

УДК 621.397.6.037.733.2 : 681.84.083.84

И. М. АЛЕКСАНДРОВ

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОБМОТКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ВИДЕОМАГНИТОФОНА

Описывается методика расчета оптимальной геометрии проводников плоской интегральной обмотки электродвигателей постоянного тока, используемых в видеомагнитофонах, позволяющая получить минимальное значение электромеханической постоянной времени при максимальной электромагнитной мощности.

Основные трудности в расчете связаны с определением радиусов внешней лобовой части обмотки при условии полного использования проводника для создания вращающего момента, а также с расчетом координат точек лобовых частей проводников, имеющих эвольвентный профиль.

Предлагаемые в статье графики, построенные при помощи ЭЦВМ, позволяют вести инженерный расчет оптимальной геометрии проводников и координат их лобовых частей, проведенная аппроксимация графической кривой показательной функцией дает возможность применять для расчета ЭЦВМ.

Комплексная миниатюризация — наиболее эффективное направление снижения массы, объема и энергопотребления, а также повышения надежности электронной аппаратуры. Наглядным примером достижений в этом направлении является видеомагнитофон (ВМ) массового применения — новое и перспективное изделие электронной техники. Здесь миниатюризации и переводу на интегральную технологию подверглись не только электронные схемы, но и электропривод.

Развитие микроэлектронной технологии создало предпосылки для качественного скачка микроэлектромашиностроения в части увеличения удельной мощности, срока службы и надежности двигателей и перехода на принципиально новую интегральную технологию производства с использованием точного химического фрезерования, позволяющую полностью механизировать и автоматизировать процессы изготовления многослойных интегральных обмоток роторов.

В отличие от двухслойных печатных обмоток первых электродвигателей, фактически представляющих собой печатную плату с нанесенными с двух сторон проводниками [1—4], многослойные обмотки позволяют лучше использовать рабочий зазор магнитной системы и за счет большего числа витков повысить напряжение на двигателе до величины, приемлемой для аппаратуры видеозаписи.

Перевод ВМ на имеющие значительно меньший момент инерции двигатели постоянного тока с интегральной обмоткой (ДИО), в которые

легко может быть введено внутреннее демпфирование [5, 6], позволяет повысить точность работы системы авторегулирования и тем самым улучшить качество воспроизводимого изображения.

Удельная мощность ДИО во многом определяется геометрическим соотношением размеров проводника обмотки (рис. 1), лобовые части которого имеют эвольвентный профиль [7, 8], а активная часть направлена по радиусу. Поэтому необходимо найти ту оптимальную геометрию, а также сечение проводников, при которых удельная мощность будет максимальной.

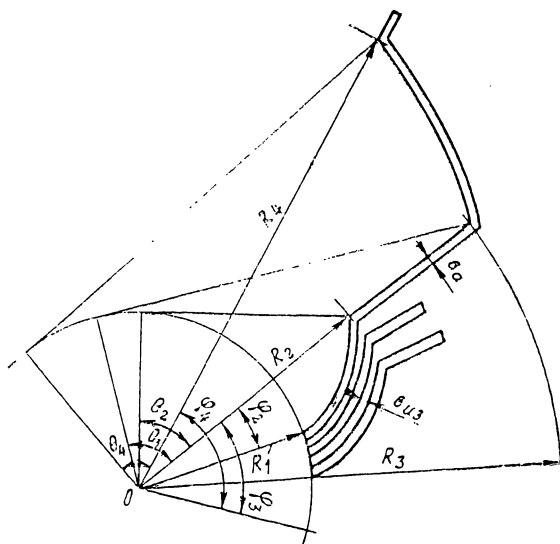


Рис. 1. Геометрия проводника обмотки якоря

Расчет оптимальной геометрии проводника основывается на следующих исходных данных для расчета электродвигателя постоянного тока [9]: P_2 — полезная мощность, Вт; U — напряжение на зажимах, В; n — частота вращения, об/мин; BH — магнитная энергия магнита статора, создающего магнитный поток в машине, Т·А/м.

В работе [10] показано, что максимум электромагнитной мощности P_2 совпадает с минимумом электрохимической постоянной T_m и что условие достижения этого максимума — минимум вихревых и омических потерь в проводниках обмотки. Поэтому ширину проводника b_a предложено рассчитывать, задаваясь плотностью тока в проводнике $j=30 \div 40$ А/мм², по формуле

$$b_a = \sqrt{\frac{I_n \rho}{2fk_\phi B \Delta}}, \quad (1)$$

где I_n — ток в проводнике, А;

ρ — удельное сопротивление, Ом·м;

f — частота вихревых токов, Гц;

k_ϕ — коэффициент формы кривой распределения индукции B вдоль зазора;

Δ — толщина проводника, см².

