



СОПОСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С ВНЕШНИМ И ВНУТРЕННИМ РОТОРОМ

Изложены результаты исследования характеристик электродвигателей на постоянных магнитах с внешним и внутренним ротором. Показано, что при равных габаритных размерах электродвигатель с внешним ротором имеет лучшие удельные характеристики. Проведены тепловые расчеты и показано, что при жидкостном охлаждении можно существенно повысить удельные характеристики электрической машины с постоянными магнитами. Расчет магнитного поля и характеристик электродвигателей выполнен, а также тепловые расчеты выполнены в пакетах MotorSolve, предоставленных компанией Infolytica.

Ключевые слова: электродвигатель, постоянные магниты, внешние характеристики, жидкостное охлаждение

Электродвигатели с постоянными магнитами находят широкое применение во многих областях техники, например, в электроприводе транспортных систем, судовой технике, авиации, при этом с каждым годом объемы выпуска таких двигателей увеличиваются [1]. Удельные показатели этих электродвигателей (Нм/кг, кВт/кг) непрерывно улучшаются как за счет оптимизации магнитной системы, так и за счет применения жидкостного охлаждения.

Международные компании осуществляют серийное производство электродвигателей с постоянными магнитами и жидкостным охлаждением, обладающими высокими удельными характеристиками. Например, компания EMRAX (Словения) серийно производит электродвигатели с охлаждением гликолем, характеристики одного из них следующие: серия — EMRAX 348; $n_{\max} = 4000$ об/мин; $M_{\max} = 1000$ Нм; $M_n = 500$ Нм; $P_n = 150$ кВт; $\eta = 98\%$; $D \times L = 348 \times 107$ мм; $m = 40$ кг; $M_{\text{уд}} = 12,5$ Нм/кг; $P_{\text{уд}} = 3,75$ кВт/кг [2]. YASA motors (Великобритания) серийно производит электродвигатели типа с масляным охлаждением, характеристики одного из которых следующие: серия — YASA P400 R; $n_{\max} = 8000$ об/мин; $M_{\max} = 370$ Нм; $M_n = 200$ Нм; $P_n = 100$ кВт; $\eta = 96\%$; $D \times L = 294 \times 107$ мм; $m = 24$ кг; $M_{\text{уд}} = 8,3$ Нм/кг; $P_{\text{уд}} = 6,7$ кВт/кг [3].

Целью данной статьи являются численные исследования и сопоставление характеристик электродвигателей на постоянных магнитах с внутренним и наружным ротором и определение конфигурации и размеров магнитной системы, при которой достигается максимальное значение момента ($M \geq 500$ Нм) в заданном диапазоне частоты вращения ($n = 100 \div 3000$ об/мин) с учетом жидкостного охлаждения.

На Рис. 1, а упрощенно показан общий вид электродвигателя на постоянных магнитах с внутренним ротором. Статор двигателя аналогичен статору асинхронного двигателя АИР180М8 и имеет следующие параметры: диаметр статора наружный — $d_{\text{se}} = 313$ мм; диаметр статора внутренний — $d_{\text{si}} = 133$ мм; число пазов — $Z = 72$. Анализ и сопоставление различных конструктивных модификаций ротора с постоянными магнитами показывает, что роторы с тангенциальным намагничиванием магнитов при одинако-

вых габаритных размерах имеют больший электромагнитный момент [4, 5]. Поэтому в настоящем исследовании за основу была взята конфигурация магнитной системы ротора с тангенциально намагниченными магнитами. Количество полюсов ротора — $p = 8$; величина воздушного зазора между статором и ротором — $\delta = 1,5$ мм; аксиальная длина статора и ротора — $l_{\text{Fe}} = 100$ мм.

Расчет рабочих характеристик и численные исследования электродвигателей с внутренним ротором производился в программном пакете Infolytica MotorSolve [6] при следующих условиях: напряжение питания — 600 В; обмотки статора включены в "треугольник"; форма питающего тока в фазах статора — трапецеидальная; магнитопровод статора — сталь СТ2211; магнитопровод ротора — конструкционная сталь СТ20; тип постоянных магнитов — N40SH; коэффициент заполнения обмоточного окна — 0,5.

На Рис. 1, б приведена картина магнитного поля электродвигателя при плотности тока равной $J = 20$ А/мм². В результате расчетов установлено, что при данной плотности тока максимальная индукция в спинке статора равна $B_c = 1,8$ Тл, а в зубцах статора — $B_z = 2,1$ Тл.

