

В.Д. КОСЕНКОВ

Хмельницкий национальный университет

Д.А. ИВЛЕВ, А.В. ЯКОВЛЕВ

Одесский национальный политехнический университет

ОГРАНИЧЕНИЕ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИНДУКТОРНОГО ТИПА

Рассмотрены результаты расчета магнитного поля машины постоянного тока индукторного типа методом конечных элементов. Показано, что благодаря новым конструктивным решениям в такой электрической машине значительно возрастает перегрузочная способность по току и улучшается ряд удельных показателей.

Ключевые слова: реакция якоря, машина постоянного тока, метод конечных элементов, магнитное поле.

V.D. KOSENKOV

Khmelnytsky National University

D.A. IVLIEV, O.V. YAKOVLEV

Odessa National Polytechnic University

LIMITING ARMATURE REACTION IN DIRECT-CURRENT MOTOR INDUCTOR-TYPE.

The results of the calculation of magnetic field of direct-current motor inductor-type by the finite elements method were considered. It is shown that because of the new constructive solutions in such electrical machine the current capacity is significantly increased and the number of specific indicators are improved.

Keywords: armature reaction, direct-current motor, finite elements method, magnetic field.

Постановка проблемы

Как известно, уменьшить реакцию якоря в машине постоянного тока (МПТ) можно двумя способами: увеличив воздушный зазор на пути потока реакции якоря либо создав дополнительную МДС, направленную встречно МДС реакции якоря.

Наибольший интерес в плане повышения эффективности и КПД машины постоянного тока вызывает первый способ, связанный с отказом от компенсационной обмотки. В качестве примера такого подхода можно рассмотреть тяговый двигатель с беспазовым якорем. Размещение обмотки не в пазах, а на цилиндрической поверхности якоря позволяет создать в таком двигателе большой воздушный зазор (немагнитный слой) и отказаться от компенсационной обмотки, обеспечив при этом высокую перегрузочную способность. Однако наличие большого немагнитного слоя приводит к необходимости в 1,3-1,4 раза увеличить МДС обмотки возбуждения. Кроме этого, в меди якоря возникают повышенные потери от вихревых токов, существенно увеличивая ее температуру[1].

В машине постоянного тока индукторного типа (МПТИТ) большой немагнитный слой создается за счет открытых с обеих сторон пазов статора. Такое конструктивное решение позволяет существенно ослабить поле поперечной реакции якоря путем снижения магнитной проводимости в поперечном направлении, не прибегая к увеличению величины рабочего воздушного зазора.

Магнитная система МПТИТ (рис.1) не имеет общего ярма и состоит из ряда магнитно-несвязанных зубцов Ш-образной формы 1, между которыми уложены секции обмотки якоря 2, обмоток возбуждения 3 и полюсов 4 [2].

Работает МПТИТ следующим образом: при подаче напряжения на тороидальные обмотки возбуждения 3 взаимодействием основных встречно-параллельных магнитных потоков Φ_1 , Φ_2 и токов проводников секций обмотки якоря 2, находящихся в зоне действия полюсов 4 цилиндрического ротора, создается электромагнитный момент $M_{эм}$, под действием которого ротор приходит во вращение.

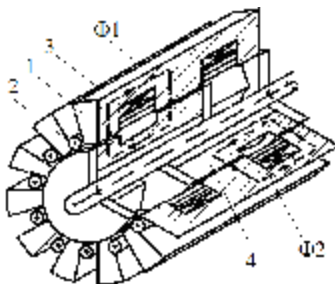


Рис. 1. Машина постоянного тока индукторного типа

Задачей исследования является анализ поля реакции якоря в МПТИТ.

Основные результаты

В МПТИТ (рис.2) зубец одновременно выполняет роль стенки паза высотой h_n и ярма высотой ℓ_2 , при этом паз электрической машины открыт с обеих сторон. Рассмотрим, как влияет на МДС реакции якоря такая конструкция паза.

