}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-8}}{12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 13,5 \cdot 80} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ М}^3/\text{Н}.$$

$$l_{\text{ср}^*} = \pi(1 + 2\Delta_* + A_*) = 5,54; \lambda_{\text{ок}} = A_* H_* = 1,85; \lambda_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \cdot d_*^2 = 1,47;$$

$\lambda_{\text{охл}} = \pi H_* [(1 + 2\Delta_k)(1 + \beta_T) + 2A_*] = 39,5$ ; тогда комплекс коэффициентов

$$K_{\phi.\Pi} = \frac{l_{\text{ср}^*}}{\lambda_{\Pi} \lambda_{\text{ок}} \lambda_{\text{охл}}} = 5,16 \cdot 10^{-2}.$$

$$c_* = 0,5 + \Delta_* + A_* + u = 0,5 + 0,065 + 0,635 + 0,2 = 1,4.$$

$$b_{\text{ск}^*} = 1 + 2\Delta_* + 2A_* = 2,4; \text{принимаем } b_{\text{ск}^*} = 3,05; b_{\text{як}^*} = 3,05; a_{\text{ск}^*} = a_{\text{як}^*} = 0,36.$$

$$D_o = K_o K_3 K_{\phi.\Pi} K_{\text{кр}} = 3,64 \cdot 2 \cdot 1,80 \cdot 10^{-5} \cdot 5,16 \cdot 10^{-2} = 69,9 \cdot 10^{-7}.$$

$$D_c = D_o \frac{P_{\text{мх}}}{\delta^3} = 69,9 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{78,4}{3,9^3 \cdot 10^{-9}} = 9250.$$

Решая графически уравнение  $x^5 D_x = D_c$  относительно  $x = d_c / \delta$ , можно определить  $d_c$ . В рассматриваемом примере  $x = x_o = 6,60$ . Следовательно,  $d_c = x_o \delta = 6,6 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} = 25,7 \cdot 10^{-3}$  м. При известных (принятых) кратностях геометрических размеров очевидным образом вычислены размеры КЭМ; приведенные в табл. 1 (под чертой в строке под номером 5).

Суть методики [8], как и выше рассмотренных [12] и [6], состоит в предварительно выбираемых кратностях размеров КЭМ. Основное отличие заключается в том, что выражение для магнитной проводимости [4] неравномерного поля рабочего зазора приводится к равномерному, с площадью поперечного сечения полюса  $S_{\text{пр}}$ , которое в последующем используется в упрощенной формуле Максвелла для расчета электромагнитной силы.

Из выражений необходимой МДС для создания требуемой электромагнитной силы и максимально допустимой по условию предельного нагрева (до допустимой температуры) определяется магнитная индукция в рабочем воздушном зазоре. Далее, на основании формулы Максвелла определяется диаметр сердечника ( $d_c = 27,3 \cdot 10^{-3}$  м). По принятым кратностям рассчитываются размеры КЭМ. Отметим, что по методике [8], при прочих

равных условиях, получился диаметр сердечника наиболее близкий к реальному [12] КЭМ с  $d_c = 27,5$  м.

В методиках [2] и [7] рассматриваются проектные расчеты, минимизирующие массу активных материалов КЭМ (суммарной ферромагнитной стали и обмоточной меди). Проектные расчеты в данном случае выполнены при следующих исходных данных:  $P_{\text{мх}} = 15$  Н;  $\delta = 6 \cdot 10^{-3}$  м;  $T_o = 40$  °С;  $\theta_{\text{доп}} = 125$  °С; обмотка намотана на металлическую трубу ( $\beta_T = 1,7$ );  $K_3 = 0,5$ ; режим работы – длительный [7].

Выбираются [7] коэффициенты запаса для критических условий:  $K_o = 1,35$ ;  $K_{U_{\text{min}}} = 0,85$ ;  $\xi_o = 0,88$ . Выбираем кратности в КМС (в табл. 1 над чертой).

В соответствии с рекомендациями в [3]:

$$A_* = 0,732 - 0,0056 \cdot P_{\text{мх}} = 0,648;$$

$$\beta = (5,339 + 0,437 / P_{\text{мх}}) / d_*^{1,084} = (5,339 + 0,437 / 15) / 1,6^{1,084} = 3,21;$$

$$H_* = A_* \beta = 0,648 \cdot 3,21 = 2,08;$$

$$c_* = 0,5 + \Delta_* + A_* + u = 0,5 + 0,1 + 0,648 + 0,2 = 1,448.$$

$$\tau_{\text{доп}} = \theta_{\text{доп}} - T_o = 125 - 40 = 85 \text{ °С}; \tau_o = \xi_o \tau_{\text{доп}} = 0,88 \cdot 85 = 75 \text{ °С}.$$

Далее решается задача по методике [6] и определяется  $d_c = 25,1 \cdot 10^{-3}$  м.

В строке под номером 7 таблицы 1 записаны под чертой кратности КЭМ.

В строке под номером 8 таблицы 1 записаны результаты оптимизационного расчета кратностей КЭМ (под чертой), минимизирующих массу активных материалов. Суть методики та же, что изложена в [2], изменяется лишь критерий оптимальности.

