

Баранов Павел Рудольфович

Pavel R. Baranov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

National Research Tomsk Polytechnic University

Доцент кафедры «Электромеханические комплексы и материалы»

Associate Professor of department “Electromechanical systems and materials”

Кандидат технических наук/Доцент

E-Mail: baranovp@tpu.ru

Попов Владислав Юрьевич

Vladislav U. Popov

Магистрант гр. 5AM1Ж Национального исследовательского

Томского политехнического университета

Master student g. 5AM1Ž National Research Tomsk Polytechnic University

E-Mail: popovvy1990@gmail.com

Электрические машины и аппараты

Новые конструкторские решения при создании электромагнитного привода тормозного устройства электродвигателей

New constructions of the electromagnetic drive for electric motors brake mechanism

Аннотация: Проведен анализ конструкции встроенного электромагнитного привода механического тормоза электродвигателей. Учитывая особенности конструкции растормаживающих электромагнитов, предложены новые технические решения, позволяющие повысить использование материала обмоточного провода за счет применения двух секций обмотки с разными сечениями проводников. Такая конструкция позволяет снизить габариты и массу обмотки по двум вариантам: уменьшение осевых габаритов; уменьшение радиальных габаритов. Показано, что наибольший эффект снижения массы и габаритов обеспечивает второй вариант. Получены аналитические выражения, позволяющие перейти от известной конструкции к секционированной. Эффективность такого перехода зависит от отношения внутреннего диаметра катушки исходной конструкции к наружному и может быть оценена по приведенным формулам. Приведены результаты эксперимента, подтверждающие теоретические исследования.

The Abstract: The design of the built-in electromagnetic drive of a mechanical brake of electric motors is analyzed. Taking into account an electromagnet design feature, the new technical solutions allowing to increase efficiency of a winding wire material use because of application of two sections of a winding with different conductor areas are suggested. Such design allows to lower dimensions and mass of a winding by means of two ways: reduction of axial dimensions and reduction of radial dimensions. It is shown that the second variant provides the greatest effect of decrease in weight and dimensions. The analytical expressions allowing to transfer from a known design to the partitioned design are obtained. Efficiency of such transformation depends on the relation of coil internal diameter to external diameter and can be estimated on the given formulas. The results of experiment confirming theoretical researches are given.

Ключевые слова: электромагнитный привод, тормоз, электродвигатели с тормозными устройствами, секция катушки.

Keywords: Electromagnetic Drive, Brake, Electric Motors with Brake Mechanisms, Coil Section.

Электродвигатели со встроенными дисковыми тормозными устройствами являются наиболее сложными и дорогостоящими модификациями основного исполнения серии электродвигателей [1,2]. При конструировании электромагнитного привода тормоза следует учитывать возможности максимального уменьшения материалоемкости и габаритов без ущерба его прочности и надежности при эксплуатации за счет дальнейшего усовершенствования активной части электромагнита. К этому относится повышение использования стали и обмоточных проводов. В этом вопросе могут возникнуть противоречия между требованиями конструкции и технологии. Тогда либо принимается окончательное решение на основе технико-экономических соображений, либо ведутся дальнейшие поиски в области технологии.

Задача настоящей работы – разработка новых конструкторских решений, позволяющих повысить использование активных материалов, т.е. снизить расход обмоточного провода, понизить габариты и массу электромагнитного привода.

Конструкция растормаживающего электромагнита имеет особенности, обусловленные требованиями конструкции базового электродвигателя. Форма электромагнита цилиндрическая (рис. 1), а по условиям охлаждения осевую длину растормаживающие электромагниты $h_{эм}$ стремятся проектировать как можно меньшей величины, чтобы не отодвигать далеко вентилятор от охлаждаемой поверхности станины электродвигателя. В радиальном направлении размеры электромагнита значительны и ограничены лишь габаритами электродвигателя [2,3,4]. То есть для данного типа электромагнита не всегда приемлемы рекомендации из области проектирования электромагнитов электрических аппаратов об оптимальном соотношении ширины и высоты устройства [5 и др.].

