

ДИСКОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИВОДА МЕХАНИЗАЦИИ КРЫЛА САМОЛЕТА

В.В.Гребеников¹, докт.техн.наук, М.В.Прыймак¹, Р.Р.Гамалея¹, Ю.В.Шарабан²

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

Email: elm1153@gmail.com

² – Государственное предприятие «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», ул. Сумская, 132, Харьков, Украина.

В работе рассмотрен комплексный подход к проектированию электродвигателя дискового типа с постоянными магнитами на роторе. Как объект проектирования выбран электродвигатель, предназначенный для использования в качестве привода механизации крыла самолета Ан-178. Подход включает выбор числа полюсов, предварительную оптимизацию магнитной системы в пакете Comsol с целью получения максимального вращающего статического момента при заданных внешних габаритах электрической машины, оценку потерь на нагрев и вихревые токи, а также расчет двигательного режима в динамике с использованием пакета Matlab Simulink и построение нагрузочной характеристики электродвигателя. Библ. 4, рис. 8.

Ключевые слова: электродвигатель, магнитная система, электрическая машина дискового типа с постоянными магнитами, электромеханический момент, динамические процессы.

При управлении полетом современного самолета используется широкий набор аэродинамических поверхностей, которые в процессе полета перемещаются по командам пилота и автоматических систем управления полетом. Совокупность устройств на крыле летательного аппарата, предназначенных для регулирования его несущих свойств, называют механизацией крыла (МК). Суть регулирования состоит в том, что с помощью специальных приспособлений увеличивается кривизна профиля (в некоторых случаях и площадь крыла), вследствие чего изменяется картина обтекания крыла. Управление такими поверхностями осуществляется гидравлическими или электромеханическими приводами. При повышении степени электрификации самолета и с целью повышения безопасности при отказе самолетной гидросистемы предполагается переходить от гидроприводов с питанием только от гидросистем к автономным, которые питаются от электрической системы переменного и постоянного тока или комбинированным приводом. Для нового транспортного самолета Ан-178 предлагается использовать в МК электродвигатель с постоянными магнитами дискового типа [1], который выгодно отличается от других возможных вариантов, например, от коллекторных двигателей, существенно более высокой надежностью.

Основное требование при проектировании данного электродвигателя: в заданных габаритах магнитной системы (диаметр D_0 не более 90 мм, толщина T не более 27 мм) обеспечить получение заданной мощности (не менее $P = 1$ кВт при номинальной частоте вращения ротора $n = 8000$ об/мин и плотности тока в обмотках $J = 10$ А/мм²). Учитывая габаритные ограничения на проектируемый электродвигатель, было принято решение использовать дисковую конструкцию магнитной системы, отличающуюся более рациональным расположением активных компонентов магнитной системы.

Цель работы – при заданных габаритах дискового электродвигателя определить расчетным путем основные размеры магнитной системы, при