Площадь полюса статора при полном использовании всей длины проводника, включая его лобовые части (рис. 2), в работе [11] определяется по формуле

$$S_{\Pi} = k_{\Pi} R_1^2. \quad (2)$$

Здесь

$$k_{\Pi} = x_4 (x_4^2 - x_3^2) - \frac{2}{3} (x_4^3 - x_3^3) - (x_4 - x_3) + (x_3^2 + 1) (\arctg x_4 - \arctg x_3) + \\ + \frac{\pi}{2p} (x_3^2 - x_2^2) + \frac{2}{3} x_2^3 - (x_2^2 + 1) \arctg x_2 + x_2, \quad (3)$$

где $x_i = \sqrt{(R_i/R_1)^2 - 1}$;
 R_1, R_2, R_3, R_4 — радиусы опорных окружностей проводников обмотки (см. рис. 1).

Таким образом, имеем два важных отношения для расчета геометрии обмотки якоря.

Предлагаемую в работах [6—8, 10] для расчета сечения печатных проводников плотность тока 30—40 А/мм² невозможно реализовать при полезной мощности менее 100 Вт. Она обеспечивается в двигателях большой мощности (0,5—1 кВт и более), что подтверждают рассчитанные по формуле (1) кривые рис. 3, или в высокоскоростных машинах с частотой вращения ротора более 5000 об/мин. Поэтому плотность тока не может быть использована для определения сечения проводника, а должна находиться в результате расчета.

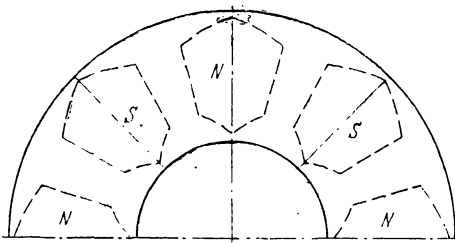


Рис. 2. Форма полюса статора

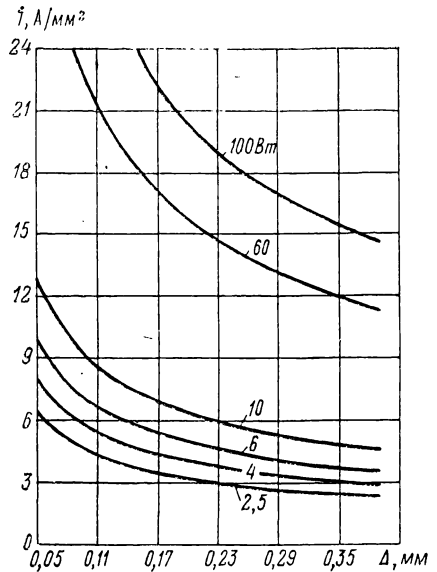


Рис. 3. Зависимость плотности тока от сечения проводника обмотки якоря

Полагая заданной Δ , из (1) определяем ширину проводника, а затем шаг проводника обмотки:

$$t = b_n + b_{из}, \quad (4)$$

где $b_{из}$ — ширина изоляционного промежутка между проводниками, величина которого определяется возможностями техпроцесса.

При использовании способа точного химического фрезерования можно принять $b_{из} \geq 0,15$ мм.

Радиус начальной опорной окружности R_1 находим из выражения

$$R_1 = \frac{N_2 t}{m 2\pi}, \quad (5)$$

где N_2 — число проводников в обмотке;

m — число слоев обмотки.

Угол φ_2 (см. рис. 1) определяется по формуле:

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2p},$$

где $2p$ — число полюсов статора.

Уравнение эвольвенты связывает значение радиуса R_2 с углом φ_2 :

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= \frac{R_1}{\cos \Theta_2}, \\ \varphi_2 &= \text{tg } \Theta_2 - \Theta_2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для ускорения определения R_2 и координат лобовых частей предлагается использовать рассчитанную на ЭЦВМ по (6) зависимость $\varphi_i = f(\cos \Theta_i)$. График зависимости приведен на рис. 4.

Активная часть проводника ($R_3 - R_2$) и его внешняя лобовая часть должны обеспечить совместно с внутренней лобовой частью создание электромагнитного момента при полном использовании площади полюса $S_{\text{п}}$, геометрия образующей которого повторяет форму проводника (см. рис. 2). Исходя из этого условия по заданной индукции B и рассчитанному по (2) и (3) значению $S_{\text{п}}$ [9] необходимо определить радиусы R_3 и R_4 . Но формула (3) непригодна для инженерного расчета, так как два неизвестных R_3 и R_4 входят в нее в третьей, второй и первой степенях.