В результате предварительных расчетов путем варьирования геометрическими параметрами магнитной системы электродвигателя были определены оптимальные соотношения между внешним и внутренним диаметром ротора, а также основные размеры магнитной системы, обеспечивающие максимальное значение электромагнитного момента ($M \geq 500$ Нм) в заданном диапазоне частоты вращения. Следует отметить, что столь высокое значение электромагнитного момента для заданных габаритов может быть достигнуто при повышенной плотности тока. При этом повышенное значение плотности тока может быть обеспечено при жидкостном охлаждении электродвигателя и его максимальное значение должно быть таковым, чтобы температура активных материалов (магнитов, обмоток, железа статора и ротора) не превышала допустимые значения.

Расчет температуры частей электродвигателя (обмоток, магнитов, железа статора и ротора, вала, корпуса, подшипниковых щитов) осуществлялся в пакете Infolytica MotorSolve с учетом системы охлаждения. Система охлаждения представляет собой ряд

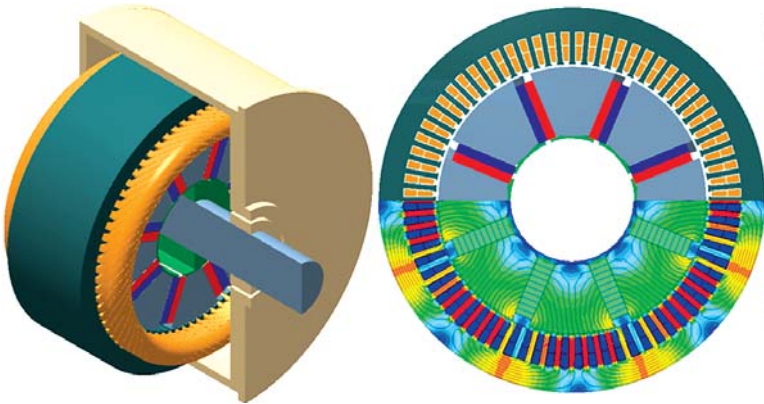


Рис. 1. Магнитная система электродвигателя с внутренним ротором

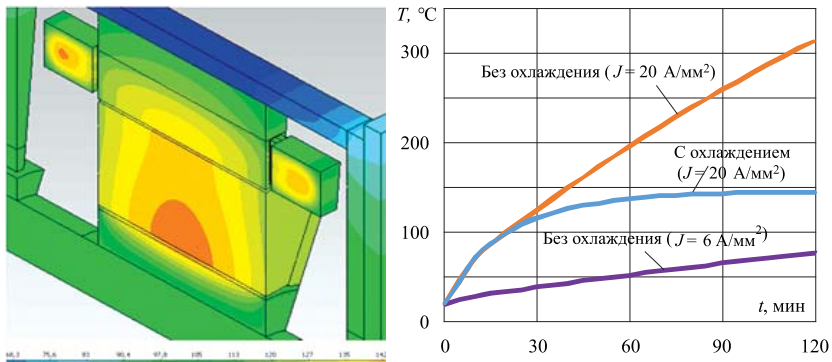


Рис. 2. Тепловой расчет электродвигателя с внутренним ротором а – тепловая картина электродвигателя с жидкостным охлаждением при $J = 20 \text{ А/мм}^2$; б – зависимость температуры магнитов от времени нагрева

каналов, расположенных равномерно по всей внешней поверхности корпуса электродвигателя и сориентированных вдоль оси вращения электродвигателя.

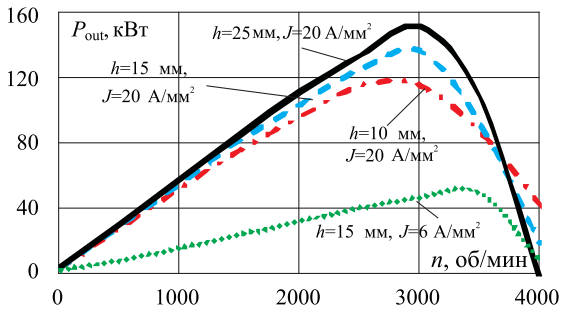
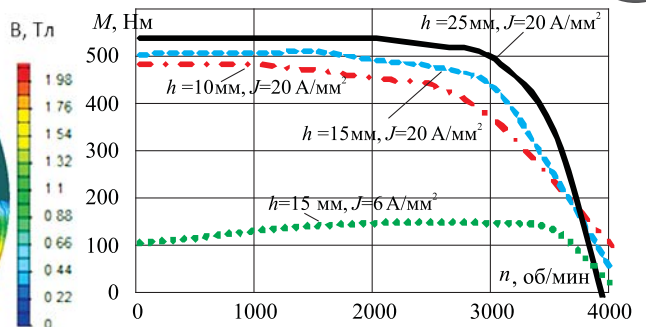