Рассмотрим конструкцию однообмоточного растормаживающего электромагнита (рис.1). В этом электромагните обмотка выполнена обмоточным проводом одинакового сечения, плотность тока во всех радиальных слоях обмотки оказывается одинаковой. Известно, что степень использования материала обмоточного провода более высока в таких электромагнитных устройствах, в которых отношение плотностей тока радиальных слоев обмотки равно обратному отношению длин средних витков [6]. Следовательно, степень использования обмоточного провода в катушке по рис. 1 относительно низка.

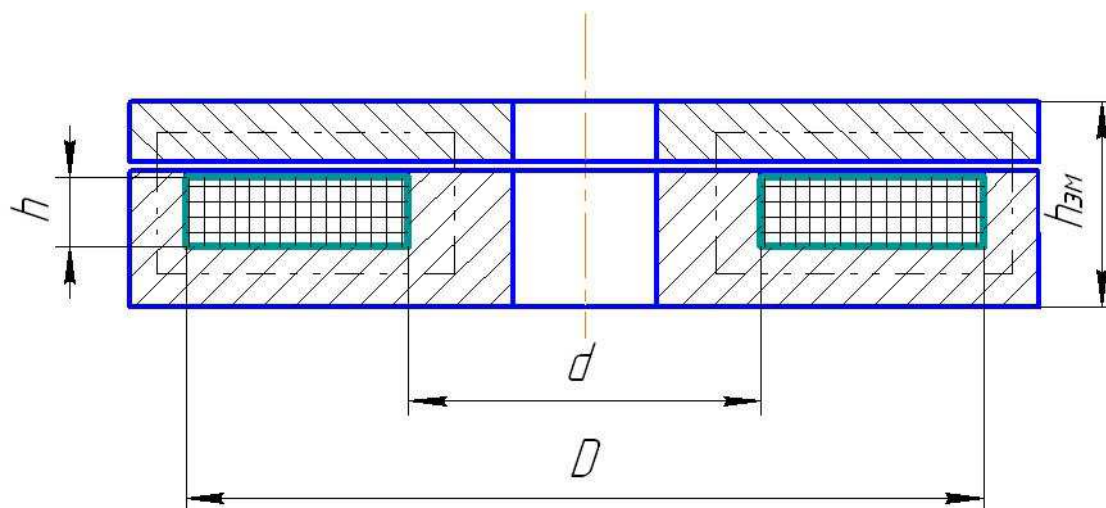


Рис. 1. Эскиз растормаживающего электромагнита

Если предположить, что в катушке каждый радиальный слой выполнен проводом различного сечения, а отношение плотности тока к длине витка во всех радиальных слоях одинаково, то такая катушка будет иметь степень использования обмоточного провода более высокую, чем катушка по рис. 1. Тогда катушку с указанным неоднородным распределением

плотностей тока в радиальных слоях можно выполнить в меньших габаритах, чем катушку с одинаковыми плотностями тока в этих слоях. Однако требования технологичности обуславливают необходимость сокращения номенклатуры используемых обмоточных проводов. Тогда воспользуемся компромиссным решением, сведем число проводов с различным сечением к двум и повысим степень использования обмоточного провода.

На рис. 2 представлена конструкция электромагнита в соответствии с предложенным техническим решением. Катушка электромагнита состоит из двух секций, намотанных проводом различного сечения.

Для оценки эффективности использования секционированной конструкции катушки электромагнита в процессе проектирования возникает необходимость количественного сравнения массы и габаритов двух конструкций по рис. 1 и рис.2. При сравнении используем следующие известные допущения [7 и др.]: коэффициенты заполнения обмоток одинаковы, а толщины изоляции между секциями пренебрежимо малы.

Сравнение проведем при условии равенства магнитодвижущих сил (далее МДС) и потребляемой мощности электромагнитов. Принимаем также, что катушка электромагнита по рис. 2 состоит из двух секций с одинаковыми сопротивлениями и числом витков.

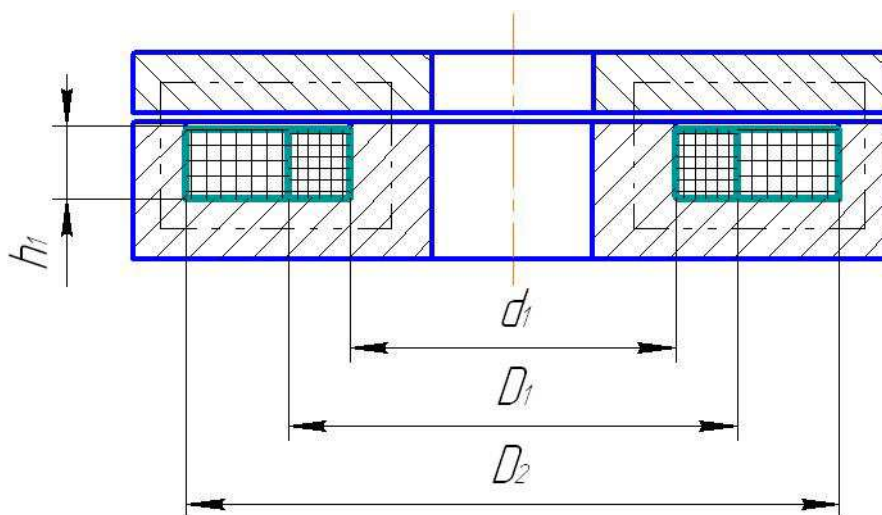


Рис. 2. Эскиз секционированного растормаживающего электромагнита

Тогда должны выполняться следующие равенства:

$$s_1/l_1 = s_2/l_2 = s/l ; w_1 = w_2 = w/2 ; R_1 = R_2 = R/2 , \quad (1)$$

где индекс «1» относится к параметрам внутренней (меньшей) секции; индекс «2» - к наружной, а обозначения без индекса относятся к параметрам исходной конструкции (рис. 1).

Рассмотрим первый вариант перехода от исходной конструкции по рис. 1 к секционированной конструкции (рис. 2).

Важным показателем растормаживающего электромагнита является осевая длина, которая влияет на габариты и эффективность охлаждения спроектированного электродвигателя с тормозным устройством. Поэтому сравним конструкции по рис. 1 и рис. 2 по осевой длине катушки при условии равенства радиальных габаритов катушки (обозначения геометрических размеров соответствуют указанным рисункам):

$$d_1 = d ; D_2 = D . \quad (2)$$

Выразим параметры секционированного электромагнита через исходный. Тогда из условий (1) и (2) можно записать:

$$s_1 = s \cdot l_1/l = s \cdot (D_1 + d)/(D + d); \quad (3)$$

$$s_2 = s \cdot l_2/l = s \cdot (D_1 + D)/(D + d). \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) неизвестной величиной является наружный диаметр малой секции D_1 . Получим эту величину из условия равенства осевой длины секций:

$$w_1 s_1 / (D_1 - d) = w_2 s_2 / (D - D_1). \quad (5)$$

С учетом (1), (3) и (4), из выражения (5) после преобразований получим:

$$D_1 = \sqrt{D \cdot d}. \quad (6)$$

Отношение осевых длин катушек сравниваемых конструкций можно выразить через обмоточные параметры:

$$\frac{h_1}{h} = \frac{w_1 s_1 + w_2 s_2}{ws} \quad (7)$$

Преобразуя (7) с учетом (1), (3), (4) и (6), можно получить:

$$\frac{h_1}{h} = \frac{d + 2\sqrt{D \cdot d} + D}{2(D + d)}. \quad (8)$$

Обозначив отношение диаметров через

$$\alpha = D/d \quad (9)$$

выражение (8) приведем к виду:

$$\frac{h_1}{h} = \frac{(1 + \sqrt{\alpha})^2}{2(1 + \alpha)}. \quad (10)$$

Согласно (9) эффект уменьшения осевой длины растормаживающего электромагнита при использовании секционированной конструкции катушки (рис. 2) зависит от отношения наружного диаметра катушки к внутреннему. Количественную же оценку эффекта от величины α иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1

$\alpha = D/d$	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0
h_1/h	0,99	0,97	0,93	0,9	0,87	0,78

Можно показать, что если α стремится к бесконечности, то отношение h_1/h –стремится к цифре 0,5. Предельный эффект от применения секционированного электромагнита с двумя секциями следующий: новая конструкция позволяет сократить осевую длину катушки в два раза.

Отметим, что выражение (10) пригодно также и для анализа эффекта снижения массы обмоточного провода по первому варианту.

Рассмотрим второй вариант перехода к секционированной конструкции. Проведем сравнение в общем виде масс обмоточного провода исходной конструкции к секционированной при условии равенства осевой высоты намотки и внутренних диаметров электромагнитов:

$$h_1 = h ; d_1 = d. \quad (11)$$

Тогда выражение (4) для сечения провода наружной секции перепишем следующим образом:

$$s_2 = s \frac{D_1 + D_2}{D + d} . \quad (12)$$

Выразим указанные диаметры через параметры исходной конструкции. Согласно условиям (11) можно записать:

$$\frac{w_1 s_1}{(D - d)/2} = \frac{ws}{(D - d)/2} . \quad (13)$$

Подставим соответствующие величины из формул (1) и (3) в (13), получим выражение, пригодное для определения наружного диаметра малой секции:

$$D_1 = d \frac{d + 3D}{3d + D} . \quad (14)$$

С учетом (9) выражение (14) преобразуем к виду:

$$D_1 = d \frac{1 + 3\alpha}{3 + \alpha} . \quad (15)$$

Аналогично можно получить выражение для наружного диаметра большой секции. Окончательный вид его:

$$D_2 = d \cdot \left(\frac{1 + 3\alpha}{3 + \alpha} \right)^2 . \quad (16)$$

Отношение масс обмоточных проводов сравниваемых конструкций выразим через обмоточные параметры электромагнитов:

$$\frac{m_1}{m} = \frac{w_1 s_1 l_1 + w_2 s_2 l_2}{wsl} . \quad (17)$$

Преобразуем выражение (17). Согласно (1), (3) и (12) оно примет вид:

$$\frac{m_1}{m} = \frac{(D_1 + d)^2 + (D_2 + D_1)^2}{2(D + d)^2} . \quad (18)$$

Учитывая (9), (15) и (16), выражение (18) после некоторых преобразований принимает вид:

$$\frac{m_1}{m} = \frac{8}{(3 + \alpha)^2} \left[1 + \frac{(1 + 3\alpha)^2}{(3 + \alpha)^2} \right] . \quad (19)$$

Как видно из (18), эффект снижения массы от использования секционированной конструкции по варианту 2 также зависит от соотношения радиальных габаритных размеров исходной конструкции.

Для иллюстрации в таблице 2 приведены значения m_1/m , найденные при различных значениях α по формуле (19).

Таблица 2

$\alpha = D/d$	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0
m_1/m	0,98	0,95	0,84	0,73	0,63	0,32

Сопоставив данные таблиц 1 и 2, можно установить, что эффективность переходов к секционированной конструкции растормаживающего электромагнита возрастает с увеличением разницы радиальных габаритов исходной конструкции. Причем переход к

секционированной конструкции по варианту 2, с точки зрения уменьшения массы, более эффективен, чем по варианту 1. Если α стремится к бесконечности, то в варианте 2 m_1/m стремится к нулю (т.е. $m_1 \rightarrow 0$).

Используя эту методику, можно также осуществить переход исходной однообмоточной конструкции к концентрической секционированной при условии равенства наружных диаметров катушки.

При опытной проверке полученных теоретических результатов в качестве исходной использовалась катушка (рис. 1), содержащая 500 витков (50 витков по 18 проводников в слое), выполненных проводом ПЭТВ-2 сечением $s = 0,466 \text{ мм}^2$, имеющая следующие приближенные значения геометрических размеров: $h = 16 \text{ мм}$; $d = 21,5 \text{ мм}$; $D = 107,5 \text{ мм}$. Опытное значение сопротивления этой катушки $R = 6,75 \text{ Ом}$.

Для оценки практической эффективности перехода к концентрическому размещению секций с точки зрения уменьшения радиальных габаритов была спроектирована по варианту 2 и изготовлена катушка с двумя последовательно и согласно соединенными концентрическими секциями, содержащими 450 витков. Внутренняя секция содержит 18 слоев по 25 проводников в слое, она выполнена ПЭТВ-2 сечением $s_1 = 0,238 \text{ мм}^2$. Наружная секция содержит 25 радиальных слоев по 18 проводников в слое, она выполнена тем же проводом, что и исходная катушка. Приближенное значение геометрических размеров катушки с двумя секциями (рис. 2): $h = 16 \text{ мм}$; $d = 21,5 \text{ мм}$; $D_1 = 44,5 \text{ мм}$; $D_2 = 87,5 \text{ мм}$. Опытное значение сопротивления этой катушки равно 6,4 мм.

Сопоставление приведенных опытных данных показало, что при практически одинаковых МДС и мощностях переход к секционированной конструкции позволил уменьшить радиальные габариты почти на 20 %, сократить расход обмоточного провода на 35 % (расчетное значение по табл. 2 – 37 % при $\alpha = 5$).

Следует также отметить, что при переходе к секционированной конструкции катушки появляется возможность сократить осевые габариты растормаживающего электромагнита также за счет рациональной конструкции магнитопровода.

На рис. 3 приведена конструкция электромагнита с тремя полюсными наконечниками. Если обмоточные параметры секций удовлетворяют условию (1), то объем обмоточного провода в этой конструкции окажется меньше, чем в традиционной по рис. 1. Кроме того, наличие трех полюсных наконечников обуславливает прохождение по спинке ярма магнитопровода в два раза меньшего значения основного магнитного потока, чем в исходной конструкции при одинаковых противодействующих усилиях. Следовательно, при одинаковой степени насыщения стали магнитной системы толщину якоря и спинки магнитопровода можно проектировать в два раза меньшей, чем в исходной конструкции, а значит, сократить осевые габариты электромагнита и габариты тормозного электродвигателя.

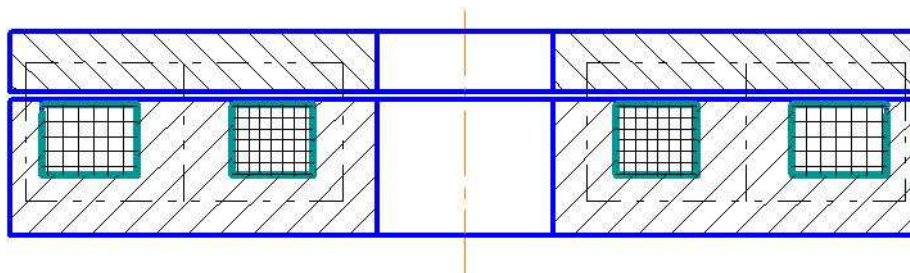


Рис. 3. Эскиз растормаживающего электромагнита с тремя полюсными наконечниками

Есть еще одно преимущество конструкции электромагнита по рис. 3. Размещение на среднем полюсном концевике направляющих якорь штифтов позволяет исключить действие радиальной составляющей тягового усилия электромагнита на них в процессе срабатывания, а значит, обеспечивает уменьшенный износ трущихся поверхностей по сравнению с конструкцией по рис. 1.

Выводы

1. Разработанная конструкция растормаживающих электромагнитов позволяет сократить габариты и уменьшить массу активных материалов за счет повышения степени использования обмоточного провода.

2. Получены аналитические выражения для расчета параметров катушки при переходе от известной конструкции электромагнита к предложенной секционированной. Эффективность такого перехода зависит от отношения внутреннего диаметра катушки исходной конструкции к наружному и может быть оценена по приведенным формулам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро //Радин В.И., Лондин Й. , Розенкноп В.Д. и др.; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

2. Гусельников Э.М., Цукерман Б.С. Самотормозящие электродвигатели. - М.: Энергия, 1971.- 96 с.

3. Алиханян К.А. Проектирование асинхронных двигателей со встроенным электромагнитным тормозом // Электротехника. – 1984.- № 7. – С. 55-56.

4. Соленков В.В., Гринберг В.С., Гусельников Э.М. Расчет электромагнита с форсировкой для электродвигателей со встроенным тормозом //Электрооборудование автоматизированных установок. – Томск: Изд-во ТГУ, 1980. – С. 59-63.

5. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. - М.: Энергия, 1972.- 247 с.

6. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. - М.: Наука, 1969. – 347 с.

7. Баранов П.Р., Гринберг В.С. Выбор схемы включения двухобмоточного электромагнита // Электричество. – 1986. - № 4. – С. 47-49.

Рецензент: Качин Сергей Ильич, доктор технических наук, профессор, директор Института дистанционного обучения Национального исследовательского Томского политехнического университета