Известно, что радиусы R_3 и R_4 , как и радиусы R_1 и R_2 , однозначно связаны между собой уравнением эвольвенты (6). Поэтому можно, идя от обратного, т. е. задаваясь реально возможными значениями отношения R_3/R_1 , по (6) вычислить отношение R_4/R_1 , а затем коэффициент $k_{\text{п}}$ из (3). Это и было сделано на ЭЦВМ для значений $2p=4, 6, 8$ и 10 (рис. 5). Зависимости $k_{\text{п}} = f(R_3/R_1)$ и $R_4/R_1 = f(R_3/R_1)$ позволяют оперативно и с необходимой точностью по рассчитанному из (3) $k_{\text{п}}$ определять R_3/R_1 и R_4/R_1 , а затем и сами радиусы R_3 и R_4 :

$$R_3 = (R_3/R_1) R_1; \quad (7)$$

$$R_4 = (R_4/R_1) R_1. \quad (8)$$

Таким образом, задачу нахождения геометрии проводника, использующей полностью площадь полюса, можно считать решенной, так как по предложенным кривым (см. рис. 3 и 4) можно кроме R_2 , R_3 и R_4 определить радиус R_i и φ_i любой точки проводника. (Дальнейший расчет двигателя можно вести по [9].)

Однако для оптимального решения должно быть выполнено требование минимума электромеханической постоянной $T_{\text{м}}$ [10]:

$$T_{\text{м}} = \frac{J r_2}{C^2 \Phi^2} = \min,$$

где J — момент инерции якоря, $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$;
 r_2 — сопротивление обмотки якоря, Ом;
 C_M — постоянная обмотки якоря;
 Φ — магнитный поток, Вб.

