

В.Д. КОСЕНКОВ

Хмельницкий национальный университет

Д.А. ИВЛЕВ, А.В. ЯКОВЛЕВ, Т.А. ЖЕЛИБА

Одесский национальный политехнический университет

АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В МАШИНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИНДУКТОРНОГО ТИПА

Рассмотрены результаты расчета стационарного теплового поля машины постоянного тока индукторного типа методом конечных элементов. Проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных. Показано, что благодаря новым конструктивным решениям в такой машине значительно улучшен теплоотвод, что позволяет увеличить мощность двигателя при неизменной геометрии.

Ключевые слова: тепловое поле, машина постоянного тока, метод конечных элементов.

V.D. KOSENKOV

Khmelnytsky National University

D.A. IVLIEV, O.V. YAKOVLEV, T.A. ZHELIBA

Odessa National Polytechnic University

THE ANALYSIS OF STATIONARY THERMAL FIELD IN THE DIRECT-CURRENT MOTOR INDUCTOR TYPE

The results of the calculation of stationary thermal field in the direct-current motor inductor type were considered by the finite elements method. One realized the comparative analysis of experimental and calculated data. It is shown that because of the new constructive solutions has been improved heat dissipation in such electrical machine the significantly, what allows to increase the power of the engine at a constant geometry.

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

Постановка проблемы

Как известно [1], масса электрической машины зависит от принятых значений электромагнитных нагрузок, допустимость которых определяется по результатам теплового расчета. Обычно эти значения принимаются на основании рекомендаций, полученных из опыта проектирования. Однако, применение такого подхода при рассмотрении новых конструктивных схем электрических машин не всегда оправданно, особенно если в новой конструкции существенно улучшены условия теплоотвода. Примером такой конструкции может служить торцевой двигатель постоянного тока индукторного типа (ДПТИТ), разработанный в Одесском национальном политехническом университете [2] (рис.1 а).

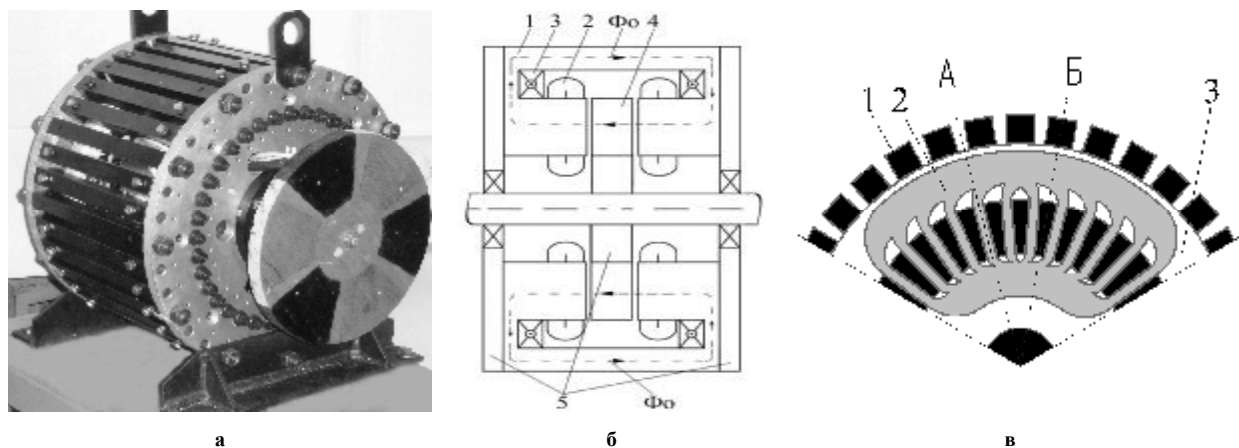


Рис. 1. Торцевой двигатель постоянного тока индукторного типа:
а-внешний вид; б - продольный разрез; в – статор (два полюсных деления)

Являясь электрической машиной индукторного типа, ДПТИТ использует только 50% активной поверхности статора в преобразовании энергии. Это означает, что при всех прочих равных условиях масса обмотки якоря ДПТИТ будет всегда больше массы обмотки якоря классического двигателя постоянного тока. Однако рост массы обмотки якоря уравнивается отсутствием у ДПТИТ компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов.