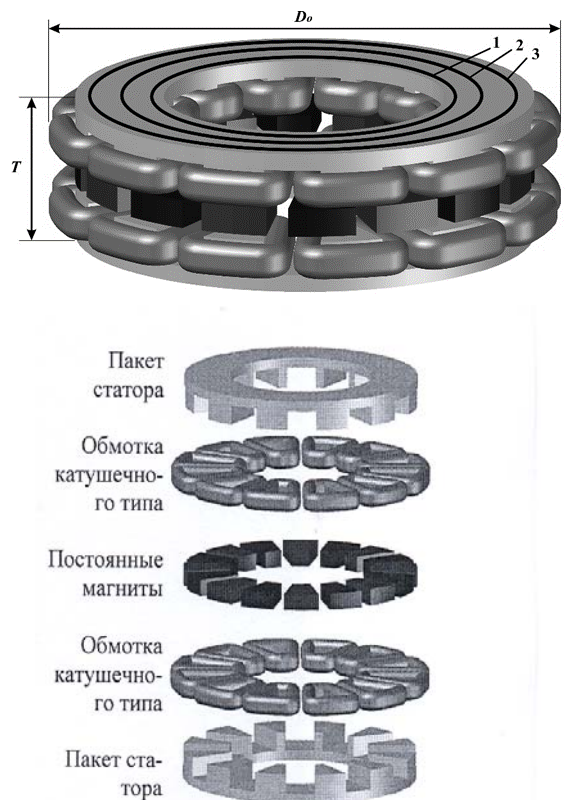


Рис. 1

которых обеспечивается заданная мощность, а также рассчитать динамические характеристики в двигательном режиме.

На рис. 1 показаны элементы конструкции электродвигателя, который состоит из двухстороннего статора с обмотками катушечного типа и ротора из постоянных магнитов. Технология изготовления статора такого двигателя следующая: навивается тор из изотропной электротехнической стали, в котором фрезеруются пазы для укладки катушек. Катушки статора наматываются на оправку соответствующего профиля и затем укладываются в пазы статора. Каркас ротора выполняется из немагнитного материала, в котором закрепляются постоянные магниты.

Выбор числа полюсов электродвигателя. На первом этапе проведено исследование модификаций электродвигателя с различным количеством катушек в статоре и постоянных магнитов в роторе. При заданных габаритах магнитной системы соотношение между количеством полюсов статора ($2p_s$) и количеством полюсов (магнитов) ротора ($2p_r$) для трехфазной системы существенным образом влияет на характеристики электродвигателя. Исходя из известных соотношений [4]: $2p_r = 2p_s \pm 2k$ ($k=1, 2, 3, \dots$), для расчетов и анализа выбраны такие сочетания: $2p_s-2p_r$: 18-24; 12-16; 6-8.

Для выбранных сочетаний полюсов статора и ротора производился расчет магнитного поля и электромагнитного момента в программном пакете Comsol 3.4 при следующих условиях: коэрцитивная сила постоянных магнитов задавалась равной $H_{cb} = 930$ кА/м, остаточная индукция $B_r = 1,23$ Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной $\mu_{ПМ} = 1,05$, магнитопровод статора – сталь марки 2421 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали). В трехфазной системе фазы статора во всех расчетах включены следующим образом: А(+), В(0), С (-). Исходя из условий эксплуатации электродвигателя, плотность тока в обмотках управления задавалась равной $J = 10$ А/мм².

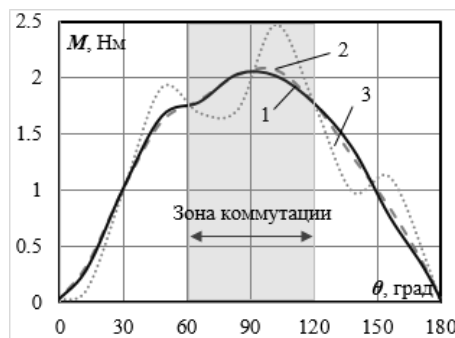
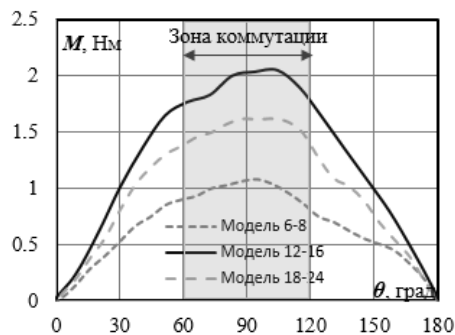


Рис. 2, а, б

наибольшее.

Коммутация фаз статора в двигателе с постоянными магнитами осуществляется от датчиков обратной связи (датчиков Холла либо оптоэлектрических), при этом зона коммутации составляет 60° (электрических градусов). В результате расчетов определено, что среднее значение электромагнитного момента в зоне коммутации для электродвигателя с различным сочетанием полюсов статора и ротора следующее: $M_{(18-24)} = 1,54$ Нм; $M_{(12-16)} = 1,93$ Нм; $M_{(6-8)} = 0,98$ Нм. Следует также отметить, что для данного электродвигателя рассчитывался электромагнитный момент и с другим сочетанием полюсов, например, 18-12. Однако в этом случае наблюдались пульсации электромагнитного момента, а его среднее значение в зоне коммутации было существенно ниже.

Расчет зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора для выбранных сочетаний $2p_s-2p_r$ производился в диапазоне от оси d (поле соответствующих полюсов ротора направлено согласно с полем, создаваемым включенными фазами статора) до оси q (поле соответствующих полюсов ротора направлено встречно к полю, создаваемому включенными фазами статора). Для исследуемых моделей этот диапазон равен 180° (электрических градусов). Для повышения точности расчетов при двухмерном моделировании зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора рассчитывалась следующим образом: расчетная область разделялась на три равные части, средние сечения которых показаны цифрами 1, 2, 3 на рис. 1 и 3, а. Для каждой из частей определялась зависимость момента от угла поворота ротора (M_1, M_2, M_3); результирующий электромагнитный момент определялся как сумма – $M = M_1 + M_2 + M_3$. На рис. 2, а показаны результаты расчета электромагнитного момента от угла поворота ротора для моделей со следующим сочетанием $2p_s-2p_r$: 18-24; 12-16; 6-8 (на рис. 2, а соответственно обозначено – Модель 18-24, Модель 12-16, Модель 6-8), из которого видно, что при сочетании полюсов 6-8 получено наименьшее значение электромагнитного момента, а при сочетании 12-16 –

Таким образом, для заданных габаритных размеров электродвигателя наибольшее значение среднего электромагнитного момента было получено для сочетания полюсов статора и ротора – 12-16. Для этой модели были проведены дополнительные расчеты в трехмерной и двухмерной постановке, результаты которых представлены на рис. 2, б. На этом рисунке приведены зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора (в электрических градусах), при этом расчеты произведены для следующих условий: в трехмерной постановке – кривая 1, в двухмерной постановке по трем сечениям – кривая 2 и в двухмерной по среднему сечению (сечение обозначено цифрой 2 на рис. 1) – кривая 3. Анализируя эти графики, следует отметить, что расхождение в значениях электромагнитного момента между двухмерной постановкой по трем сечениям и трёхмерной незначительно и составляет примерно 2%. Объясняется это тем, что рассеяние магнитного потока для такого типа двигателей весьма незначительно, поскольку воздушный зазор определяется двухсторонним зазором между статором и ротором и толщиной постоянных магнитов, магнитная проницаемость которых практически равна проницаемости воздуха. Зависимость момента от угла поворота ротора (кривая 3), рассчитанная по среднему сечению, имеет пульсации; это объясняется тем, что для данной модели (согласно рис. 3, а) угол между боковыми гранями магнитов 4 составляет $22,5^\circ$, а угол между боковыми гранями зубцов статора 5– 30° . Однако среднее значение электромагнитного момента в зоне коммутации отличается незначительно: для трехмерной постановки – $M_{3D} = 1,91$ Нм; для двухмерной по трем сечениям – $M_{2D(1-2-3)} = 1,92$ Нм; для двухмерной постановки по среднему сечению – $M_{2D(2)} = 1,99$ Нм. В последующих расчетах при нахождении оптимальной геометрии магнитной системы за основу был взят вариант с сочетанием полюсов $2p_s-2p_r$ – 12-16, при этом электромагнитный момент определялся в двухмерной постановке по трем сечениям.

Выбор оптимальной геометрии магнитной системы. На втором этапе для поиска оптимальных размеров магнитной системы электродвигателя был проведен ряд расчетов. Суть оптимизации заключалась в нахождении таких размеров активных элементов электродвигателя, которые обеспечивали бы максимальный крутящий момент электродвигателя в заданных габаритах [2,3]. В про-граммном пакете Comsol 3.4 была построена параметрическая модель дискового

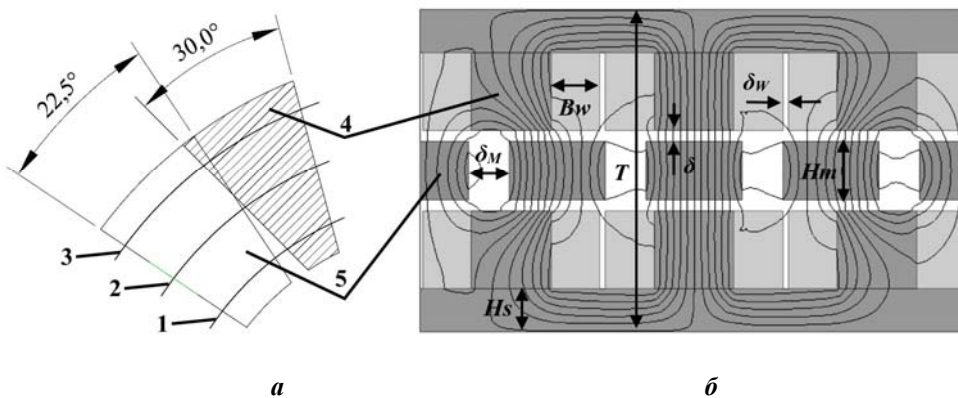


Рис. 3

электродвигателя, позволяющая варьировать геометрическими размерами магнитной системы (рис. 3).

В качестве неизменных параметров были выбраны: внешний диаметр магнитной системы ($D_o = 90$ мм); толщина стального диска без учета концентраторов ($H_s = 3,5$ мм);

воздушный зазор между катушками ($\delta_w = 0,5$ мм); конструктивный зазор между магнитами ($\delta_m = 3,5$ мм), воздушный зазор между одной половиной статора и ротора ($\delta = 0,5$ мм), общий воздушный зазор составляет $2\delta = 1$ мм. В качестве варьируемых параметров были выбраны: толщина постоянных магнитов (H_m); ширина медной обмотки (B_w).

Остальные параметры такие, как толщина медных обмоток и концентраторов, внутренний радиус магнитной системы, длина магнитов и пр. рассчитывались на основании геометрических соотношений. Оптимизация проводилась методом градиентного спуска по следующему алгоритму.

1. Для фиксированной ширины окна обмотки B_w варьировалась толщина постоянных магнитов H_m и рассчитывалась зависимость электромагнитного момента для различных положений ротора относительно статора с фиксированным значением плотности тока.

2. Из расчетной зависимости электромагнитного момента от угла сдвига ротора определялось значение среднего электромагнитного момента в пределах зоны коммутации.

3. После того, как было найдено значение переменной H_m , для которого достигался максимум среднего электромагнитного момента, это значение фиксировалось.

4. Аналогично варьировалось значение параметра B_w при остальных фиксированных и находилось его оптимальное значение.

5. Если уточнение момента превышало заданное пороговое значение 3%, то осуществлялось повторение алгоритма, если нет, то считалось, что найден оптимум с точностью 3%.

На рис. 4 показаны графики зависимостей среднего электромагнитного момента в пределах зоны коммутации от толщины магнитов H_m и ширины окна обмотки B_w для воздушного зазора $\delta=0,5$ мм. На рис. 4, а для одного из циклов описанного алгоритма приведена зависимость $M = f(H_m)$ при $B_w=4,5$ мм, а на рис. 4, б – $M=f(B_w)$ при $H_m=3,5$ мм. Оптимальное значение толщины магнитов равно $H_m=3,5$ мм, оптимальное значение ширины окна обмотки – $B_w=4,6$ мм. Среднее значение электромагнитного момента в зоне коммутации составляет $M_{cp}=1,92$ Нм, а значит при скорости вращения $n = 8000$ об/мин будет обеспечиваться мощность, примерно равная $P = 1,6$ кВт (без учета потерь).

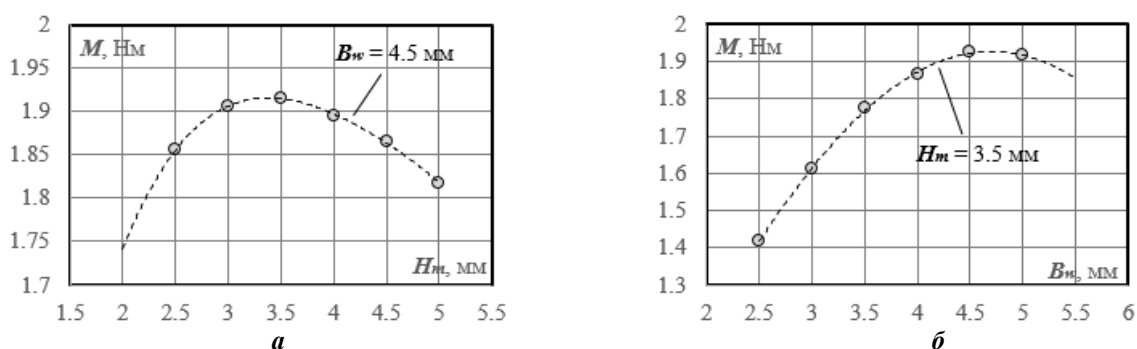


Рис. 4

Достоверный учет потерь в электродвигателе без дополнительных исследований затруднителен. Упрощенная оценка потерь в стали может быть осуществлена следующим образом. Согласно ГОСТ 21427.2-83 для стали марки 2421 удельные магнитные потери при частоте $f=400$ Гц и индукции $B=1$ Тл составляют $P_{уд} = 19,5$ Вт/кг. Масса стали магнитной системы составляет 0,3 кг. Поскольку потери в стали имеют квадратичную зависимость от частоты, а средняя индукция в концентраторе составляет 1 Тл, то при частоте $f = n \times 2p / 60 = 1067$ Гц ($n=8000$ об/мин – частота вращения ротора, $2p=8$ – число полюсов ротора) потери в стали для данного двигателя – $P_{ст} = 41$ Вт. Также были посчитаны активные потери на нагрев обмоток при плотности тока $J=10$ А/мм², которые составили $P_{обм} = 59$ Вт.

Для приведенной конструкции магнитной системы потери на вихревые токи в медных проводах малы по сравнению с потерями на вихревые токи в железе, т.к. линии магнитного потока практически не пересекают области обмотки, а максимальная индукция в этих областях на порядок меньше индукции в области концентраторов магнитного потока. Механические потери в электродвигателе рассчитываются по приближенным формулам, полученным, как правило, из опыта проектирования и эксплуатации двигателей, однако их величина соизмерима с потерями в стали. Следует также отметить, что КПД современных транзисторных устройств управления электродвигателями с постоянными магнитами обычно составляет 97–98%.

Таким образом, с учетом оценки потерь в стали, меди, механических и потерь в устройстве управления, можно сделать предварительный вывод, что модель электродвигателя целиком удовлетворяет техническим требованиям и обеспечивает полезную мощность не менее $P = 1$ кВт.

Моделирование динамических процессов в электродвигателе. Для оценки правильности выбора параметров обмотки проведено моделирование динамических процессов в электродвигателе с помощью программного пакета Matlab Simulink. На рис. 5 показана разработанная модель электродвигателя с системой управления и блоком контроля фазного тока.

Для расчета динамических характеристик необходимо заранее рассчитать значения потоко-сцепления и электромагнитного момента электродвигателя при различных углах смещения ротора и величинах плотности тока в обмотках статора. В процессе моделирования динамических процессов

изменялось количество витков (параллельных ветвей) в катушках статора электродвигателя. При проведении расчетов осуществлялся контроль плотности тока в обмотке статора таким образом, чтобы она не превышала $J=10 \text{ А/мм}^2$.

Для определения числа витков катушки статора, при котором обеспечивается заданный момент, моделировались переходные процессы «наброса» нагрузки $M_H=1,2 \text{ Нм}$ на вал электродвигателя при вращении с начальной скоростью $n=8000 \text{ об/мин}$. На рис. 6 показаны осциллограммы электромагнитного момента в момент «наброса» нагрузки для различного числа витков: кривая 1 соответствует числу витков $w=16$, средний электромагнитный момент для этого числа витков равен $M_{cp}=1,8 \text{ Нм}$; кривая 2 – $w=18$, $M_{cp}=1,7 \text{ Нм}$; кривая 3 – $w=19$, $M_{cp}=1,2 \text{ Нм}$; кривая 4 – $w=20$, $M_{cp}=0,7 \text{ Нм}$.

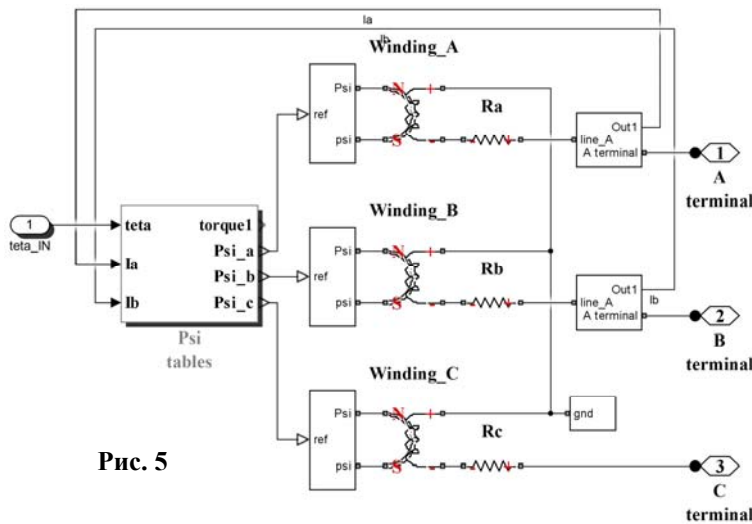


Рис. 5

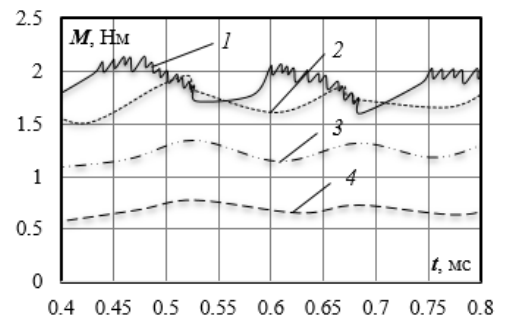


Рис. 6

Из рисунка видно, что при $w > 19$ двигатель не может обеспечить требуемый электромагнитный момент. Это связано с тем, что его противо-ЭДС велика и приложенного напряжения $U = 27 \text{ В}$ не хватает для обеспечения номинальной плотности тока в обмотке. При $w < 19$ обеспечивается требуемый электромагнитный момент при номинальной частоте вращения ротора $n \approx 8000 \text{ об/мин}$ и при плотности тока $J = 10 \text{ А/мм}^2$. При этом следует отметить, что расчет производился без учета потерь в стали и механических потерь.

Таким образом, результаты моделирования переходных процессов показали, что число витков в катушках статора должно быть не более 18 для обеспечения номинальной скорости вращения при работе на номинальную нагрузку.

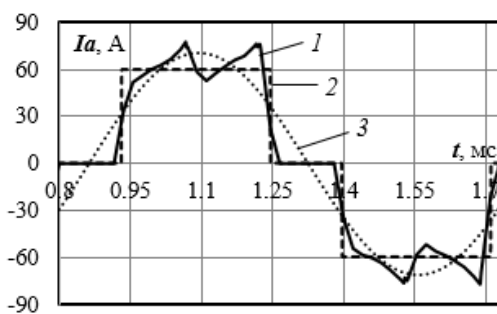


Рис. 7

Для подробного учета тепловых потерь на нагрев обмотки в программном пакете Comsol 3.4 рассматривалось два способа аппроксимации формы тока в обмотках – синусоидальная и трапецеидальная. Для анализа потерь на нагрев обмотки исходя из приближения, что ток в фазах рассчитывается по синусоидальному закону, использовалось средне-квадратичное значение плотности тока для источника тепла, постоянное во времени. При расчете, исходя из приближения, что ток в обмотке – трапецеидальная функция, рассчитывался установившийся режим для задачи с источником тепла, заданным кусочно-постоянной функцией времени. Следует отметить, что результаты моделирования дали приблизительно одинаковый результат, совпадающий с предварительными расчетами $P_{мед}=60 \text{ Вт}$. На рис. 7 показана расчётная осциллограмма фазного тока (кривая 1) и два способа ее приближения – трапецеидальная (кривая 2) и синусоидальная (кривая 3).

С помощью модели в пакете Matlab Simulink была рассчитана нагрузочная характеристика исследуемого дискового электродвигателя. Электродвигатель содержит 24

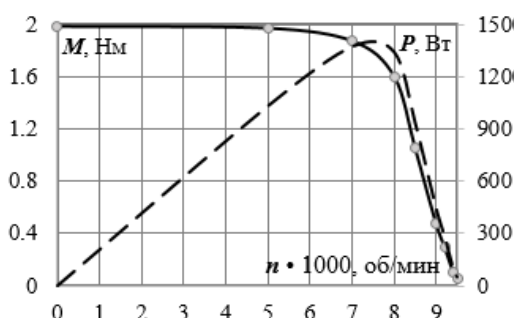


Рис. 8

катушки (по 12 на каждом диске), каждая фаза состоит из восьми катушек, соединенных параллельно. Каждая катушка состоит из 18 витков, площадь поперечного сечения витка s составляет $0,9 \text{ мм}^2$, омическое сопротивление r_{ϕ} фазы – $2,83 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$.

Жирными точками на рис. 8 показаны результаты численных экспериментов. Сплошной линией показана зависимость максимального момента нагрузки от скорости вращения ротора. Пунктирной линией показана общая мощность электродвигателя. Анализируя данные, приведенные на рис. 8, следует отметить, что при номинальной частоте вращения ротора, равной $n=8000$ об/мин, допускается максимальная нагрузка на двигатель 1,6 Нм, что соответствует мощности 1340 Вт.

Заключение. 1. Проведены оптимизационные расчеты с целью определения оптимальной геометрии магнитной системы дискового электродвигателя с постоянными магнитами в такой постановке: ограничения – наружный диаметр ($D_0=90$ мм) и толщина ($T=27$ мм) электродвигателя; варьируемые параметры – геометрия магнитной системы (число полюсов ротора, толщина постоянных магнитов, ширина медной обмотки); целевая функция – заданная мощность электродвигателя ($P=1$ кВт) при заданной частоте вращения ($n=8000$ об/мин).

2. Разработана математическая модель и проведены расчеты динамических характеристик исследуемого электродвигателя под нагрузкой, результаты которого подтверждают, что предложенная конструкция обеспечивает выходную мощность не менее $P=1$ кВт.

3. На основе расчетов динамических характеристик даны рекомендации по выбору количества витков в катушках и способу их соединения в обмотках статора.

1. *Афонин А.А.* Оптимизация электромеханических преобразователей энергии дискового типа // Доповіді НАН України. – 2003. – № 11. – С. 77–84.