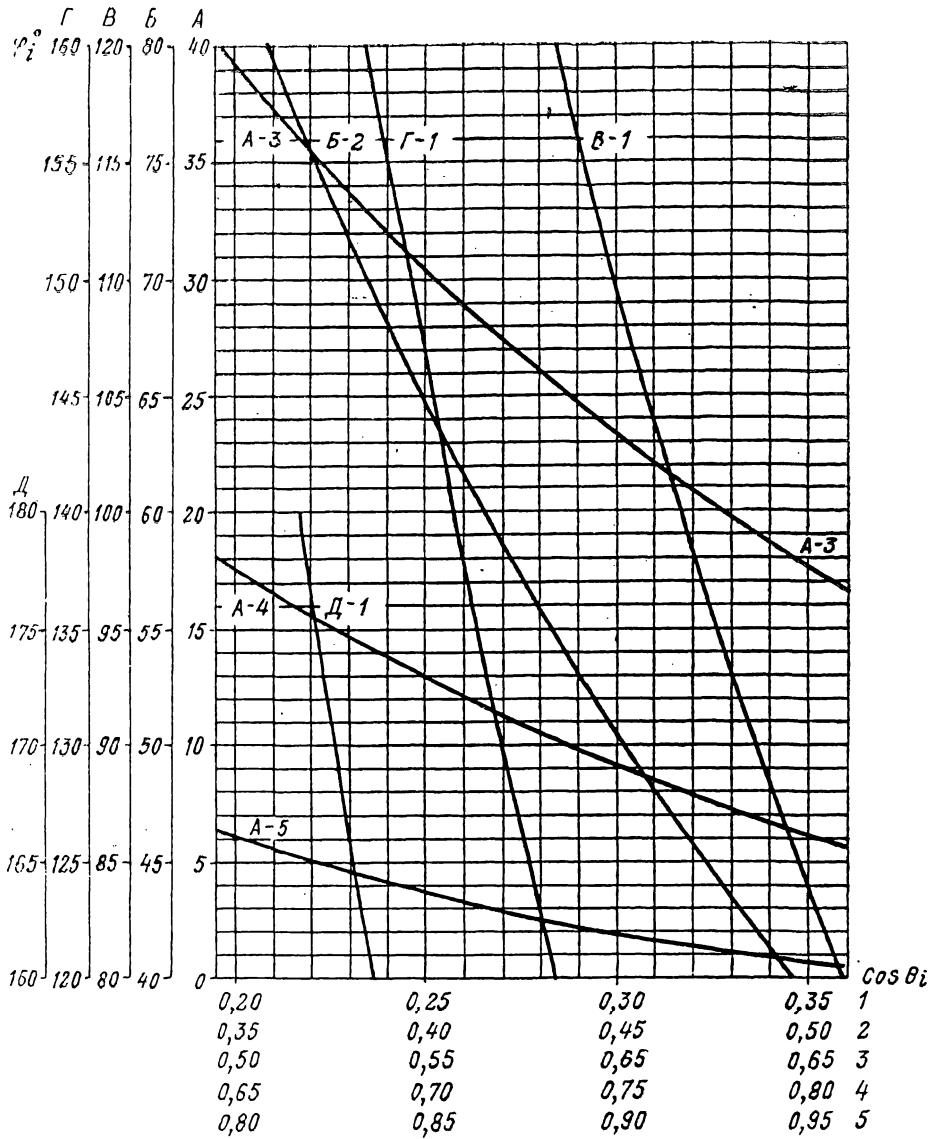


Рис. 4. Зависимость $\varphi_i = f(\cos \theta_i)$ для определения геометрии частей проводника обмотки якоря

Методом постепенных приближений, задаваясь определенными значениями Δ , находим значения $T_m = \min$. Чтобы ускорить процесс вычисления, предлагается использовать ЭЦВМ, для чего необходимо зависи-

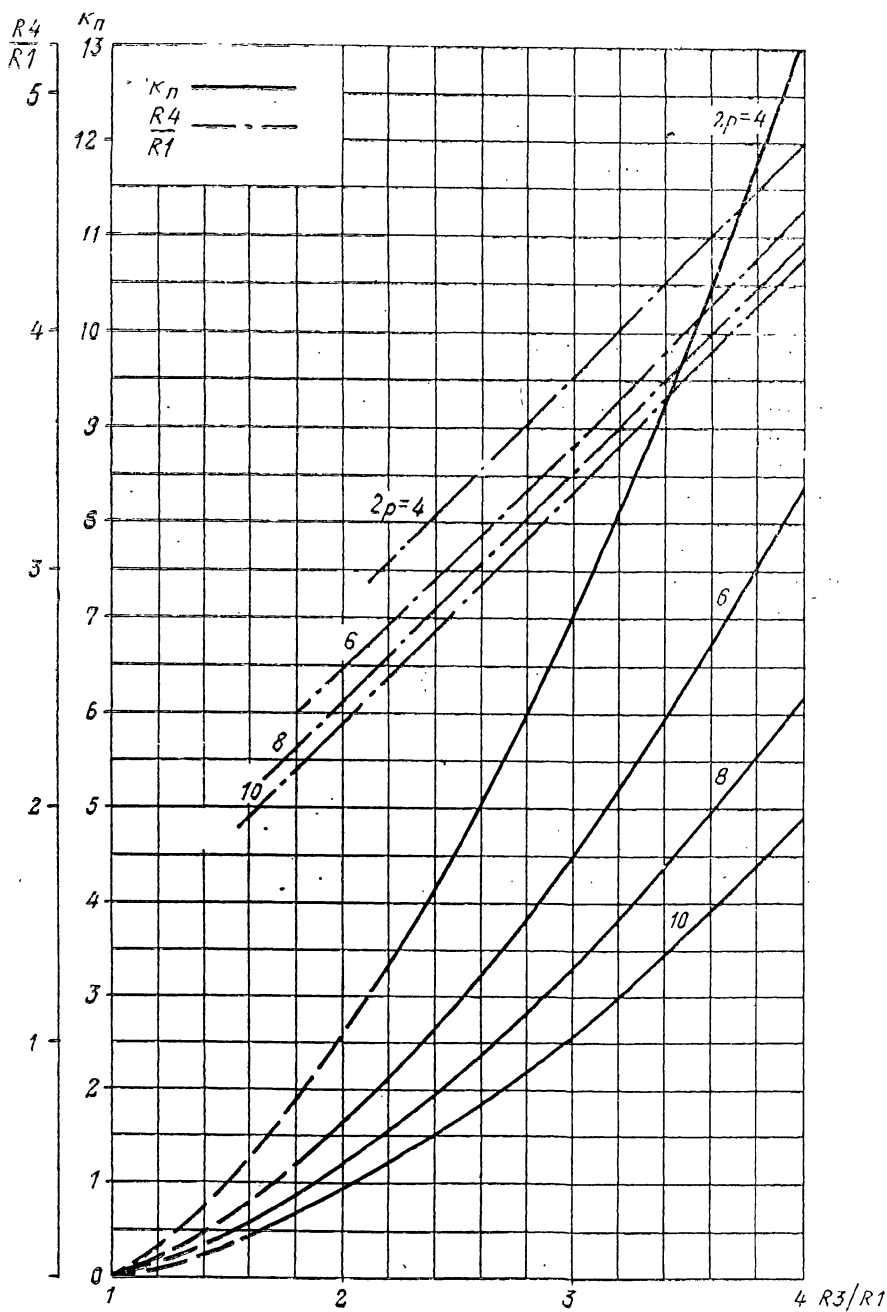


Рис. 5. Зависимости $k_n = f(R_3/R_1)$ и $R_4/R_1 = f(R_3/R_1)$ для расчета радиусов R_3 и R_4 проводника обмотки якоря

мость $k_n = f(R_3/R_1)$ преобразовать в функцию $R_3/R_1 = f(k_n)$. Кривые на рис. 5 с погрешностью не хуже 2% аппроксимируются показательной функцией вида

$$(R_3/R_1) = Ak_n^{0.7} + 1, \quad (9)$$

где коэффициент A имеет разные значения для каждого $2p$:

$2p$	A
6	0,71
8	0,88
10	1,04

Таким образом, заложив в программу ЭЦВМ требование $T_m = \min$, можно по предложенной методике с использованием формулы (9) вычислить оптимальную геометрию обмотки интегрального якоря в каждом конкретном случае.

Вычисление координат точек лобовых частей проводника для построения фотооригинала можно производить по кривой рис. 4 с последующим их переводом в прямоугольную систему координат, используемую в координатографах.

Итак, при известных [9] P_2 , n , U , $2p$ и Φ определяем I_n и S_n , а затем число проводников:

$$N_2 = \frac{\pi P_2 10^6}{0,105 n p I_n \Phi}.$$

Далее, задаваясь последовательно разными значениями Δ , для каждого из них находим: из (1) — b_a , из (4) — t , из (5) — R_1 и из (2) — k_n . По кривым рис. 5 определяем отношения R_3/R_1 и R_4/R_1 , а из выражений (7) и (8) — радиусы R_3 и R_4 . Таким образом, все характерные координаты проводника известны. После расчета по [9] электромеханической постоянной T_m за оптимальный принимается вариант с $T_m = \min$.

В случае применения ЭЦВМ вместо кривых рис. 5 при расчете используется выражение (9).

ВЫВОДЫ

1. Предложенные зависимости и их графики позволяют вести инженерный расчет оптимальной геометрии интегральной обмотки якоря.

2. Аппроксимация графика $k_n = f(R_3/R_1)$ аналитической функцией делает возможным применение при расчете геометрии проводника обмотки ЭЦВМ.

3. Зависимость $\varphi_i = f(\cos \theta_i)$ упрощает расчет координат лобовых частей проводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raimond F. Machines électriques tournantes perfectionnées. — Пат. Франции № 1160490, кл. H 02k, заявл. 7.XI.1956, опубл. 16.VII.1958.
2. Машинны электрические с печатным якорем. Конструирование и технология изготовления торцовых печатных якорей. ОСТ 16.684.007—71.
3. Мере В. Я. Способ изготовления двухслойных печатных обмоток электротехнических машин. Авт. свид. СССР № 174700 (894133/24—7), кл. H 02k; 21d', 51, заявл. 10.IV.1964, опубл. в БИ, 1965, № 18.

4. Выгорницкая Т. Г. и др. Нанесение толстых медных покрытий при изготовлении печатных обмоток электродвигателей. — «Технология электротехнического производства», 1973, вып. 8—9, с. 22—24.
5. Казанский В. М., Основич Л. Д. Малонерционные электродвигатели постоянного тока с печатной обмоткой на якоре. М.—Л., «Энергия», 1965. 95 с.
6. Fan Use Ferrite Type Print Motor. Каталог фирмы Yasukawa Electric (Япония). Б. м., б. г.
7. Таел В. О. О геометрии ротора с печатной обмоткой в электрических машинах. — «Изв. АН ЭССР», 1961, т. 10, № 3, с. 224—232.
8. Пашков В. И. Расчет двигателя постоянного тока торцового типа с печатной обмоткой якоря. — «Электротехническая промышленность», 1962, № 11, с. 15—21.
9. Ермолин Н. П. Расчет коллекторных машин малой мощности. Л., «Энергия», 1973. 214 с.
10. Карпенко Б. К. Геометрия якоря с печатной обмоткой. — «Электричество», 1970, № 12, с. 46—51.
11. Сийтан У. Х. О зависимости электромагнитной мощности электродвигателя постоянного тока с дисковым якорем от геометрии элементов печатной обмотки якоря. — «Электричество», 1965, № 7, с. 80—83.

Поступила 4/VI 1976 г.