Рис. 3. Характеристики электродвигателя с внутренним ротором: зависимость момента на валу (а) и выходной мощности от частоты вращения ротор (б)

По этим каналам с помощью циркуляционного насоса прокачивается теплоноситель (вода) с заданной скоростью и заданной начальной температурой. Перемещаясь по каналам системы охлаждения теплоноситель отбирает тепло, выделяемое обмотками электродвигателя.

Исходные данные для теплового расчета следующие: количество каналов охлаждения – $n_k = 100$; форма каналов охлаждения – круглая; диаметр каналов охлаждения $d_k = 3 \text{ мм}$; начальная температура на входе в каналы охлаждения – 40°C , тем-

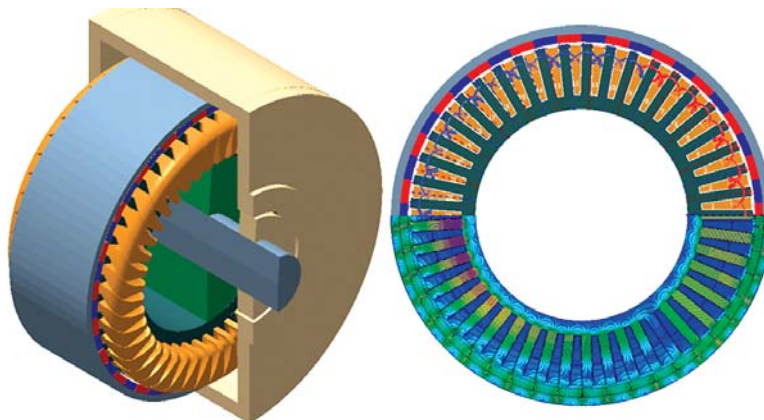


Рис. 4. Магнитная система электродвигателя с внешним ротором

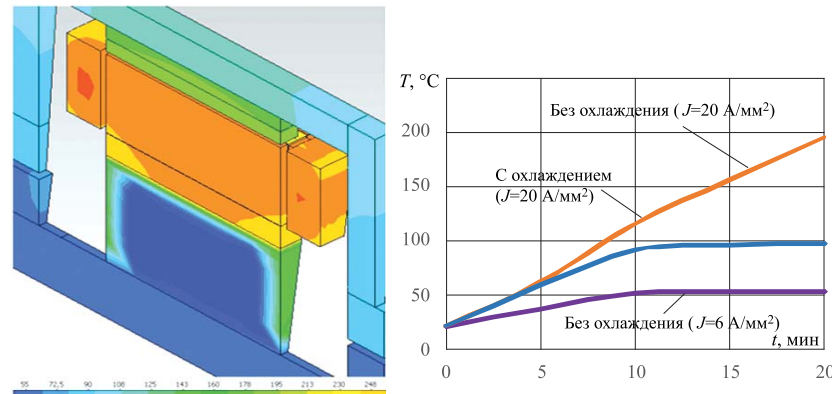


Рис. 5. Тепловой расчет электродвигателя с внешним ротором а – тепловая картина электродвигателя без охлаждения при плотности тока $J = 20 \text{ А/мм}^2$; б – зависимость температуры магнитов от времени нагрева