Запишем закон полного тока для данного паза при $x > h_n$

$$2 \cdot H_d \cdot d + H_{nm} \cdot b_n = I_n, \quad (1)$$

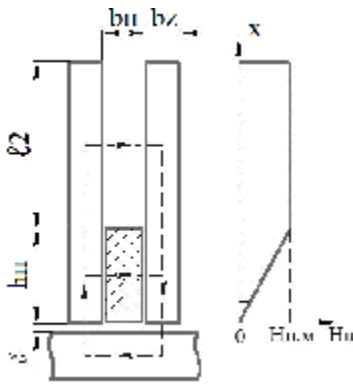


Рис. 2. Паз МПТИТ

где H_δ – напряженность поля в рабочем воздушном зазоре;
 δ – воздушный зазор;
 H_{nm} – максимальное значение напряженности поля в пазу;
 b_n – ширина паза.
 Величина напряженности поля в рабочем воздушном зазоре определяется потоком Φ_1 на участке $x = 0 \dots h_n$ и потоком Φ_2 на участке $h_n \dots (h_n + l_2)$

$$\Phi_1 = m_0 \cdot \frac{H_{nm}}{2} \cdot h_n \cdot l_d,$$

$$\Phi_2 = m_0 \cdot H_{nm} \cdot l_2 \cdot l_d.$$

Тогда результирующий магнитный поток в рабочем воздушном зазоре будет

$$\Phi_d = \Phi_1 + \Phi_2 = m_0 \cdot H_{nm} \cdot l_d \cdot \left(\frac{h_n}{2} + l_2 \right).$$

Напряженность поля в рабочем воздушном зазоре

$$H_d = \frac{\Phi_d}{m_0 \cdot S_d} = \frac{\Phi_d}{m_0 \cdot b_z \cdot l_d} = H_{nm} \cdot \left(\frac{h_n}{2 \cdot b_z} + \frac{l_2}{b_z} \right)$$

Отсюда максимальное значение напряженности поля в пазу

$$H_{nm} = \frac{H_d}{\left(\frac{h_n}{2 \cdot b_z} + \frac{l_2}{b_z} \right)} \tag{2}$$

Подставляя выражение (1) в (2) получим

$$2 \cdot H_d \cdot d + H_d \cdot \frac{b_n}{\left(\frac{h_n}{2 \cdot b_z} + \frac{l_2}{b_z} \right)} = I_n$$

Окончательно определим напряженность поля в рабочем воздушном зазоре

$$H_d = \frac{I_n}{2 \cdot d + \frac{b_n}{\left(\frac{h_n}{2 \cdot b_z} + \frac{l_2}{b_z} \right)}} = \frac{I_n}{2 \cdot d \cdot \left(1 + \frac{b_n}{2 \cdot d \cdot \left(\frac{h_n}{2 \cdot b_z} + \frac{l_2}{b_z} \right)} \right)} = \frac{I_n}{2 \cdot d \cdot K}$$

где $K = 1 + \frac{b_n}{2 \cdot d \cdot \left(\frac{h_n}{2 \cdot b_z} + \frac{l_2}{b_z} \right)}$ коэффициент уменьшения

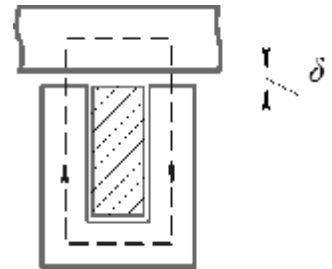


Рис. 3. Паз, открытый с одной стороны

напряженности поля.

Сравним паз, открытый с одной стороны (рис. 3), и паз, открытый с обеих сторон (Рис. 2), при условии одинаковой величины рабочего зазора и тока паза.

У обычной МПТ $H_d = \frac{I_n}{2 \cdot d}$, у МПТИТ $H_d = \frac{I_n}{2 \cdot d \cdot K}$

если условно принять $\delta = 2$ мм, $b_n = b_z = 3$ см, $h_n = 10$ см, $l_2 = 40$ см

то
$$K = 1 + \frac{0,03}{2 \cdot 0,002 \cdot \left(\frac{0,1}{2 \cdot 0,03} + \frac{0,4}{0,03} \right)} = 1,5.$$

Таким образом, величина напряженности поля в рабочем воздушном зазоре стала в 1,5 раза меньше, чем у обычной МПТ. Если в рассмотренном примере уменьшить величину воздушного зазора МПТИТ до 1мм, мы получим равные значения H_δ мптит = H_{δ} мпт, но при этом МДС обмотки возбуждения МПТИТ станет в два раза меньше.

На (рис.4 а, б, с) представлена геометрия (а) и распределение магнитного потока реакции якоря

МПТИТ без общего ярма (б) и МПТ с общим ярмом (с) для привода нереверсивного прокатного стана $P_n = 6000$ кВт, $U_n = 825$ В, $n_n = 200$ об/мин, выбраного в качестве аналога [3].

