

УДК 621.3.01,621.313

ВЛИЯНИЕ ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В.В. Гребеников, докт. техн. наук, **М.В. Прыймак**, инж. I кат.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев-57, 03680, Украина
e-mail: elm1153@gmail.com

Изложены результаты расчета и экспериментального исследования характеристик электрической машины с постоянными магнитами для двух типов конфигурации магнитной системы ротора. Проведены тепловые расчеты и показано, что при жидкостном охлаждении можно существенно повысить удельные характеристики электрической машины с постоянными магнитами. Тепловые расчеты проведены в пакете Comsol, расчеты магнитостатики и внешние характеристики рассчитаны соответственно в пакетах Magnet и MotorSolve, предоставленных компанией Infolytica. Библ. 6, рис. 7, таблица.

Ключевые слова: постоянные магниты, электрическая машина, магнитное поле, экспериментальные исследования, внешняя характеристика.

Электрические машины с электронной коммутацией и постоянными магнитами всё шире применяются во многих областях техники. Примером могут быть электропривод транспортных устройств, электродвигатели для привода судовой техники и подводных роботов, а также многие другие технические устройства, для которых необходимы регулирование, высокая динамика, минимальные объём и масса. Конструкции электродвигателей непрерывно совершенствуются, при этом стремятся получить наибольшие удельные мощности (Нм/кг, кВт/кг), максимум момента или силы, высокий КПД, уменьшенные пульсации момента и шумов, высокую динамику, уменьшенную массу и меньший занимаемый объём при сохранении на том же уровне электромагнитной мощности и развиваемого электромагнитного момента.

При разработке электрических машин с постоянными магнитами одной из основных задач является обеспечение как высоких электрических (линейная токовая нагрузка A_a), так и магнитных (магнитная индукция в рабочем зазоре B_δ) нагрузок. Как магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ , так и линейная токовая нагрузка якоря A_a являются важнейшими электромагнитными параметрами электромеханического преобразователя энергии, определяющими степень использования активных материалов и габаритные размеры машины заданной мощности. В рационально спроектированной ЭМ произведение $A_a \times B_\delta$ должно быть как можно большим.

Однако это не всегда выполнимо. Поэтому для обеспечения максимальной индукции в рабочем зазоре осуществляется поиск оптимальной конфигурации магнитной системы, а для обеспечения максимальной токовой нагрузки применяют жидкостное охлаждение, благодаря которому возможно существенно повысить плотность тока в фазах электрической машины.

Крупные международные компании осуществляют массовое производство электродвигателей с постоянными магнитами и жидкостным охлаждением. Приведем характеристики некоторых из них.

EVO Electric (Великобритания) производит электродвигатели серии AFM-140, основные технические характеристики которых следующие: $n_{\max} = 5000$ об/мин; $M_{\max} = 400$ Нм; $M_n = 220$ Нм; $P_{\max} = 167,5$ кВт; $P_n = 75$ кВт; $\eta = 96,5\%$; $D \times L = 380 \times 115,2$ мм; $m = 40$ кг; $M_{уд} = 5,5$ Нм/кг; $P_{уд} = 1,88$ кВт/кг; жидкостное охлаждение [3, 4].

YASA motors (Великобритания) серийно производит электродвигатели с масляным охлаждением, характеристики одного из которых следующие: серия – YASA-50R; $n_{\max} = 3250$ об/мин; $M_{\max} = 790$ Нм; $M_n = 400$ Нм; $P_n = 70$ кВт; $\eta = 95\%$; $D \times L = 400 \times 222$ мм; $m = 37$ кг; $M_{уд} = 10,8$ Нм/кг; $P_{уд} = 1,89$ кВт/кг [5].

ТМ 4 *Electrodinamic System* (Канада) выпускает электродвигатели серии HSM35-96V185, технические характеристики которых следующие: $n_{\max} = 6500$ об/мин; $M_{\max} = 185$ Нм; $M_n = 70$ Нм; $P_{\max} = 50$ кВт; $P_n = 28$ кВт; $\eta = 97\%$; $m = 30$ кг; $M_{уд} = 2,33$ Нм/кг; $P_{уд} = 0,93$ кВт/кг [3, 6].

Целью этой статьи является сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей электрических машин с двумя типами роторов с постоянными магнитами, а также анализ влияния жидкостного охлаждения на удельные характеристики электрических машин.