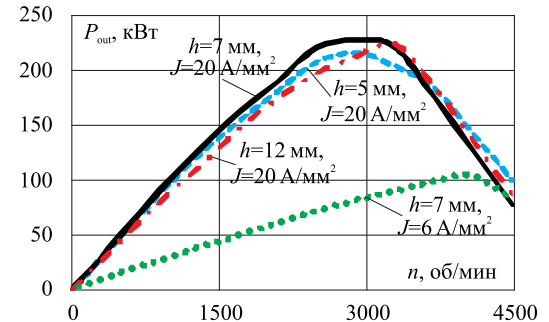
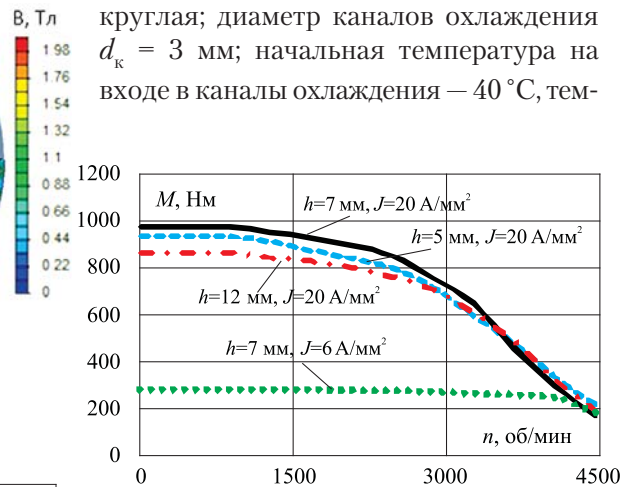


Рис. 6. Характеристики электродвигателя с внешним ротором: зависимость момента на валу (а) и выходной мощности от частоты вращения ротора (б)



пература окружающей среды — 20 °С, производительность циркуляционного насоса — $Q = 6$ л/мин.

На Рис. 2, а приведена картина теплового поля электродвигателя с внутренним ротором при плотности тока в обмотках равной $J = 20$ А/мм², на Рис. 2, б — зависимость температуры магнитов от времени нагрева для двух значений плотности тока в обмотках равных соответственно $J = 6$ А/мм² и $J = 20$ А/мм².

Как видно из приведенных графиков при отсутствии циркуляционного жидкостного охлаждения при плотности тока $J = 20$ А/мм² магниты нагреваются через 120 минут до температуры 310 °С, что совершенно недопустимо т.к. магниты марки N40SH имеют температурную стабильность до $T_w = 150$ °С. При жидкостном охлаждении с производительностью циркуляционного насоса равной $Q = 6$ л/мин температура магнитов при плотности тока $J = 20$ А/мм² не превышает 150 °С, температура обмоток статора — 160 оС, что допустимо для изоляции класса F. При плотности тока $J = 6$ А/мм² температура магнитов через 120 минут нагрева равна 75 °С, а температура обмоток — 78 °С, что допустимо как для магнитов типа N40SH, так и для изоляции класса F. Однако, как будет показано далее, электромагнитный момент и мощность для этой плотности тока в несколько раз меньше. Таким образом, используя жидкостное охлаждение можно для данной конфигурации магнитной системы и параметров системы охлаждения повысить плотность тока до $J = 20$ А/мм², при этом температура нагрева основных компонентов электродвигателя не превышает предельно допустимых значений.

На Рис. 3 приведены рабочие характеристики электродвигателя с внутренним ротором. Зависимость электромагнитного момента на валу электродвигателя и выходной мощности определялась для трех значений толщины постоянных магнитов и двух значений плотности тока. Поскольку одним из самых дорогих компонентов электродвигателя являются постоянные магниты, то рабочие характеристики рассчитывались при плотности тока $J = 20$ А/мм² для трех значений толщины постоянных магнитов — $h = 25$ мм, $h = 15$ мм, $h = 10$ мм. При плотности тока $J = 20$ А/мм² для диапазона частоты вращения $n = 100 \div 1000$ об/мин электромагнитный момент двигателя при толщине магнитов $h = 25$ мм равен $M_{(h=25)} = 535$ Нм, при толщине магнитов $h = 20$ мм — $M_{(h=15)} = 507$ Нм и для $h = 20$ мм — $M_{(h=15)} = 480$ Нм. При частоте вращения $n = 3000$ об/мин мощность на валу электродвигателя для этих трех значений толщины магнитов соответственно равна: $P_{(h=25)} = 150$ кВт; $P_{(h=15)} = 137$ кВт; $P_{(h=10)} = 114$ кВт. Общая масса постоянных магнитов в зависимости от их толщины следующая: $m_{(h=25)} = 7.5$ кг; $m_{(h=15)} = 4.5$ кг; $m_{(h=10)} = 3$ кг.