Магнитная система ДПТИТ (рис.1 б, в) не имеет общего ярма и состоит из ряда магнитно-несвязанных зубцов П – образной формы 1, между которыми уложены секции обмотки якоря 2, обмоток возбуждения 3, создающих основной магнитный поток Φ_0 , безобмоточных полюсов 4 и крепежных немагнитных дисков 5.

В такой конструкции паз электрической машины открыт с обеих сторон, что позволяет:

- резко ослабить поле поперечной реакции якоря путем снижения магнитной проводимости

магнитопровода в поперечном направлении и довести перегрузочную способность по току $K_I = I_{don} / I_n$ до 5÷7, отказавшись от применения компенсационной обмотки [3];

- существенно улучшить условия теплоотвода через конструктивные зазоры (пазы) между зубцами П – образной формы, обеспечив непосредственный контакт внешней среды с активными частями ДПТИТ.

Задачей данной работы является расчет температурного поля элементов конструкции ДПТИТ, сравнение полученных результатов с экспериментальными данными и выработка рекомендаций по повышению значений электромагнитных нагрузок в данной конструкции.

Основные результаты

Расчет стационарного теплового поля производился в плоскопараллельной области методом конечных элементов (МКЭ) с помощью программного пакета ELCUT версии 4.1. Задача рассматривалась в декартовой системе координат x, y, z в плоскости x, y при условии постоянства физических свойств и источников поля по оси z . Отказ от рассмотрения задачи в осесимметричной (цилиндрической) системе координат r, θ, z связан с необходимостью одновременного рассмотрения двух характерных плоскостей ДПТИТ, что невозможно в осесимметричной системе координат, где расчетная область ограничена только положительной полуплоскостью $r > 0$. В расчете рассматриваются две полуплоскости: А (рис.1 в), проходящая через паз, где есть непосредственный контакт внешней среды с обмотками, и Б (рис.1 в), проходящая через зубец П – образной формы. В расчетной модели принято следующее допущение: полуплоскость А повернута на величину половины зубцового деления таким образом, чтобы полуплоскости А и Б находились в одной расчетной плоскости. Основой расчета теплового поля является уравнение теплопроводности, которое в декартовой системе координат имеет вид [4]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(I_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(I_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = q, \quad (1)$$

где T – искомая функция распределения температуры;
 λ_x, λ_y – коэффициенты теплопроводности в текущей точке расчетной области в направлении осей координат x и y ;

q – объемная плотность источников нагрева.

С уравнением (1) связаны три вида граничных условий:

– граничное условие первого рода, определяющее распределение температуры на поверхности тела,
 $T|_x = T^*$, (2)

где $T|_x$ – температура на границе расчетной области;
 T^* – известное значение температуры на границе расчетной области;

– граничное условие второго рода, определяющее значение теплового потока на поверхности тела,

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (3)$$

где n – нормаль к внешней теплоотдающей поверхности;

– граничное условие третьего рода, определяющее конвективный обмен между поверхностью тела и окружающей средой

$$I_x \frac{\partial T}{\partial x} e_x + I_y \frac{\partial T}{\partial y} e_y - \alpha(T - T_{oc}) = 0, \quad (4)$$

где e_x, e_y – направляющие косинусы нормали теплоотдающей поверхности по отношению к осям координат;

α – коэффициент теплоотдачи конвекцией в окружающую среду;

T_{oc} – температура окружающей среды.

В результате решения уравнения (1) с граничными условиями (2)-(4) определяется искомое температурное поле в установившемся тепловом режиме.

Расчет температурного поля проводился для сравнения полученных результатов с данными, полученными в ходе эксперимента. Экспериментальные измерения проводились с момента пуска двигателя до выхода его в установившийся тепловой режим, при следующих параметрах работы ДПТИТ: ток обмотки возбуждения $I_{ov} = 4,6$ А; ток обмотки якоря $I_a = 18$ А; скорость вращения ротора $n = 450$ об/мин. Эксперимент проводился в течение 100 минут, при этом температура установилась через 80 минут с момента начала эксперимента.