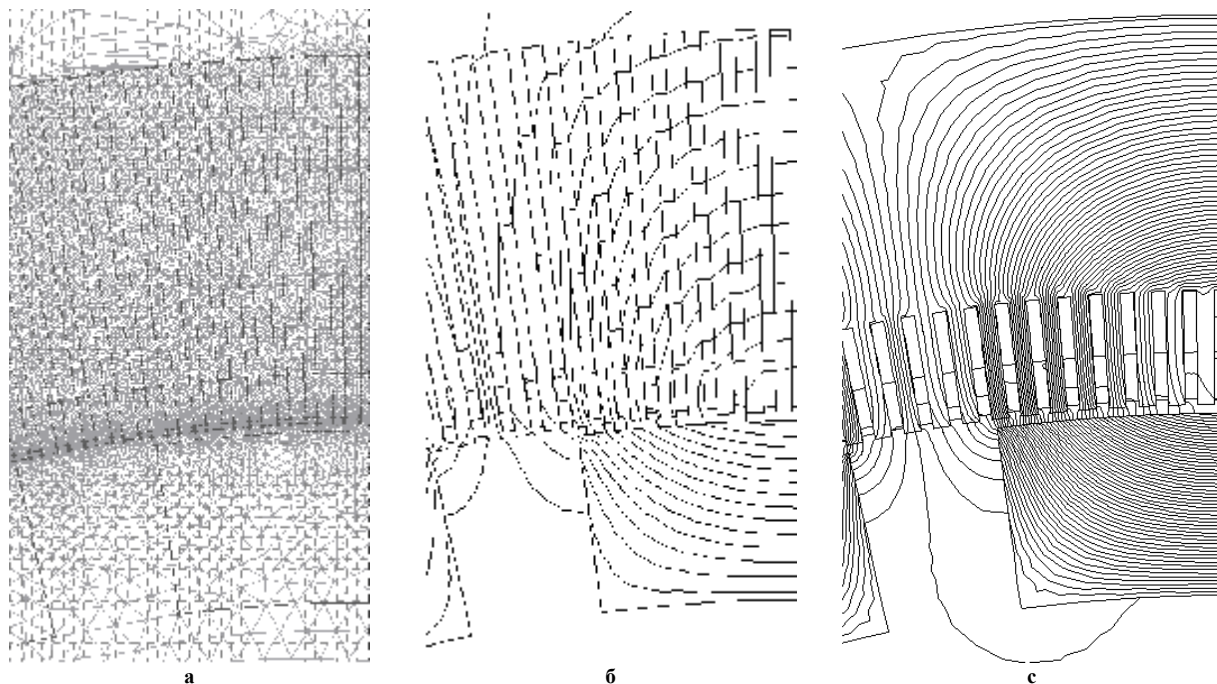


Рис. 4 – Распределение магнитного потока реакции ярка:
а- геометрия; б – МПТИТ; в – МПТ с общим ярмом

Задача рассматривалась как магнитостатическая. В этом случае для напряженности магнитного поля H , магнитной индукции B и плотности тока J справедливы соотношения

$$\nabla \cdot H = J, \tag{3}$$

$$\nabla \cdot B = 0, \tag{4}$$

к которым нужно добавить уравнение связи

$$B = m \cdot H, \tag{5}$$

где для нелинейного материала магнитная проницаемость μ является функцией B

$$\mu = \frac{B}{H(B)}, \tag{6}$$

Векторный потенциал A вводится как функция, удовлетворяющая уравнению

$$B = \nabla \cdot A, \tag{7}$$

При таком определении магнитная индукция B всегда удовлетворяет уравнению (4), а уравнение (3) с учетом (5) – (7) можно записать в виде

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{m} \cdot \nabla \cdot A \right) = J \tag{8}$$

Численный расчет магнитного поля сводится к нахождению распределения векторного потенциала A , которое удовлетворяет уравнениям (3)–(8). В общем случае A представляет собой трехкомпонентный вектор. Однако, если задача может рассматриваться как плоскопараллельная в плоскости x, y , то две из его компонент – A_x и A_y обращаются в нуль и остается только одна компонента A_z , направленная перпендикулярно плоскости x, y . При этом любые граничные условия также должны задаваться относительно векторного потенциала A . Для решения данной задачи использовалась программа ELCUT версии 4.1., которая осуществляет расчет магнитного поля в плоскопараллельной области по уравнениям (3)–(8) методом конечных элементов.