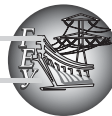
Следует подчеркнуть, что масса магнитов при их толщине равной соответственно 25 и 15 мм отличается на $K_{m(h=25)/m(h=15)} = 66.7\%$, тогда как мощность при

$n = 3000$ об/мин отличается всего на $K_{P(h=25)/P(h=15)} = 9.5\%$, если сравнивать эти показатели для магнитов с толщиной 15 и 10 мм, то они соответственно равны — $K_{m(h=15)/m(h=10)} = 50\%$ и $K_{P(h=15)/P(h=10)} = 20.2\%$. Поэтому за базовую следует принять конфигурацию магнитной системы с толщиной магнитов $h = 15$ мм. На Рис. 3 также для сравнения приведены рабочие характеристики при плотности $J = 6$ А/мм² и толщине магнитов $h = 15$ мм. Результаты расчета показывают, что мощность и момент при толщине магнитов 15 мм для плотности тока $J = 20$ А/мм² и $J = 6$ А/мм² отличаются в три раза. Таким образом, применение жидкостного охлаждения для этого двигателя позволяет существенно повысить электромагнитный момент и мощность.

На втором этапе исследовались характеристики электродвигателя с внешним ротором, при этом габариты магнитной системы приняты такими же, как и для двигателя с внутренним ротором. Основные размеры исследуемого электродвигателя приведены в Табл. 1. На Рис. 4 показан общий вид и картина распределения магнитной индукции электродвигателя с внешним ротором. Предварительные численные исследования показали, что характеристики магнитной системы без полюсных наконечников не существенно отличаются от характеристик двигателя с полюсными наконечниками, но для двигателя без полюсных наконечников возможно размещение обмоток на каждом зубце статора. При этом обмотки могут наматываться на оправке из медной фольги нужной высоты и толщины, а лобовые части таких катушек будут иметь минимальный размер. Обмотки данного двигателя (Рис. 4, б) состоят из трех фаз, в каждой из которых имеется 5 групп, соединённых последовательно, а в каждой группе по три параллельно соединенных катушки, соединение фаз — "звезда". На этом рисунке также приведена картина магнитного поля при плотности тока равной $J = 20$ А/мм². В результате расчетов установлено, что при данной плотности тока магнитная система не насыщена, максимальная индукция в спинке статора равна $B_c = 1.4$ Тл, а в зубцах статора — $B_z = 1.7$ Тл.

Тепловой расчет электродвигателя с внешним ротором осуществлялся в пакете Infolytica Motor-Solve. Предварительные расчеты показали, что для данного типа электродвигателя система охлаждения, состоящая из ряда каналов, расположенных равномерно по всей внутренней поверхности ротора электродвигателя менее эффективна, чем тип охлаждения распылением на лобовые части обмоток с помощью форсунок. Параметры системы охлаждения с помощью форсунок следующие: количество форсунок с каждой стороны статора — $n_\phi = 2$; диаметр форсунок — $d_\phi = 3.5$ мм; расход теплоносителя — $Q = 6$ л/мин, начальная температура на входе в каналы охлаждения — 40 °С, температура окружающей среды — 20 °С.

На Рис. 5, а показана тепловая картина электродвигателя с внешним ротором без охлаждения при



плотности тока $J = 20 \text{ А/мм}^2$ для времени нагрева $t = 20$ мин. Из этой тепловой картины видно, что обмотки двигателя нагреваются существенно выше допустимой температуры. На Рис. 5, б – приведена зависимость температуры магнитов от времени нагрева для двух значений плотности тока в обмотках равных соответственно $J = 6 \text{ А/мм}^2$ и $J = 20 \text{ А/мм}^2$. Как видно из приведенных графиков при отсутствии охлаждения при плотности тока $J = 20 \text{ А/мм}^2$ магниты нагреваются через 20 минут до температуры $193 \text{ }^\circ\text{C}$, что превышает предельную температуру нагрева для магнитов марки N40SH. При жидкостном охлаждении с помощью форсунок температура магнитов при плотности тока $J = 20 \text{ А/мм}^2$ не превышает $95 \text{ }^\circ\text{C}$, температура обмоток статора – $100 \text{ }^\circ\text{C}$, что допустимо для изоляции класса F. При плотности тока $J = 6 \text{ А/мм}^2$ температура нагрева магнитов через 20 минут равна $52 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако при этой плотности тока электромагнитный момент и мощность электродвигателя существенно ниже. Таким образом для электродвигателя с внешним ротором, используя систему охлаждения на основе струйного распыления жидкости на лобовые части обмоток, можно повысить плотность тока до $J = 20 \text{ А/мм}^2$, при этом температура нагрева основных компонентов электродвигателя не превышает предельно допустимых значений.

