

## СИНТЕЗ СИММЕТРИЧНЫХ П-ОБРАЗНЫХ ДВУХКАТУШЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ИНТЕГРАЛЬНОМУ КРИТЕРИЮ КАЧЕСТВА

Руссова Н.В.

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
“Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова”

Россия, 428000, Чувашская Республика, Чебоксары, Московский пр., 15, ФГОУ ВПО “Чувашский  
государственный университет имени И.Н. Ульянова”, кафедра электрических и электронных аппаратов.  
тел. (8352) 49-87-53, 49-87-17, E-mail: russova@chuvsu.ru

*Розглянуто алгоритм синтезу симетричних П-подібних електромагнітів за інтегральним критерієм якості. Приведе-  
но поліноміальні залежності основних геометричних домірностей у магнітній системі і техніко-експлуатаційних  
параметрах, що забезпечують мінімум адитивного критерію оптимальності.*

*Рассмотрен алгоритм синтеза симметричных П-образных электромагнитов по интегральному критерию качества.  
Приведены полиномиальные зависимости основных геометрических соизмерностей в магнитной системе и техни-  
ко-эксплуатационных параметров, обеспечивающие минимум аддитивного критерия оптимальности.*

При проектировании электромагнитных комму-  
тационных аппаратов одной из задач, требующих  
принятия компромиссных решений, является выбор  
геометрических соотношений магнитной системы  
(МС) электромагнита, отвечающей поставленным  
техническим условиям и удовлетворяющей опреде-  
ленному критерию оптимальности. Часто требуется  
чтобы критерий оптимальности учитывал несколько  
требований, например, минимизация массы активных  
материалов электромагнита и потребляемой им мощ-  
ности. Установить строгую математическую связь  
между совокупностью приоритетных требований за-  
труднительно, поэтому критерий формируется в виде  
аддитивной структуры [1].

В работе рассматривается синтез симметричных  
двухкатушечных П-образных электромагнитов (рис. 1).

Основу предлагаемого алгоритма синтеза со-  
ставляют решения уравнений силовых характеристик  
и характеристик нагрева электромагнитов.

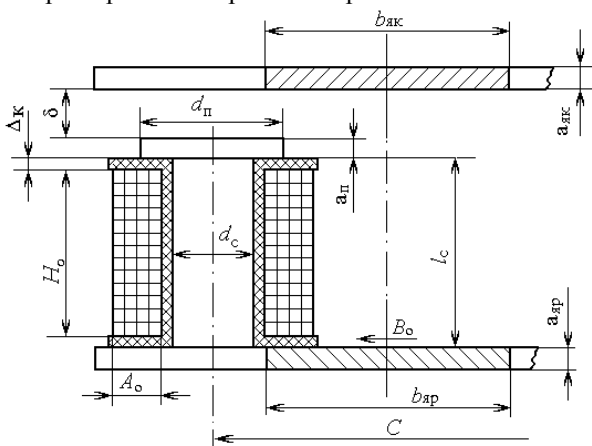


Рис. 1

Для разработки математических моделей стати-  
ческих силовых характеристик электромагнита вы-  
брано физическое моделирование, организованное в  
соответствии с методами активного эксперимента, а

для придания результатам обобщенного характера в  
качестве факторов использованы критерии геометри-  
ческого подобия МС ( $\delta_* = \delta/d_c$ ,  $d_* = d_{\pi}/d_c$ ,  
 $H_* = H_0/d_c$ ,  $A_* = A_0/d_c$ ,  $C_* = C/d_c$ ) и индукция  
( $B_0$ ) в сечении ярма, лежащем в поперечной плоско-  
сти симметрии МС [2] (рис. 1).

Электромагнитное усилие ( $P_{эм}$ ) и магнитодви-  
жущая сила ( $F$ ) описаны в критериальной (безраз-  
мерной) форме:

$$P_* = \frac{P_{эм}}{P_{эм.баз}} = P_*(\delta_*, d_*, C_*, A_*, H_*, B_0), \quad (1)$$

$$F_* = \frac{F}{F_{баз}} = F_*(\delta_*, d_*, C_*, A_*, H_*, B_0), \quad (2)$$

где  $P_{баз} = B_0^2 S_c / \mu_0$ ;  $F_{баз} = B_0 d_c / \mu_0$ ;  $S_c = \pi d_c^2 / 4$ .

Пределы варьирования определяющих относи-  
тельных геометрических размеров выбраны достаточ-  
но широкими с учетом имеющейся в литературе ин-  
формации об основных соизмерностях электромаг-  
нитов данного класса:

$$0,05 \leq \delta_* \leq 0,50; \quad 1,24 \leq d_* \leq 1,76; \quad 1,245 \leq H_* \leq 4,755;$$

$$0,25 \leq A_* \leq 0,75; \quad 2,50 \leq C_* \leq 4,50.$$

Выбор пределов изменения индукции  $B_0$   
( $0,87 \text{ Т} \leq B_0 \leq 1,6 \text{ Т}$ ) определяется диапазоном значе-  
ний индукции в стали, при которых достигают эк-  
стремумов критерия оптимальности электромагнитов  
[3] (сталь марки 10895).

В отличие от известных работ при определении  
электромагнитного усилия и МДС не накладывались  
ограничения на тепловые параметры электромаг-  
нитов. Это позволяет использовать модели статической  
нагрузочной характеристики в виде системы уравне-  
ний (1) и (2) при синтезе электромагнитов, работаю-  
щих в различных режимах.

Тепловое состояние обмоток учитывается на ос-  
нове формулы Ньютона-Рихмана [4]:

$$P = K_{т.э.кв} S_0 (\Theta_S - \Theta_0) n_P, \quad (3)$$

где  $P$  – мощность, рассеиваемая с геометрической поверхности обмотки;  $\Theta_S$  – среднеповерхностная температура обмотки;  $\Theta_0$  – температура окружающего воздуха;  $K_{Т.ЭКВ}$  – эквивалентный коэффициент теплоотдачи электромагнита, приведенный к геометрической поверхности катушки ( $S_0$ ),  $n_P$  – коэффициент перегрузки по мощности.

Когда тепловая постоянная времени нагрева обмоток значительно больше времени цикла в повторно-кратковременном режиме работы электромагнита (что соответствует большинству практических случаев) коэффициент перегрузки определяется [4] простым выражением:

$$n_P = 100/\text{ПВ}\%,$$

где ПВ% – относительная продолжительность повторно-кратковременного включения.

Тепловые параметры: эквивалентный коэффициент теплоотдачи ( $K_{Т.ЭКВ}$ ), среднеповерхностная ( $\Theta_S$ ) и среднеобъемная ( $\Theta_V$ ) температуры нагрева моделировались на основе совместного использования методики раздельного учета теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием с поверхностями электромагнита и расчета функций коэффициентов неравномерности температурного поля обмоток, а затем на основе вычислительного эксперимента представлялись в критериальном виде [5]:

$$K_* = \frac{K_{Т.ЭКВ} S_0}{(K_{Т.баз} S_c)} = K_*(H_*, A_*, C_*, \Theta_{\max}, \Theta_0), \quad (4)$$

$$\Theta_{S*} = \Theta_S / \Theta_0 = \Theta_{S*}(A_*, \Theta_{\max}, \Theta_0), \quad (5)$$

$$\Theta_{V*} = \Theta_V / \Theta_0 = \Theta_{V*}(\Theta_{\max}, \Theta_0), \quad (6)$$

где  $K_{Т.баз} = 5,67(2,73 + 0,01\Theta_0)^4 / \Theta_0$ ;  $T_{баз} = \mu_0 S / \rho_0$ ;  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление меди при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_{\max}$  – допустимая максимальная температура нагрева обмоток.

Интегральный критерий оптимальности записывается в виде:

$$KR = n \frac{M_{a*}}{M_{a.\text{опт}*}} + (1-n) \frac{P_*}{P_{\text{опт}*}}, \quad (7)$$

где  $M_{a*} = (m_{ст} + m_m) / (\gamma_{ст} \delta_{кр}^3)$ ;

$$P_* = \frac{P}{(P_{\text{мх.кр}} \rho_0 / \delta_{кр} \mu_0)};$$

$m_{ст}$ ,  $m_m$  – масса стали и обмоточной меди соответственно;  $\gamma_{ст}$  – плотность ферромагнитной стали;  $\delta_{кр}$ ,  $P_{\text{мх.кр}}$  – координаты расчетной точки противодействующей (механической) характеристики;  $n$  – весовой коэффициент значимости критерия массы.

Важность того или иного частного критерия оптимальности учитывается введением весовых коэффициентов. Причем их сумма должна быть равна 1. Это условие позволяет в данном случае варьировать в пределах от 0 до 1 только один из весовых коэффициентов.

Для проектирования был модернизирован ранее разработанный алгоритм синтеза [6], который укруп-

нено сводится к следующей последовательности вычислительных действий (рис. 2).

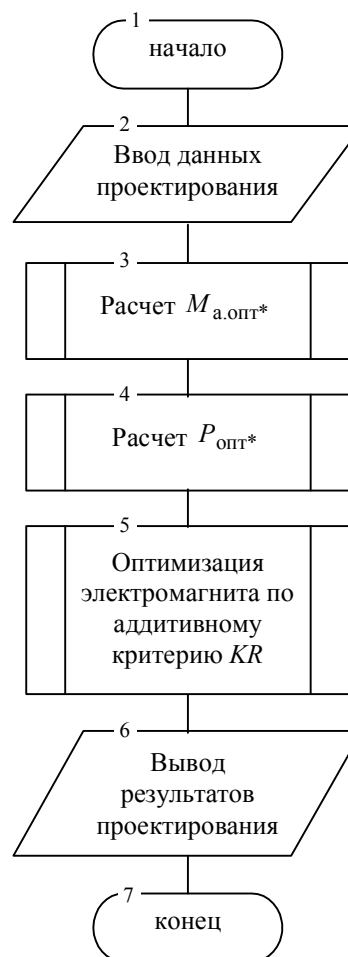


Рис. 2

1. Вводятся исходные данные проектирования (рабочий зазор, противодействующая сила или условно-полезная работа, температура окружающей среды, максимально допустимая температура нагрева электромагнита, атмосферное давление и коэффициенты, характеризующие режим работы, параметры питания электромагнита и важность частных критериев оптимальности).

2. Решается задача оптимизации электромагнита по частному критерию минимизации массы активных материалов. В результате получаем значение  $M_{a.\text{опт}*}$ .

3. Все действия повторяются для нахождения  $P_{\text{опт}*}$ , т.е. решается задача оптимизации электромагнита по критерию минимума потребляемой мощности.

4. Проводятся расчеты по минимизации аддитивного критерия.

5. Организуется вывод результатов оптимизации и расчета (МДС срабатывания, потребляемой мощности, индукции  $B_0$ , критериев оптимальности, геометрических размеров магнитной системы).

Для установления функциональной связи результатов синтеза с исходными данными проектирования методами теории активного эксперимента проведен вычислительный эксперимент. В качестве "объекта"

эксперимента рассматривался рассмотренный выше алгоритм синтеза.

Результаты оптимизационных расчетов для удобства использования в инженерной практике представлялись в безразмерной форме. Геометрические размеры, обеспечивающие минимум соответствующему критерию оптимальности, представлялись в долях базисного линейного размера МС, т.е.  $d_c$  - для электромагнитов с цилиндрическими сердечниками.

Для записи технико-эксплуатационных параметров в безразмерной форме формируются комплексы проектирования. Они представляют собой математические выражения, составленные из исходных данных проектирования и физических констант.

В результате получено:

$$\delta_* = \frac{\delta}{d_c} = 10^{-8} (76,38 + 7,90x_1 - 2,10x_2 +$$

$$+ 1,15x_3 - 2,31x_1^2 + 0,86x_1x_2)^4;$$

$$d_* = d_{\text{п}}/d_c = 1,75;$$

$$H_* = \frac{H_0}{d_c} = 10^{-4} (163,57 + 8,87x_1 - 4,40x_2 - 12,73x_3 +$$

$$+ 11,46x_4 - 6,17x_6 - 4,96x_1^2 + 3,09x_2^2 + 2,54x_3^2 +$$

$$+ 4,10x_1x_2 - 3,85x_1x_3 + 3,34x_1x_4 - 2,67x_1x_5 +$$

$$+ 1,99x_2x_3 - 2,13x_2x_4 - 2,07x_1x_2x_4 +$$

$$+ 2,06x_1x_3x_4 + 1,86x_1x_4x_5 - 1,84x_2x_3x_4)^2;$$

$$A_* = \frac{A_0}{d_c} = 10^{-8} (83,86 + 1,29x_1 + 1,17x_2 - 1,06x_3 +$$

$$+ 2,69x_4 + 1,82x_5 - 2,05x_6 - 4,03x_1^2 - 1,50x_2^2 +$$

$$+ 1,10x_3^2 - 0,92x_4^2 + 0,95x_5^2 + 2,07x_6^2 +$$

$$+ 4,05x_1x_2 - 2,07x_1x_3 - 1,42x_1x_5 - 0,87x_3x_5 -$$

$$- 0,85x_4x_5 + 1,80x_1x_2x_3 - 0,86x_1x_3x_4 +$$

$$+ 0,87x_1x_3x_6)^4;$$

$$C_* = \frac{C}{d_c} = 10^{-4} (176,18 + 3,33x_1 + 3,99x_2 - 3,82x_1^2 +$$

$$+ 5,50x_1x_2 - 3,23x_1x_3)^2;$$

$$B_{0*} = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 P_{\text{мк.кр}} / \delta_{\text{кр}}}} = 10^{-8} (114,53 + 17,13x_1 -$$

$$- 4,85x_2 - 4,89x_1^2 + 1,53x_2^2 + 1,63x_1x_2 -$$

$$- 1,72x_1x_3 + 1,24x_1x_2x_3)^4;$$

$$F_* = \frac{F_{\text{ср}}}{\sqrt{P_{\text{мк.кр}} / \mu_0}} = 10^{-4} (68,34 + 11,87x_1 - 2,98x_2 +$$

$$+ 1,48x_3 - 0,76x_4 + 0,94x_5 - 4,09x_1^2 + 1,03x_2^2 +$$

$$+ 1,86x_1x_2 - 1,10x_1x_3 - 0,99x_1x_5 - 0,75x_4x_5 +$$

$$+ 1,04x_1x_2x_3)^2;$$

$$P_* = \frac{P}{P_{\text{мк.кр}} \rho_0 / (\delta_{\text{кр}} \mu_0)} = 10^{-8} (103,85 + 25,36x_1 -$$

$$- 7,94x_2 + 9,12x_3 - 8,57x_4 - 2,99x_6 - 3,35x_1^2 +$$

$$+ 2,77x_2^2 - 2,27x_3^2 + 3,05x_4^2 - 1,94x_1x_2 +$$

$$+ 2,08x_1x_3 - 2,13x_1x_4 - 1,05x_3x_4)^4,$$

где  $x_1 = 0,271\delta_{\text{кр}} - 2,438$ ;  $x_2 = 7,042A_{\text{уп}} - 2,113$ ;

$$x_3 = 0,032\Theta_{\text{max}} - 4,163$$
;  $x_4 = 0,039\text{ПВ}\% - 2,153$ ;

$$x_5 = 3,5224n - 1,761$$
;  $x_6 = 7,042K_3 - 3,521$ .

Подобные математические модели существенно сокращают затраты на проектирование, поскольку все параметры определяются прямым расчетом, и позволяют распространить результаты вычислительного эксперимента на множество физически подобных электромагнитов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.Г. Никитенко, И.И. Пеккер Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 216 с.
- [2] Руссова Н.В., Свинцов Г.П. Экспериментальные обобщенные электромагнитные характеристики П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного тока с внешним прямоходовым якорем // Изв. вузов. Электромеханика. - 1998. - № 5-6. - С. 27-29.
- [3] Никитенко А.Г. О выборе расчетных значений индукции при проектировании электромагнитов постоянного тока // Изв. вузов. Электромеханика. - 1974. - №3. - С. 278-284.
- [4] Буль Б.К., Буткевич Г.В., Годжелло А.Г. и др. Основы теории электрических аппаратов. - М.: Высш. шк., 1970. - 600 с.
- [5] Руссова Н.В. Математическое моделирование тепловых параметров электромагнитов постоянного тока и напряжения. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции "Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике". - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2002. - С. 145 - 149.
- [6] Руссова Н.В. Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов с цилиндрическими сердечниками // Изв. вузов Электромеханика. - 2002. - №3. - С. 30 - 34.

Поступила 30.08.2003