На рис. 5 показаны кривые распределения индукции поля реакции ярка МПТИТ и МПТ с общим ярмом.

Эти кривые практически совпадают при двукратной перегрузке по току у МПТ с общим ярмом и пятикратной у МПТИТ (рис.6) .

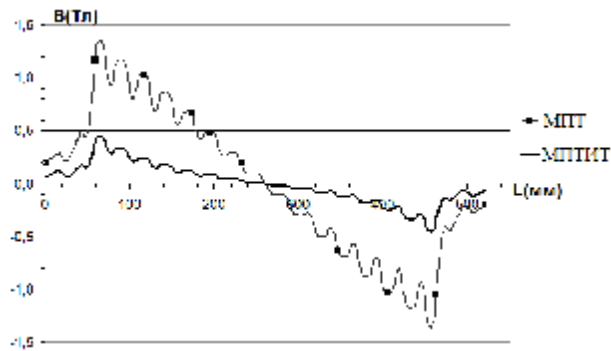


Рис. 5. Кривые распределения индукции поля реакции якоря МПТИТ и МПТ с общим ярмом

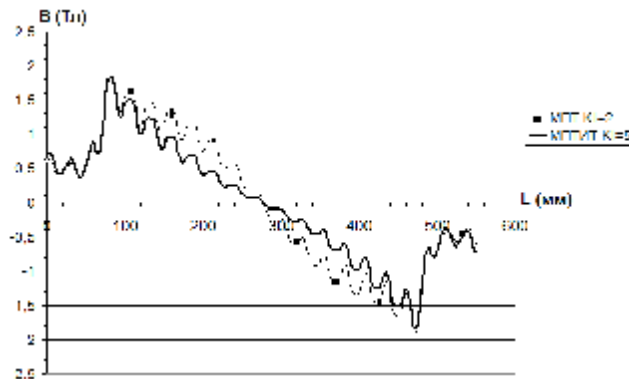


Рис. 6. Кривые распределения индукции поля реакции якоря МПТИТ и МПТ с общим ярмом при перегрузке по току

Выводы

Сравнительные расчеты МПТИТ и привода нереверсивного прокатного стана $P_n = 6000$ кВт, $U_n = 825$ В, $n_n = 200$ об/мин при сохранении неизменными значений электромагнитных нагрузок показали, что масса меди МПТИТ уменьшилась на 27%, а масса активных материалов – на 8%.

При уменьшении величины рабочего воздушного зазора в два раза масса меди МПТИТ уменьшилась на 35%, а масса активных материалов – на 10%.

Таким образом, данное конструктивное решение позволяет существенно удешевить машину постоянного тока, упростить ее изготовление, увеличить КПД. Использование МПТИТ в соответствующих промышленных механизмах позволит повысить их производительность, уменьшить потери энергии как в рабочем, так и в переходных режимах.

Литература

1. Находкин, М. Д. Проектирование тяговых электрических машин / Под ред. М. Д. Находкина. Москва.: Транспорт, 1976. – 624 с.
2. Патент України № 104943, Україна, МПК(2006.01) H02K29/06. Електрична машина бііндукторного типу. / О.А. Андриушенко, В.В. Булгар, А.О. Бойко, А.Д. Івлєв, Д.А. Івлєв, О.В. Яковлєв, В.Д. Косєнков. – а201211580, заявл.08.10.2012; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.
3. Рабинович И. Н. Проектирование электрических машин постоянного тока / И. Н. Рабинович, И. Г. Шубов. – Ленинград: Энергия, 1967. – 504 с.

References

1. Nahodkin, M. D. Proektirovanie tjugovyh jelektricheskikh mashin / Pod red. M. D. Nahodkina. Moskva.: Transport —1976. — 624 s.
2. Patent Ukrainy № 104943, Ukraina, MPK(2006.01) N02K29/06. Elektrychna mashyna biinduktornoho typu. / O.A. Andriushchenko, V.V. Bulhar, A.O. Boiko, A.D. Ivliev, D.A. Ivliev, O.V. Yakovlev, V.D. Kosenkov// – а201211580, zaiavl.08.10.2012; opubl. 25.03.2014, Biul. № 6.
3. Rabinovich I. N. Proektirovanie jelektricheskikh mashin postojannogo toka./ I. N. Rabinovich, I. G. Shubov - Leningrad: Jenergija —1967 — 504 s.

Рецензія/Peer review : 14.5.2015 р.

Надрукована/Printed :15.5.2015 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією