

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ АКТИВНОГО ПРОВОДНИКА ДИСКОВОГО ПЕЧАТНОГО ЯКОРЯ

А. М. ШОР, В. М. КАЗАНСКИЙ, Л. Д. ОСНОВИЧ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В самые последние годы получили признание электродвигатели постоянного тока с печатной обмоткой на якоре [1, 2, 4, 5], проектирование которых базируется на необходимости обеспечения наилучшего собственного быстродействия.

Выбор оптимальной геометрии дискового ротора из условия минимальной механической инерционности дан в [3]. Оптимальное значение среднего диаметра диска (рис. 1) ограничено шириной проводника в лобовых частях, выбираемой в зависимости от допускаемой плотности тока. Ширина активного кольца якоря равна активной длине проводника

$$\frac{1}{2}(D'_e - D'_i) = l_a \quad (1)$$

и определяется величиной напряжения, индукцией в зазоре и скоростью двигателя. Степень заполнения активного кольца медью может быть различной в зависимости от ширины активного проводника, минимальное значение которой определено шириной печатного проводника лобовых частей.

При одинаковой толщине печатного слоя активных и лобовых частей обмотки увеличение ширины печатного проводника вызывает противоречивое влияние на инерционность и тепловую нагрузку двигателя.

С одной стороны, увеличение ширины активного проводника приводит к уменьшению джоулевых потерь от тока якоря в активном слое, с другой стороны — к увеличению потерь на вихревые токи пропорционально кубу ширины активного проводника.

С одной стороны, уменьшение ширины активного проводника способствует увеличению электрохимической постоянной времени двигателя за счет увеличения сопротивления якоря R_a , с другой — уменьшению той же постоянной за счет снижения массы вращающегося якоря.

И то и другое противоречие требует отыскания оптимальных значений ширины активного проводника.

Электрохимическая постоянная времени якоря

$$T_m = \frac{GD^2 R_a}{375 C_e C_m} \quad (2)$$

Зависящие от ширины активного проводника b_a величины в выражении (2) входят только в числитель, поэтому условием оптимума будет

$$\frac{d}{db_a}(GD^2R_a)=0. \quad (3)$$

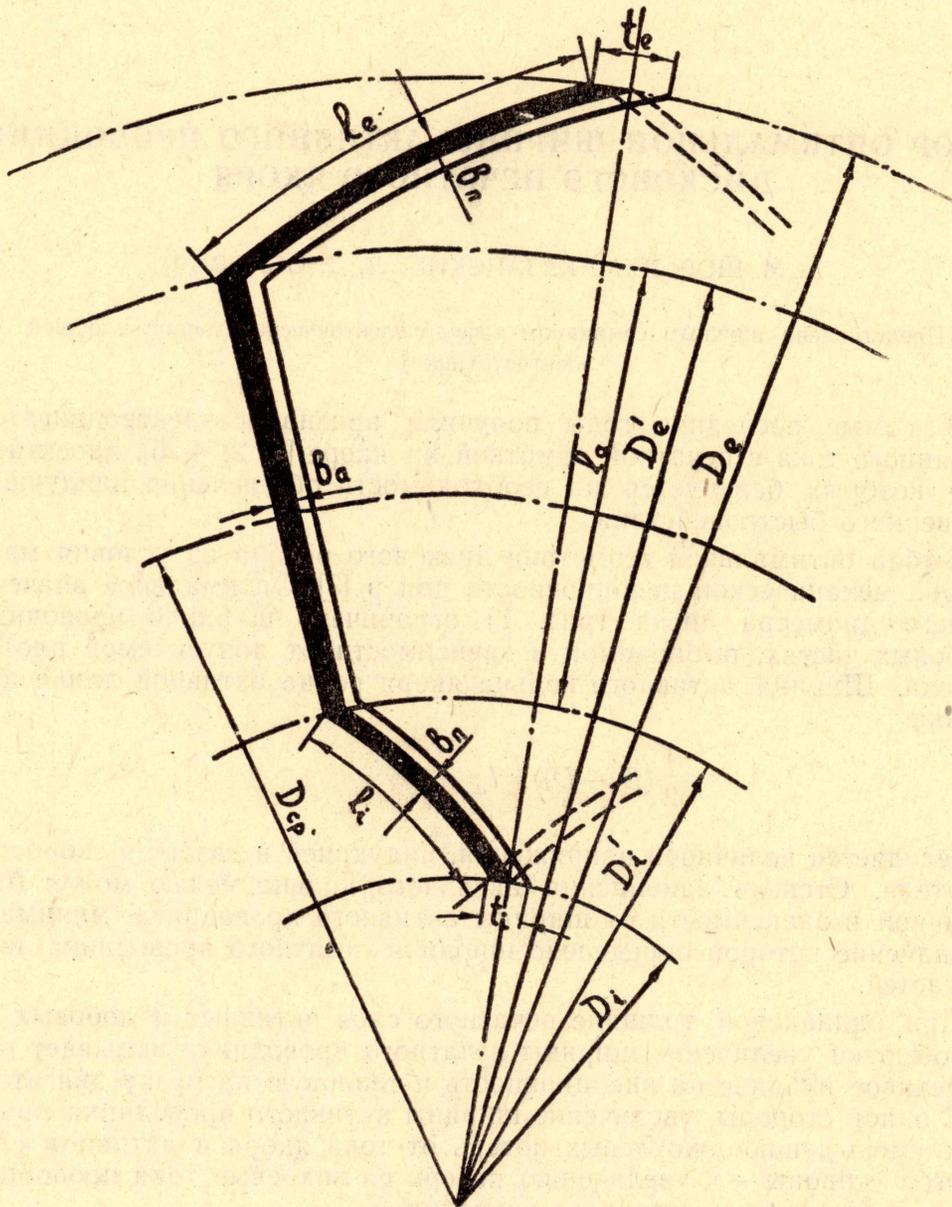


Рис. 1.

Вводя в анализ относительную ширину активного проводника

$$\beta = \frac{b_a}{b_n} \quad (4)$$

в соответствии с рис. 1 получим

$$R_a = \frac{\rho N}{(2a)^2 h_n b_n} \left(l_n + \frac{l_a}{\beta} \right), \quad (5)$$

где $l_x = l_e + l_i$ — суммарная длина лобовых частей полувитка обмотки;
 h_n — толщина печатного проводника;
 b_n — ширина проводника лобовых частей;
 N — число проводников в обмотке.

Переменной составляющей махового момента якоря, зависящей от β является маховый момент активного кольца меди GD_β^2 , который может быть представлен как сумма N маховых моментов одного проводника, представляющего собой прямоугольный параллелепипед со сторонами l_a , b_a и h_n вращающегося вокруг оси, отстоящей от центра тяжести на расстоянии $0,5 D_{cp}$.

Тогда

$$CD_\beta^2 = N d l_a h_n b_a \left[\frac{l_a^2 + b_a^2}{3} + D_{cp}^2 \right]. \quad (6)$$

Так как $b_a^2 \ll l_a^2$, то

$$GD_\beta^2 = \beta \left(\frac{l_a^2}{3} + D_{cp}^2 \right) N d l_a h_n b_n, \quad (7)$$

где d — удельный вес меди.

Не зависящая от β часть махового момента может быть представлена двумя составляющими, одна из которых $GD_{лм}^2$ представляет собой маховый момент внешнего и внутреннего колец меди лобовых частей и вторая GD_0^2 — маховый момент всех остальных вращающихся частей якоря (крепящей втулки, несущей основы диска, коллектора вала и т. д.).

Удобно маховый момент якоря представить в следующем виде:

$$GD^2 = GD_{лм}^2 (\kappa_0 + 1) + GD_0^2, \quad (8)$$

где $\kappa_0 = \frac{GD_0^2}{GD_{лм}^2}$ определяется после выбора основных размеров диска ротора в соответствии с [3].

Маховый момент лобовой меди определяется как сумма маховых моментов внутреннего и внешнего лобовых колец

$$GD_{лм}^2 = 2 N d h_n b_n \left[l_e \frac{D_e^2 + D_e'^2}{4} + l_i \frac{D_i^2 + D_i'^2}{4} \right]. \quad (9)$$

Обозначая через коэффициенты

$$\kappa_n = 0,5 l_e (D_e^2 + D_e'^2) + 0,5 l_i (D_i^2 + D_i'^2),$$

$$\kappa_a = l_a \left(\frac{1}{3} l_a^2 + D_{cp}^2 \right)$$

и вводя в (8) выражения (7) и (9), получим

$$GD^2 = N d h_n b_n [(\kappa_0 + 1) \kappa_n + \beta \kappa_a]. \quad (10)$$

Из (3) условие оптимума ширины активного проводника будет

$$\rho d \left(\frac{N}{2a} \right)^2 \frac{d}{d\beta} [(\kappa_0 + 1) \kappa_n + \kappa_a \beta] \left(l_n + \frac{l_a}{\beta} \right) = 0.$$

После несложных преобразований получим оптимальное значение относительной ширины активного проводника из условия минимума электромеханической постоянной времени

$$\beta_{01} = \sqrt{(\kappa_0 + 1) \frac{\kappa_n l_a}{\kappa_a l_n}}. \quad (11)$$

Для определения длины лобовых частей полувитка при известных диаметрах диска можно рекомендовать следующие приближенные формулы:

$$l_e \cong \frac{1}{2} \sqrt{(D_e - D_e')^2 + \left(\frac{\pi D_e}{2p}\right)^2},$$

$$l_i \cong \frac{1}{2} \sqrt{(D_i' - D_i)^2 + \left(\frac{\pi D_i'}{2p}\right)^2}.$$

Второе противоречие разрешается отысканием оптимальной ширины активного проводника, исходя из минимума электрических потерь в роторе

$$\frac{d}{d\beta} (P_{мл} + P_{ма} + P_{в}) = 0, \quad (12)$$

где $P_{мл}$ — джоулевы потери от тока нагрузки в лобовых частях обмотки;

$P_{ма}$ — джоулевы потери от тока нагрузки в активных частях обмотки,

$P_{в}$ — потери на вихревые токи в печатной обмотке якоря.

$P_{мл}$ от β не зависят и выражаются постоянным коэффициентом

$$P_{мл} \cong \left(\frac{I_{я}}{2a}\right)^2 \frac{\rho(l_e + l_i)}{h_{п} b_{п}} = \kappa_1. \quad (13)$$

Соответственно,

$$P_{ма} \cong \left(\frac{I_{я}}{2a}\right)^2 \frac{\rho l_a}{h b_{п}} \frac{1}{\beta} = \frac{\kappa_2}{\beta}. \quad (14)$$

Потери на вихревые токи рассмотрены в [6], полученное там выражение может быть приведено к виду.

$$P_{в} = \kappa_3 \beta^3, \quad (15)$$

где

$$\kappa_3 = \frac{p^2 n^2 B_m^2 l_a h_{п} b_{п}^3}{2700 \rho (1 - \alpha_p)}. \quad (16)$$

Из условия (12) после соответствующих преобразований получим оптимальное значение относительной ширины активного проводника из условия минимума электрических потерь в роторе

$$\beta_{02} = \sqrt[4]{1 - \alpha_p} \sqrt{\frac{30 \rho j_{я}}{b_{п} n B_m p}}, \quad (17)$$

где $j_{я} = \frac{I_{я}}{2 a h_{п} b_{п}}$ — допустимая плотность тока в печатной обмотке

по лобовым частям.

Оптимальные значения ширины активного проводника из условий минимума электрохимической постоянной времени (11) и из условия минимума потерь в роторе (17) в общем случае не совпадают.

Поэтому для рационального выбора ширины активного проводника необходимо произвести оценку изменения электрохимической постоянной времени ΔT_m и потерь в роторе ΔP_p в зависимости от отклонения от соответствующих оптимальных значений β_{01} и β_{02} .

Соответствующие соотношения

$$\Delta T_m = f_1 \left(\frac{\Delta \beta}{\beta_{01}} \right) \quad \text{и} \quad \Delta P_p = f_2 \left(\frac{\Delta \beta}{\beta_{02}} \right)$$

можно получить путем разложения зависимостей электромеханической постоянной времени и потерь в роторе от относительной ширины активного проводника β в ряды Тейлора в окрестностях соответственно точек $\beta = \beta_{01}$ и $\beta = \beta_{02}$

$$T_M = T_{M0} + T'_{M0}(\beta - \beta_{01}) + \frac{T''_{M0}}{2!}(\beta - \beta_{01})^2 + \frac{T'''_{M0}}{3!}(\beta - \beta_{01})^3 + \dots, \quad (18)$$

где T_{M0} — оптимальное значение электромеханической постоянной времени при $\beta = \beta_{01}$,

$$T_{M0} = \frac{\rho d \left(\frac{N}{2a}\right)^2}{375 c_e c_m} [(\kappa_0 + 1) \kappa_L + \beta_{01} \kappa_a] \left(l_L + \frac{l_a}{\beta_{01}}\right) = \\ = C [\kappa_a l_a + (\kappa_0 + 1) \kappa_L l_L + \frac{2}{\beta_{01}} \kappa_L l_a (\kappa_0 + 1)], \quad (19)$$

T'_{M0} , T''_{M0} , T'''_{M0} и т. д. — значения производных электромеханической постоянной времени по β при оптимальной ширине проводника $\beta = \beta_{01}$

$$\left. \begin{aligned} T'_{M0} &= 0, \\ T''_{M0} &= C 2! (\kappa_0 + 1) \kappa_L l_a \frac{1}{\beta_{01}^3}, \\ T'''_{M0} &= -C 3! (\kappa_0 + 1) \kappa_L l_a \frac{1}{\beta_{01}^4}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Тогда зависимость отклонения электромеханической постоянной в функции отклонения $\Delta\beta = \beta - \beta_{01}$ будет иметь вид

$$\frac{T_M - T_{M0}}{T_{M0}} = \frac{l_a / \beta_{01} l_L}{(l_a / \beta_{01} l_L + 1)^2} \left[\left(\frac{\Delta\beta}{\beta_{01}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta\beta}{\beta_{01}}\right)^3 + \dots \right]. \quad (21)$$

Ограничиваясь при $\Delta\beta < \beta_{01}$ первым членом разложения, получим

$$\frac{\Delta T_M}{T_{M0}} = \frac{l_a / \beta_{01} l_L}{\left(\frac{l_a}{\beta_{01} l_L} + 1\right)^2} \left(\frac{\Delta\beta}{\beta_{01}}\right)^2. \quad (22)$$

Аналогичным разложением в ряд Тейлора функции активных потерь после несложных преобразований получим

$$\frac{\Delta P_p}{P_{p0}} \cong \frac{1,5}{1 + \frac{3}{4} \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \beta_{02}} \left(\frac{\Delta\beta}{\beta_{02}}\right)^2. \quad (23)$$

Отношение $\frac{\kappa_1}{\kappa_2}$ представляет собой отношение активных потерь в лобовых и активных частях при одинаковой ширине проводника. Тогда с учетом (13) и (14) выражение (23) будет иметь вид

$$\frac{\Delta P_p}{P_{p0}} \cong \frac{1,5}{1 + 0,75 \frac{l_L}{l_a} \beta_{02}} \left(\frac{\Delta\beta}{\beta_{02}}\right)^2. \quad (24)$$

Таким образом, при проектировании электродвигателей с печатным дисковым якорем после выбора основных размеров диска в соот-

ветствии с [3] оптимальная ширина активного проводника определяется по (11) и (17). Затем, пользуясь (22) и (24), определяется степень влияния отклонения ширины активного проводника от оптимальной на инерционные и тепловые качества электродвигателя и на основании их сравнения принимается окончательное решение.

В большинстве случаев преимущественное влияние оказывает оптимум по инерционности.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Ратмиров. Электродвигатели с обмотками, выполненными печатным способом. Электропромышленность и приборостроение, № 19, 1960.

2. В. М. Казанский. Некоторые перспективы конструирования силовых электродвигателей постоянного тока с печатными обмотками. Труды НЭТИ, т. III, 1961.

3. Л. Д. Основич. Выбор оптимальных размеров диска в машинах постоянного тока с печатными обмотками. Электромеханика, № 6, 1961.

4. Л. Д. Основич. Элементы расчета двигателя постоянного тока с печатной обмоткой на дисковом якоре. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 1962.

5. В. М. Казанский, Л. Д. Основич, З. А. Основич, А. М. Шор, Н. В. Киншт. Коллекторный двигатель постоянного тока с печатной обмоткой на якоре. Электропромышленность, № 10, 1962.

6. Л. Д. Основич, В. М. Казанский. Потери на вихревые токи в обмотке ротора машины постоянного тока с печатной обмоткой. Электромеханика, № 4, 1963.