Для проверки адекватности разработанных компьютерных моделей было изготовлено два ротора с постоянными магнитами. При этом использовался статор от асинхронного двигателя АИР80В8У2 [1]. Основные данные такого двигателя следующие: номинальное напряжение при соединении обмоток статора в «звезду» $U_n = 380$ В, номинальный ток $I_n = 2,1$ А, номинальная мощность $P_n = 0,55$ кВт, номинальная частота вращения $n = 690$ об/мин, КПД – 65 %, $\cos \varphi = 0,6$.

Конфигурация магнитной системы исследуемых моделей и их размеры показаны на рис. 1. На рис. 1 а представлена модель М1, ротор которой имеет восемь постоянных магнитов, векторы намагниченности которых имеют тангенциальное направление. Для уменьшения зубцовых пульсаций электромагнитного момента в этой модели выполнен скос полюсов на роторе на одно зубцовое деление [2]. На рис. 1 б показана модель М2, ротор которой имеет восемь магнитов чередующейся намагниченности радиальной направленности.

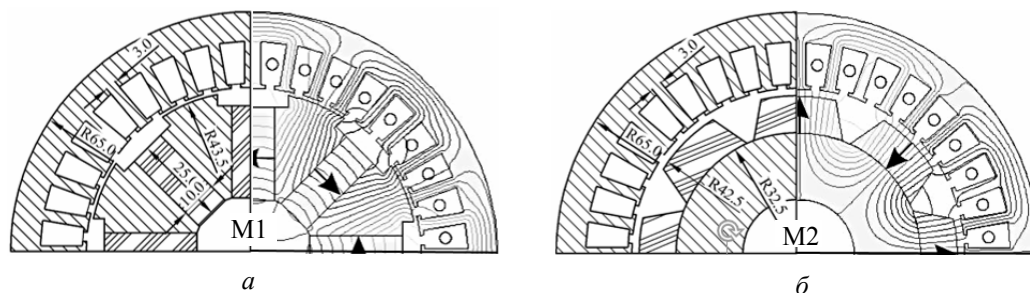


Рис. 1

Основные размеры исследуемых электрических машин следующие: наружный диаметр статора $D_a = 130$ мм; внутренний диаметр статора $D_i = 89$ мм; длина пакета статора $l_i = 100$ мм; число пазов статора $Z = 36$, число витков обмоток каждой фазы $W = 80$. Наружный диаметр ротора модели М1 $D_r = 87$ мм; размеры постоянных магнитов $25 \times 10 \times 100$ мм; количество магнитов 8 шт.; масса магнитов 1,5 кг. Наружный диаметр ротора модели М2 $D_r = 85$ мм; размеры постоянных магнитов: наружный диаметр $d_{нар} = 85$ мм, внутренний диаметр $d_{вн} = 65$ мм; ширина магнитов у основания 23 мм; ширина магнитов у вершины 19 мм; количество магнитов 8 шт.; масса магнитов 1,28 кг.

Расчет магнитного поля производился в программном пакете *Infolytica Magnet* при следующих условиях: остаточная индукция магнитов модели М1 $B_r = 1,24$ Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной $\mu_{пм} = 1,07$; для модели М2 $B_r = 1,08$ Тл, $\mu_{пм} = 1,06$; магнитопровод ротора для модели М1 и М2 – конструкционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали); магнитопровод статора для этих моделей – сталь СТ2211. Фазы статора включаются следующим образом: А(+), В(-), С(0); в расчетах плотность тока задавалась равной $J = 5,0 \dots 25,0$ А/мм² с шагом 5,0 А/мм²; коэффициент заполнения паза медью принят равным $k_s = 0,4$. На рис. 1 показаны линии равного магнитного потенциала исследуемых моделей. В результате расчетов установлено, что спинка статора не насыщена, при плотности тока $J = 5,0$ А/мм² индукция в спинке статора $B_c = 1,65$ Тл, при $J = 25,0$ А/мм² максимальная индукция в спинке составляет 1,8 Тл. Индукция в зубцах статора следующая: при $J = 5,0$ А/мм² $B_z = 1,94$ Тл; при $J = 25,0$ А/мм² $B_z = 2,2$ Тл.