На Рис. 6 приведены рабочие характеристики электродвигателя с внешним ротором. Зависимость электромагнитного момента на валу электродвигателя и выходной мощности определялась для трех значений толщины постоянных магнитов: $h = 5 \text{ мм}$, $h = 7 \text{ мм}$, $h = 12 \text{ мм}$ и двух значений плотности тока: $J = 6 \text{ А/мм}^2$, $J = 20 \text{ А/мм}^2$.

При плотности тока $J = 20 \text{ А/мм}^2$ для диапазона частоты вращения $n = 100 \div 1000 \text{ об/мин}$ электромагнитный момент двигателя при толщине магнитов $h = 5 \text{ мм}$ равен $M_{(h=5)} = 930 \text{ Нм}$, при толщине магнитов $h = 7 \text{ мм}$ – $M_{(h=7)} = 970 \text{ Нм}$ и для $h = 12 \text{ мм}$ – $M_{(h=12)} = 855 \text{ Нм}$. При частоте вращения $n = 3000 \text{ об/мин}$ мощность на валу электродвигателя для этих трех значений толщины магнитов соответственно равна: $P_{(h=5)} = 214 \text{ кВт}$; $P_{(h=7)} = 227 \text{ кВт}$; $P_{(h=12)} = 211 \text{ кВт}$. Общая масса постоянных магнитов в зависимости от их толщины следующая: $m_{(h=5)} = 3.4 \text{ кг}$; $m_{(h=7)} = 4.8 \text{ кг}$; $m_{(h=12)} = 7.9 \text{ кг}$.

Анализируя эти графики, следует отметить, что максимальное значение момента и мощности получено для толщины магнитов равной $h = 7 \text{ мм}$. Меньшее значение электромагнитного момента и мощности для магнитов толщиной $h = 12 \text{ мм}$ объясняется тем, что при одинаковом внешнем диаметре и большей толщине магнитов радиус приложения момента меньше, поэтому и момент меньше. На Рис. 6 также для сравнения приведены рабочие характеристики при плотности $J = 6 \text{ А/мм}^2$ и толщине магнитов $h = 7 \text{ мм}$. Результаты расчета показывают, что для диапазона частоты вращения $n = 100 \div 1000 \text{ об/мин}$ электро-

Таблица 1. Сравнение основных параметров электродвигателей

Параметр	С внутренним ротором	С внешним ротором
Число пазов статора – Z	72	45
Число полюсов ротора – p	8	46
Номинальная частота вращения – n, об/мин	3000	3000
Диаметр магнитной системы наружный – D _н , мм	313	313
Диаметр статора наружный – d _{сст} , мм	313	282
Диаметр статора внутренний – d _{ст} , мм	133	174
Аксиальная длина – l _{гс} , мм	100	100
Рабочий зазор – δ, мм	1,5	1,5
Масса активной части (без подшипниковых щитов и системы охлаждения) – m _а , кг	48,6	37,9
Тип постоянных магнитов	N40SH	N40SH
Остаточная индукция магнитов – B _r , Тл	1,26	1,26
Размеры магнитов, мм	50×15×100	20×7×100
Количество магнитов, шт.	8	46
Масса магнитов – m _{пм}	4,5	4,8
Момент при частоте вращения 1000 об/мин, Нм	507	950
Мощность при частоте вращения 1000 об/мин, кВт	54	100
Момент при частоте вращения 3000 об/мин, Нм	430	670
Мощность при частоте вращения 3000 об/мин, кВт	137	225
Напряжение питания, В	600	600
Номинальная плотность тока, А/мм ²	20	20

магнитный момент при толщине магнитов $h = 7 \text{ мм}$ и плотности тока $J = 20 \text{ А/мм}^2$ в 3,5 раза больше, чем при $J = 6 \text{ А/мм}^2$, а мощность для частоты вращения $n = 3000 \text{ об/мин}$ отличаются в 2,8 раза. Таким образом и для электродвигателя с внешним ротором применение охлаждения позволяют существенно повысить электромагнитный момент и мощность.