2. *Гребеников В.В., Гамалея Р.Р.* Аналитический метод расчета магнитного поля и моментов электродвигателя с постоянными магнитами дискового типа // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 93–94.

3. *Гребеников В.В., Гамалея Р.В., Гамалея Р.Р.* Аналитическое моделирование магнитных полей электродвигателей с постоянными магнитами дискового типа // Праці ІЕД НАН України. – 2010. – Вип. 30. – С. 79–86.

4. *Ильинский Н.Ф., Юньков М.Г.* Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.

УДК 621.3.011.74.005

ДИСКОВИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ КОМБІНОВАНОГО ПРИВОДУ МЕХАНІЗАЦІЇ КРИЛА ЛІТАКА

В.В.Гребеніков¹, канд.техн.наук, **М.В.Приймак¹**, **Р.Р.Гамалія¹**, **Ю.В.Шарабан²**

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,

e-mail: elm1153@gmail.com

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

² – Державне підприємство «Харківське агрегатне конструкторське бюро», вул. Сумська, 132, Харків, Україна.

У роботі розглянуто комплексний підхід до проектування електродвигуна дискового типу з постійними магнітами на роторі. За об'єкт проектування обрано електродвигун, що призначений для використання як привод механізації крила літака Ан-178. Підхід включає вибір числа полюсів, попередню оптимізацію магнітної системи в пакеті Comsol з метою отримання максимального статичного обертового моменту при заданих зовнішніх габаритах електричної машини, оцінку втрат на нагрів та вихрові струми, а також розрахунок режиму двигуна в динаміці з використанням пакету Matlab Simulink та побудову навантажувальної характеристики електродвигуна. Бібл. 4, рис. 8.

Ключові слова: електродвигун, магнітна система, електрична машина дискового типу з постійними магнітами, електромеханічний момент, динамічні процеси.

DISK-TYPE PERMANENT MAGNET MOTOR FOR WINGS MECHANIZATION COMBINED DRIVE

V.V.Grebenikov¹, **M.V.Pryimak¹**, **R.R.Gamaliia¹**, **Yu.V.Sharaban²**

¹ – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

e-mail: elm1153@gmail.com

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

² – State enterprise “Kharkov aggregate design bureau”, str. Sumska, 132, Kharkiv, Ukraine.

In this article, we consider an integrated approach to design of disc-type motor with permanent magnets on the rotor. As the design object an electric motor is selected and intended for use as a drive of mechanization of a wing in airplane An-178. This approach involves the selection of number for poles, preliminary optimization of the magnetic system in Comsol Multiphysics package with the view of obtaining maximum static torque at the given overall dimensions of electric machine, the estimation of loss on heating and eddy currents, as well as calculation of the dynamics motor mode using Matlab Simulink package and building the motor load characteristic. References 4, figures 8.

Key words: electric motor, magnetic system, disk-type electric machine with permanent magnets, electromechanical torque, dynamic processes.

1. *Afonin A.A.* Optimization of disk-type electromechanical energy converters // *Dopovidi Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* – 2003. – № 11. – Pp. 77–84. (Rus)
2. *Grebenikov V.V., Gamaliia R.R.* Analytical method for calculating the magnetic field and torque of the disc-type electric motor with permanent magnet // *Tekhnichna Elektrodynamika.* – 2012. – № 3. – Pp. 93–94. (Rus)
3. *Grebenikov V.V., Gamaliia R.V., Gamaliia R.R.* Analytical modeling of magnetic fields of disk-type electric motors with permanent magnets // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* – 2010. – Vypusk 30. – Pp. 79–86. (Rus)
4. *Illinskii N.F., Unkov M.G.* Automated electric drive. – Moskva: Energoatomizdat. – 1990. – 544 p. (Rus)

Надійшла 10.02.2014
Остаточний варіант 26.05.2014