Зависимость электромагнитного момента (рис. 2), действующего на ротор, от угла поворота ротора для исследуемых моделей вычислялась 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 45° (геометрических градусов). На рис. 1 *а* показаны зависимости электромагнитного момента для пяти значений плотности тока модели М1, на рис. 1 *б* – М2.

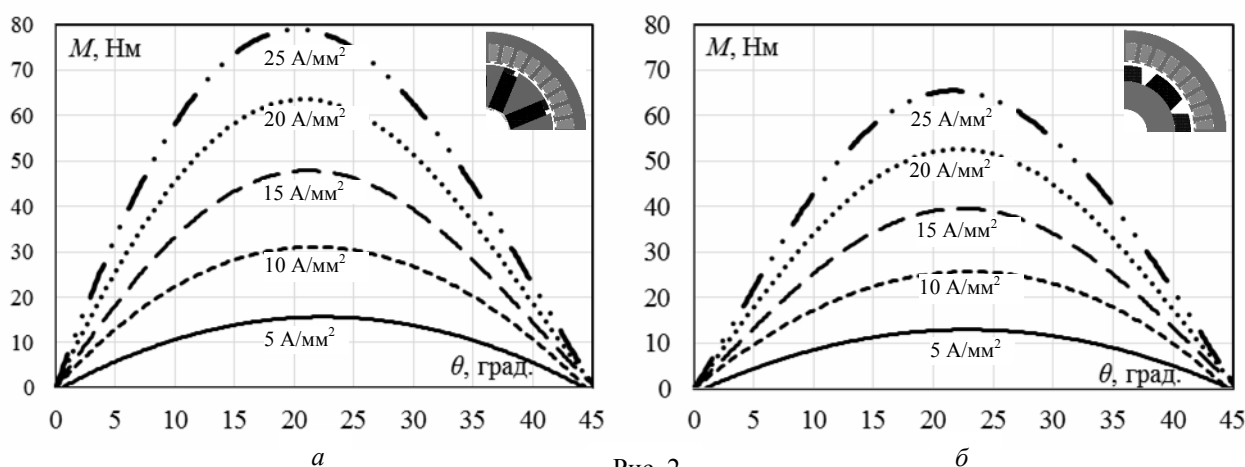


Рис. 2

Программный пакет *Infolytica Magnet* позволяет учесть скос полюсов на роторе в двухмерной постановке, поэтому для модели М1 задавался скос полюсов, равный одному зубцовому делению. Для модели М2 пульсаций электромагнитного момента не наблюдалось ввиду специальной формы постоянных магнитов. В таблице приведены значения M_{cp} для пяти значений плотности тока в обмотках.

| | $J = 5 \text{ A/mm}^2$ | $J = 10 \text{ A/mm}^2$ | $J = 15 \text{ A/mm}^2$ | $J = 20 \text{ A/mm}^2$ | $J = 25 \text{ A/mm}^2$ |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Модель М2, M_{cp} (Нм) | 12,6 | 25,1 | 37,5 | 49,8 | 61,9 |
| Модель М1, M_{cp} (Нм) | 15,2 | 30,3 | 45,2 | 60,0 | 74,5 |
| Расхождение, % | 17,4 | 17,1 | 17,0 | 16,9 | 16,9 |

Средний электромагнитный момент M_{cp} , вычисляемый для зоны коммутации, которая определяется числом полюсов на роторе и в данном случае равна 30° (геометрических градусов), примерно на 17 % больше для модели М1. Объясняется это тем, что масса магнитов модели М1 на 15 % больше, чем масса магнитов модели М2. Однако, как показывают численные исследования, даже при равной массе средний электромагнитный момент больше у модели М1 с тангенциально намагниченными магнитами, между которыми находятся ферромагнитные концентраторы магнитного потока [2].

Для проверки достоверности компьютерных моделей разработаны и изготовлены две электрические машины, основные размеры которых представлены на рис. 1. Испытания электрических машин в режиме генератора проводились на специальном стенде. При испытаниях электрогенератора в качестве приводного двигателя использовался двигатель постоянного тока, скорость вращения которого регулировалась с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) и выпрямителя. Обмотки электрогенератора с постоянными магнитами на роторе соединялись в «звезду». Выводы обмоток подключались к трехфазному выпрямителю (схема Ларионова), в качестве нагрузки (R_H) использовался реостат с переменным сопротивлением.

По результатам измерений при различных значениях сопротивления нагрузки получено ряд зависимостей, характеризующих работу электрогенератора. Для сравнения экспериментальных величин с расчетными в пакете *Infolytica Magnet* была создана электрическая схема трехфазного выпрямителя с активным сопротивлением в качестве нагрузки (R_H), которая присоединялась к клеммам обмоток электродвигателя. При определении внешних харак-

теристик в режиме генератора на каждом шаге по времени осуществлялась связь между расчетом электромагнитных величин с электрическими.

На рис. 3 показаны внешние характеристики исследуемых моделей электрических машин в режиме генератора $U_{\phi} = f(I_{\phi})$, полученные экспериментальным и численным путем. На рис. 3 а приведены внешние характеристики модели М1 для трех значений скорости вращения ротора электрогенератора: $n = 275$ об/мин, $n = 410$ об/мин, $n = 550$ об/мин. На рис. 3 б приведены характеристики модели М2 для таких же значений скорости вращения ротора. Экспериментальные зависимости на этих рисунках обозначены сплошными кривыми, расчетные – пунктирными. Расхождение между результатами, полученными экспериментальным и численным путем, не превышает 5 %.

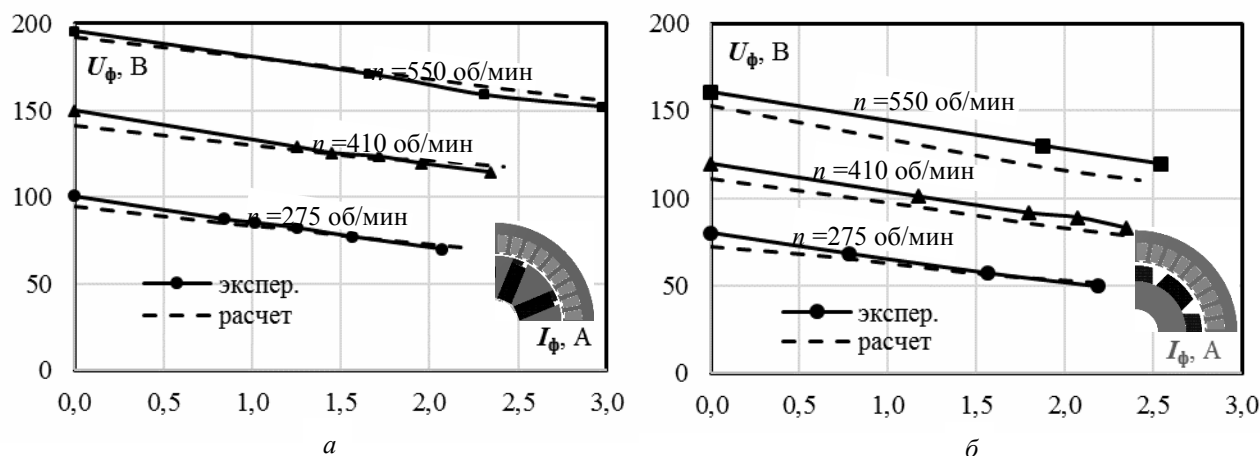


Рис. 3

Таким образом, результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений подтверждают адекватность разработанных компьютерных моделей с существенно различной конфигурацией магнитной системы исследуемых электрических машин.

Рабочие характеристики электродвигателя М1 и М2, рассчитанные в программном пакете *Infolytica MotorSolve*, при номинальной плотности тока в обмотках, равной $J = 5$ А/мм², представлены на рис. 4. На этом рисунке приведены зависимости электромагнитного момента $M = f(n)$ и мощности на валу $P = f(n)$ от частоты вращения ротора. Результаты численных исследований рабочих характеристик показали, что модель М1 обладает лучшими показателями по сравнению с моделью М2. Для электродвигателя М1 максимум момента ($M_{(M1)} = 12,7$ Нм) и мощности ($P_{M1} = 0,57$ кВт) наблюдается при частоте вращения ротора, равной $n = 410$ об/мин, для электродвигателя М2 соответственно при частоте $n = 410$ об/мин – $M_{(M2)} = 10,8$ Нм, $P_{M1} = 0,57$ кВт.

Номинальная мощность асинхронного двигателя АИР80В8У2, как уже отмечалось, при частоте вращения $n = 680$ об/мин составляет $P_n = 0,55$ кВт. Из-за большей индукции в зазоре в исследуемых моделях с постоянными магнитами и противоЭДС больше, чем у асинхронного двигателя АИР80В8У2, поэтому и частота вращения ротора при том же числе витков будет меньше. Для увеличения частоты вращения и соответственно снижения противоЭДС необходимо уменьшить число витков, тогда в тех же габаритах при номинальной плотности тока можно получить мощность примерно в 1,5 раза больше.

С целью обеспечения повышения удельных показателей электродвигателей (кВт/кг, Нм/кг), применяемых в транспортных средствах, необходимо использовать жидкостное охлаждение с принудительной циркуляцией охлаждающей жидкости. Для анализа теплового состояния исследуемых моделей при работе с перегрузкой (при плотности тока более чем $J = 5$ А/мм²) создана трехмерная модель сектора электродвигателя, равного одному полюсному делению. Данная модель (рис. 5 а) учитывает процессы теплообмена не только в объеме электродвигателя, но и в системе жидкостного охлаждения.

Система охлаждения представляет собой множество каналов, расположенных равномерно по всей внешней поверхности корпуса электродвигателя и сориентированных вдоль

оси вращения электродвигателя. По этим каналам с помощью циркуляционного насоса прокачивается теплоноситель (вода) с заданными скоростью и начальной температурой. Перемещаясь по каналам системы охлаждения, теплоноситель отбирает тепло, выделяемое обмотками электродвигателя. Тепловая модель учитывает пазовую изоляцию обмоток, зазор между

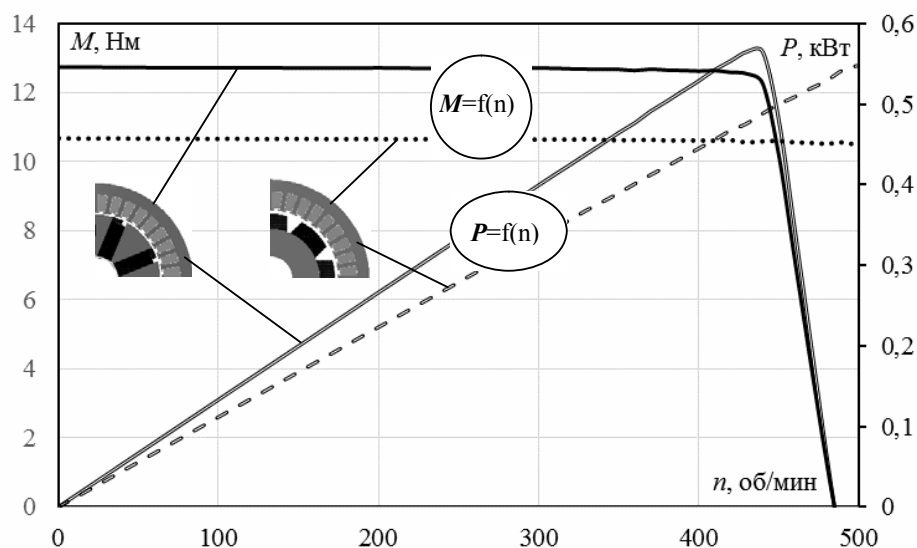


Рис. 4

магнитопроводом статора и его корпусом и изменение скорости теплоносителя по мере приближения к стенкам канала системы охлаждения. Тепловые расчеты выполнены в пакете *COMSOL*. Исходные данные для теплового расчета следующие: количество каналов охлаждения $n_k = 80$; форма каналов охлаждения круглая; диаметр каналов охлаждения $d_k = 3$ мм; начальная температура на входе в каналы охлаждения 40 °С.