Методики [5, 10], базирующиеся на понятии «конструктивный фактор», строго говоря справедливы при: условно-полезной работе ( $P_{\text{мх}} \cdot \delta$ ) равной 0,6 кг·см; превышении температуры нагрева обмотки  $\tau_{\text{доп}} = 70$  °С; длительном режиме работы. Без должного обоснования выбираются: кратность высоты обмотки [5]; отношение высоты к толщине обмотки [10,11]; магнитная индукция в основании сердечника; коэффициенты потерь и запаса магнитодвижущей силы; коэффициенты теплопередачи: именно эти обстоятельства приводят к значительным расхождениям при определении диаметра сердечника (см. строки с номерами 1, 2, 3 табл. 1).

При иллюстрации методик [6, 8, 10,13] приняты одинаковые кратности геометрических размеров (исключение составляет  $c_* = 1,40$  в строке с номером 5). Наибольшее отличие рассчитанного значения диаметра сердечника ( $d_c = 19,4 \cdot 10^{-3}$ ) от фактического значения [12] ( $d_c = 27,5 \cdot 10^{-3}$  м) на реальном приводном электромагните оказалось при использовании в

проектной методике экспериментальной усредненной тяговой характеристики [13]. Связано это с тем, что обобщенная нагрузочная характеристика [1] в значительной степени зависит от кратностей размеров КЭМ и магнитной индукции в стали.

Предпочтительны методики проектного расчета, основанные на экспериментальных зависимостях силовых характеристик и тепловых параметров. Они адекватно учитывают особенности топологии магнитных и температурных полей КЭМ, позволяют минимизировать количество выбираемых кратностей и коэффициентов, что повышает достоверность результатов синтеза. Так, например, в методике, описанной в [2], предварительно задаются лишь кратности не определяющих (слабо влияющих на результаты проектного расчета) размеров КМС. Основные размеры и их кратности ( $A_*, H_*, d_*, c_*, \delta_* = \delta/d_c$ ) определяются в результате минимизации функции цели (в рассмотренном случае – массы активных материалов) и представлены в табл. 1 (под чертой в строке с номером 7).

### **Выводы**

1. Методики проектного расчета, базирующиеся на использовании «конструктивного фактора» могут быть рекомендованы для определения размеров клапанных электромагнитов лишь в первом приближении.
2. Использование в проектных методиках усредненной тяговой характеристики может привести к существенному искажению размеров электромагнитов, поэтому предпочтительным является использование экспериментальной обобщенной нагрузочной характеристики.
3. Предлагаемая методика оптимизационного проектного расчета клапанного электромагнита позволила определить его размеры, обеспечивающие в 1,58 раза меньшую массу активных материалов, чем известная, предложенная в [7] методика.

*Исследование выполнено в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки России*

### **Список литературы**

1. Афанасьев В.В. Обобщенные экспериментальные статические нагрузочные характеристики клапанных электромагнитов постоянного тока с круглым полюсным наконечниками. Способ представления / В.В. Афанасьев, А.В. Приказчиков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Электротехника. – 2011. – №5. – С. 39-45.
2. Афанасьев В.В., Кадыков В.К., Приказчиков А.В., Руссова Н.В., Свинцов Г.П. Методика расчета энергосберегающих клапанных электромагнитов постоянного напряжения // Вестник

Чувашского университета. – 2013. – №3. – С. 164-169.

3. Бугаев Г.А. Расчет основных размеров клапанных электромагнитов постоянного тока // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. – 1981. – Вып. 6 [97]. – С. 10–11.
4. Глухенький Г.Т., Кычкин В.Ф., Свинцов Г.П. К расчету магнитной проводимости зазора между цилиндрическим полюсным наконечником и плоским поворотным якорем // Электротехника. – 1998. – №4. – С. 31-36.
5. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
6. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчет и элементы проектирования). – М.: Энергия, 1968. – 152 с.
7. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 390 с.
8. Приказщиков А.В., Руссова Н.В., Свинцов Г.П. К проектному расчету клапанных электромагнитов постоянного напряжения с круглыми полюсными наконечниками // Труды академии электротехнических наук ЧР. – 2009. – № 1. – С. 59–66.
9. Свинцов Г.П. Электромагнитные контакторы и пускатели: учеб. пособие. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 260 с.
10. Софронов Ю.В., Свинцов Г.П., Николаев Н.Н. Проектирование электромеханических аппаратов автоматики. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1986. – 88 с.
11. Софронов Ю.В., Руссова Н.В. Тепловой расчет катушек электрических аппаратов постоянного тока. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. – 48 с.
12. Шоффа В.Н. Проектный метод расчета электромагнитов постоянного тока клапанного типа // Электротехника. – 1968. – № 5. – С. 41–45.
13. Шоффа В. Н. Методы расчета магнитных систем постоянного тока. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 40 с.

#### **Рецензенты:**

Афанасьев А.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары;

Павленко А.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электромеханики и электрических аппаратов ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.