В Табл. 1 приведены основные параметры для электродвигателей с внутренним и внешним ротором. Следует отметить, что при одинаковых габаритах магнитной системы двух типов электродвигателей при частоте вращения $n = 1000 \text{ об/мин}$ мощность и момент у двигателя с внешним ротором в 1,9 раза больше, чем у двигателя с внутренним ротором, а при частоте вращения $n = 3000 \text{ об/мин}$ соответственно в 1,6 раза.

В Табл. 2 приведено сравнение масс активных материалов двух типов электродвигателей. Анализируя данные, приведенные в Табл. 2, следует отметить, что общая масса активных материалов электродвигателя с внутренним ротором для оптимальной толщины магнитов ($h = 15 \text{ мм}$) составляет – 48,6 кг, а для электродвигателя с внешним ротором для оптимальной толщины магнитов ($h = 7 \text{ мм}$) составляет – 37,9 кг, т.е. в 1,3 раза меньше.

Отношение электромагнитного момента к массе активных частей при частоте вращения $n = 1000 \text{ об/мин}$ для электродвигателя с внутренним ротором равно $k_{M_inner} = 10.4 \text{ Нм/кг}$, для электродвигателя с внешним ротором – $k_{M_outer} = 25 \text{ Нм/кг}$. Отношение мощности к массе активных частей при частоте вращения $n = 3000 \text{ об/мин}$ для электродвигателя с внутренним ротором равно $k_{P_inner} = 2.8 \text{ кВт/кг}$, для электродви-

Таблица 2. Сравнение массы активных материалов электродвигателей

Наименование \ Толщина магнитов, мм	С внутренним ротором			С внешним ротором		
	10	15	25	5	7	12
Масса стали ротора, кг	18,1	16,4	13,0	6,7	5,26	6,9
Масса магнитов ротора, кг	3,0	4,5	7,5	3,4	4,80	7,9
Масса сердечника статора, кг	20,8	20,8	20,8	17,5	17,51	15,7
Масса обмотки статора, кг	6,9	6,9	6,9	10,4	10,36	9,0
Общая масса активных материалов, кг	48,8	48,6	48,2	38,0	37,9	39,6



гателя с внешним ротором — $k_{P_outer} = 5.9$ кВт/кг. Таким образом численные исследования показали, что при равных габаритах магнитной системы электродвигатель с внешним ротором имеет существенно большие значения мощности и электромагнитного момента.

Выводы

1. Проведено численное исследование характеристик электродвигателей на постоянных магнитах с внутренним и внешним ротором и показано, что при жидкостном охлаждении можно увеличить плотность тока до $J = 20$ А/мм², обеспечив увеличение электромагнитного момента примерно в 3 раза по сравнению с номинальной плотностью тока для электродвигателя с внутренним ротором и в 3,5 раза — для электродвигателя с внешним ротором.

2. Для заданных габаритных размеров электродвигателей определены оптимальные размеры магнитной системы и толщина постоянных магнитов, при которых обеспечивается оптимальное соотношение между массой магнитов и мощностью электродвигателей.

3. Сопоставление характеристик электродвигателей на постоянных магнитах с внешним и внутренним ротором показало, что при равных габарит-

ных размерах электродвигатель с внешним ротором имеет лучшие характеристики. При жидкостном охлаждении и частоте вращения $n = 1000$ об/мин электромагнитный момент для электродвигателя с внутренним ротором равен $M_{(inner)} = 507$ Нм, а для электродвигателя с внешним ротором — $M_{(outer)} = 950$ Нм, т.е. в 1.9 раза больше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумов Ю.Н. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок) // Электричество. — 2016. — №1. — С. 55–65.
2. <http://emrax.com/products/emrax-348/>
3. <https://www.yasa.com/yasa-p400/>
4. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Исследование мотор-колеса для электромобиля с электродвигателем и редуктором на постоянных магнитах с учетом городского и загородного ездовых циклов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ": зб. наук. пр. Вип. 5 (1281). Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. — 2018. — С. 83 — 89.
5. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Влияние жидкостного охлаждения на характеристики электрической машины с постоянными магнитами // Праці ІЕД НАНУ: Зб. наук. пр., 2016. — Вип. 45. — С.63–69.
6. <http://www.infolytica.com/en/applications/ex0106/>

© Гребеников В.В., 2018