Создание расчетной модели проводилось по рекомендациям, изложенным в [5], согласно которым, описывая границы внутренней газовой среды в электрической машине, можно принять, что воздух вне зависимости от того, есть ли внутри какие-либо перемешивающие устройства или нет, имеет во всем объеме, исключая очень тонкий пограничный слой, одну и ту же температуру. Зная коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1 \dots \alpha_n$, в пределах которых можно считать коэффициент теплоотдачи постоянным, в расчет вводятся условные среды, Boundary Air (BA) и Thermal Superconductivity (TSC), что связано с невозможностью задать температуру на границе внутренней газовой среды до начала расчета, так как эта

величина еще не определена[5]. Эти среды характеризуются следующими значениями теплопроводности:

$$\lambda_{BAi} = \alpha_i \cdot \delta \quad (i=1..n) \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)},$$

$$\lambda_{TSC} = 10^5 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)},$$

где δ - очень малое расстояние по сравнению с размерами описываемых областей.

Для проведения расчета были приняты следующие коэффициенты и значения:

- коэффициент теплоотдачи поверхности охлаждения $\alpha = 10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, согласно рекомендациям [6] для естественного охлаждения;

- температура окружающей среды $T_o = 21^\circ\text{C}$ (294 К);

- теплопроводность стали $T_{ст} = 55 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$;

- теплопроводность меди $T_m = 64 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$;

- теплопроводность $BA = 0,0075 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$;

- теплопроводность $TSC = 100000 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$;

- объемная плотность тепловыделения обмотки якоря, рассчитанная исходя из величины электрических потерь во время эксперимента $Q_{оя} = 45497 \text{ Вт/м}^3$;

- объемная плотность тепловыделения обмотки возбуждения, рассчитанная исходя из величины электрических потерь во время эксперимента $Q_{ов} = 95010 \text{ Вт/м}^3$;

Для расчета модели программой ELCUT была сгенерирована сетка конечных элементов, содержащая 482017 узлов. Полученные результаты распределения векторов теплового потока, изотерм, теплового потока и температуры отражены на (рис.2 а, б, в, г).

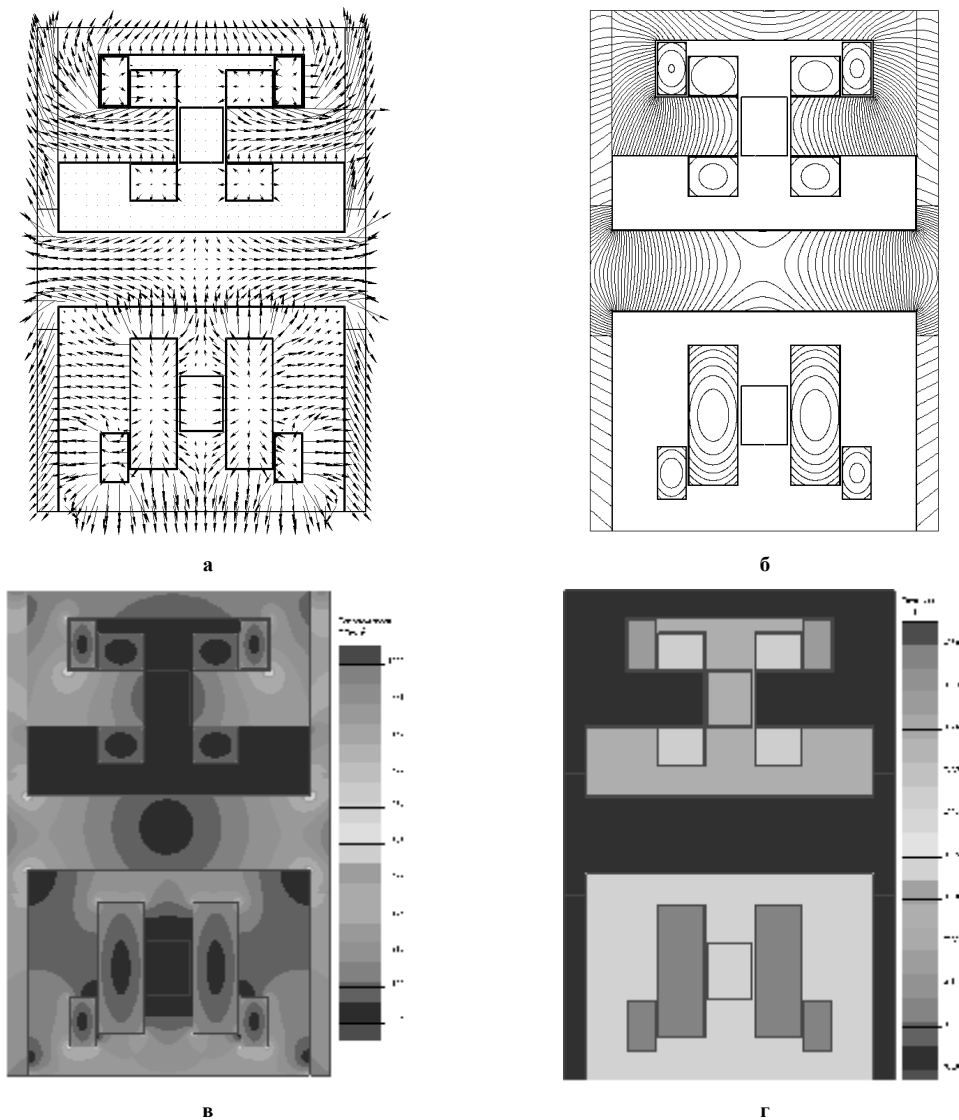


Рис. 2. Результаты расчета стационарного теплового поля ДПТИТ:
 а – распределение векторов теплового потока (масштаб 0,01 шаг сетки 8мм);
 б – распределение изотерм (масштаб 0,01 К); в – распределение теплового потока;
 г – распределение температуры

В таблице 1 приведены сравнительные данные по расчетному и экспериментальному определению установившихся температур в ДПТИТ.

Таблица 1

Сравнительные данные по расчетному и экспериментальному определению установившихся температур в ДПТИТ

| Позиция | Абсолютные значения | | |
|--|------------------------------|---------------------|----------------|
| | по методу конечных элементов | по эксперименту, °С | погрешность, % |
| Обмотка возбуждения (верхняя полуплоскость) | (328,89 К) 55,74°С | 56,5 | 1,4 |
| Лобовая часть секции (верхняя полуплоскость) | (322,88 К) 49,73°С | 50,1 | 0,8 |
| Обмотка якоря (нижняя полуплоскость) | (330,91 К) 57,76°С | 55 | 4,8 |
| Обмотка возбуждения (нижняя полуплоскость) | (331,15 К) 58°С | | |

Как видно из таблицы 1, результаты расчета стационарного теплового поля с использованием пакета ELCUT и физического эксперимента достаточно близки, что позволяет использовать данную программу для моделирования теплового поля в ДПТИТ. В частности, результаты сравнения ДПТИТ и аналога (табл.2), в качестве которого рассматривается классическая машина постоянного тока (МПТ) [1], отражены в таблице 3.

Таблица 2

Сравнение двигателя постоянного тока индукторного типа и классической машины постоянного тока

| Параметр | Единицы измерения | ДПТИТ | МПТ |
|--|--------------------------|--------------|----------------|
| Номинальная мощность P_n | кВт | 5 | 5,5 |
| Номинальное напряжение U_n | в | 220 | 220 |
| Номинальные обороты n_n | об/мин | 1500 | 1500 |
| Ток якоря I_a | А | 25,78 | 29,3 |
| Потери в обмотке якоря $P_{оя}$ | Вт | 361 | 305 |
| Потери в обмотке возбуждения $P_{ов}$ | Вт | 270 | 254 |
| Потери в обмотке добавочных полюсов $P_{д}$ | Вт | - | 165 |
| Потери в переходном контакте щеток $P_{к.щ}$ | Вт | 52 | 59 |
| Потери в стали $P_{ст}$ | Вт | 214 | 117 |
| Вентиляционные потери $P_{вент}$ | Вт | - | 169 |
| Потери на трение подшипников $P_{т.п}$ | Вт | 20 | 20 |
| Потери на трение щеток о коллектор $P_{т.щ}$ | Вт | 16 | 49 |
| Добавочные потери $P_{доб}$ | Вт | 27 | 67 |
| Общая масса меди $M_{мд}$ | Кг | 15,72 | 17,59 |
| Общая масса активной стали $M_{ст}$ | Кг | 51,6 | 56,78 |
| Тепловой фактор AJ | А/см · А/мм ² | 800 | 749 |
| Класс нагревостойкости изоляции | | F | F |
| Способ охлаждения | | Естественное | Самовентиляция |
| Коэффициент полезного действия η | % | 82 | 82 |

Таблица 3

Результаты расчета стационарного теплового поля ДПТИТ и классической МПТ для P = 5,5 кВт

| Позиция | Среднее превышение температуры над температурой охлаждающего воздуха | | |
|--|--|------------|-------------|
| | ДПТИТ, °С | Аналог, °С | Различие, % |
| Обмотка возбуждения (нижняя полуплоскость) | 50 | 72,9 | 31,5 |
| Обмотка якоря (нижняя полуплоскость) | 61,96 | 79,4 | 22 |

Выводы

Анализируя полученные данные, можно отметить, что, несмотря на естественное охлаждение у ДПТИТ и самовентиляцию у аналога, в данном случае в ДПТИТ можно использовать более дешёвую изоляцию класса В с предельной допустимой температурой превышения над охлаждающим воздухом 80°С.

Кроме этого, как показали расчеты, существует возможность увеличения мощности двигателя при неизменной геометрии путем увеличения плотности тока и линейной токовой нагрузки, то есть фактора нагрева 4.

Сравнительные данные по увеличению мощности ДПТИТ

| Параметры | Среднее превышение температуры над температурой охлаждающего воздуха | | |
|--|--|----------|-----------|
| | 5 кВт | 6 кВт | 7,5 кВт |
| Тепловой фактор AJ ($A/cm \cdot A/mm^2$) | 800 | 1400 | 1736 |
| Обмотка возбуждения (нижняя полуплоскость) | 50 °C | 59,55 °C | 72,13 °C |
| Обмотка якоря (нижняя полуплоскость) | 61,96 °C | 80,09 °C | 104,28 °C |

Как видно из таблицы 4, превышение температуры обмотки якоря в случае 7,5 кВт, равное 104,28 °C, превышает предельно допустимую температуру для изоляции класса F в 100°C. Однако переход от естественного охлаждения к самовентиляции позволит понизить температуру до допустимой величины.

Таким образом, конструкция ДПТИТ способна эффективно отводить тепло, что имеет особое значение при ослаблении поля поперечной реакции якоря и доведении перегрузочной способности по току до 5-7 кратной.

Литература

1. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин/ О. Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.
2. Патент України № 78249, МПК(2006), НО2К291/06 Безконтактний двигун постійного струму з дисковим ротором/ В.В. Булгар, В.В. Гололобов, А.Д. Івлєв, О.В. Яковлєв// - 20040604361, заявл.07.06.2004, опубл.15.03.2007. – Бюл. №3.
3. Косенков В.Д. Ограничение реакции якоря в машинах постоянного тока индукторного типа/ В.Д. Косенков, Д.А. Івлєв, А.В. Яковлєв// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький. – 2015. – Вып.3(225) – С. 224–227.
4. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 4.1. Руководство пользователя. – Санкт-Петербург: Производственный кооператив ТОР, 2000. – 130с.
5. Гандшу В.М. / Особенности расчета нагревания электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT [Электронный ресурс] / Гандшу В.М. – Режим доступа: <http://elcut.ru/articles/gandshou/>.
6. Игнатов В.А. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления/ В.А.Игнатов, К.Я. Вильданов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 303 с.

Рецензія/Peer review : 7.10.2015 р.

Надрукована/Printed :1.11.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 677.11.021

К.М. КЛЕВЦОВ

Херсонський національний технічний університет

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ДЕКОРТИКАЦІЇ ЛУБ'ЯНОЇ СИРОВИНИ**

Представлена робота спрямована на створення нової теорії та обладнання для роз'єднання технічних комплексів волокна, що відкриває можливість оптимізації механічної дії на всіх технологічних операціях при його переробці, розробки принципово нових процесів механічної обробки і в кінцевому підсумку прогнозування якості з урахуванням функціонального використання готової продукції.

Ключові слова: елементарні луб'яні волокна, декортикація, режими обробки.

K.N. KLEVTSOV

Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

DEFINITIONS OPTIMAL TECHNOLOGICAL PARAMETERS DECORTICATION BAST RAW MATERIALS

This work aims to create a new theory of separation equipment for fiber complexes, which opens the possibility of optimizing the mechanical action on all technological operations at its processing, development of innovative machining processes and ultimately forecasting quality based functional use of the finished product.

Keywords: elementary bast fiber decortication, modes of treatment.

Вступ

Багато дослідників, що займаються проблемами руйнування волокна, ниток і тканин, відзначають складність моделювання реальних технологічних процесів з урахуванням реальної будови нитки і імовірнісними фізико-механічними і геометричними її властивостями. Особливу складність представляє