На рис. 5 а показана картина теплового поля электродвигателя М1 при плотности тока в обмотках, равной $J = 20$ А/мм². На рис. 5 б для М1 приведена зависимость температуры обмоток от производительности циркуляционного насоса для двух значений плотности тока в обмотках, равных соответственно $J = 20$ А/мм² и $J = 25$ А/мм² для установившегося режима (время нагрева до установившейся температуры в зависимости от производительности циркуляционного насоса – 120...240 мин). Численные эксперименты показали, что для двигателя М2 температура нагрева всех частей отличается не более чем на 5 % по сравнению с электродвигателем М2. Из приведенных графиков видно, что при отсутствии циркуляционного жидкостного охлаждения обмотки при плотности тока $J = 20$ А/мм² нагреваются до температуры 320 °С, при плотности тока $J = 25$ А/мм² температура обмоток – 430 °С, что совершенно недопустимо. При производительности циркуляционного насоса, равной $Q = 2$ л/мин, температура обмоток статора при плотности тока $J = 20$ А/мм² не превышает 104 °С, температура магнитов – 100 °С, при плотности тока $J = 25$ А/мм² температура обмоток 140 °С, что допустимо для изоляции класса *F*, температура магнитов – 134 °С, что также допустимо, поскольку в настоящее время на рынке доступны высокотемпературные постоянные магниты. Например, магниты марки 40UH имеют остаточную индукцию $B_r = 1,28$ Тл и температурную стабильность до $T_w = 180$ °С, а магниты марки 38EH соответственно $B_r = 1,25$ Тл, $T_w = 200$ °С.

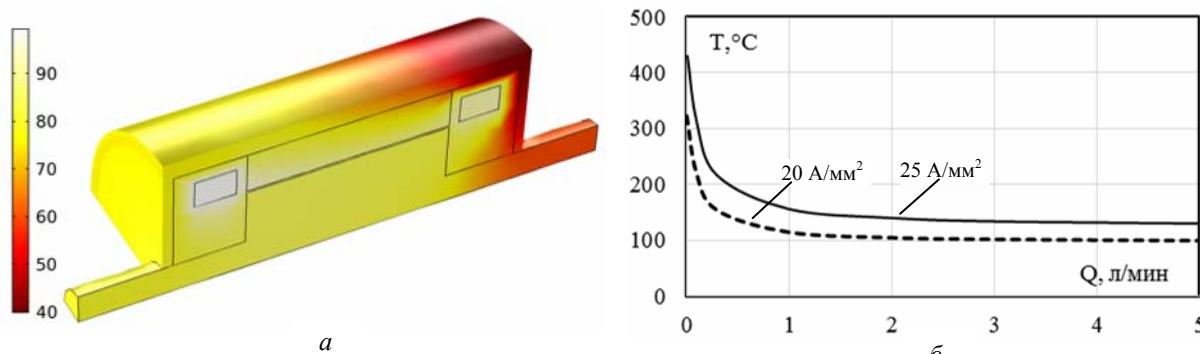


Рис. 5

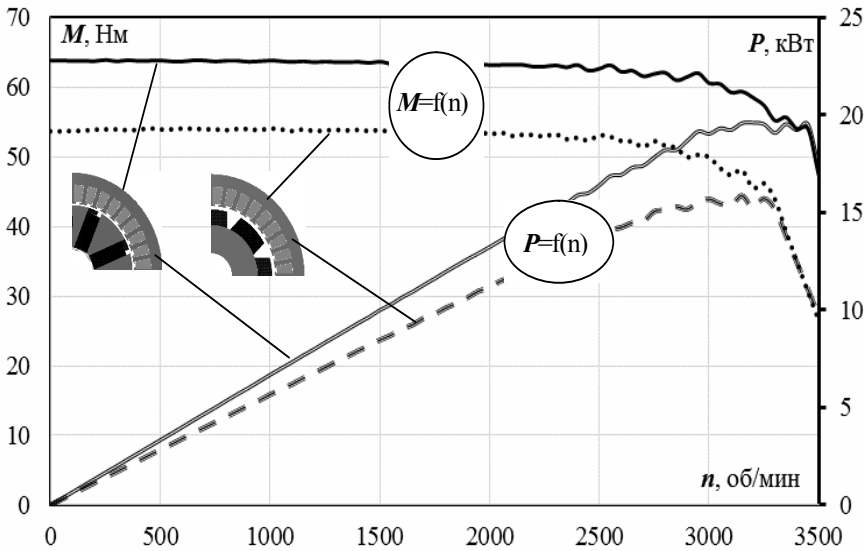


Рис. 6

$n = 3000$ об/мин, число витков обмотки статора для электродвигателя М1 должно быть равным $W = 12$, для двигателя М2 – $W = 12$.

При плотности тока $J = 25$ А/мм² для диапазона частоты вращения $n = 100...2000$ об/мин электромагнитный момент двигателя М1 составляет $M_{(M1)} = 63$ Нм, а для электродвигателя М2 крутящий момент составляет $M_{(M2)} = 53$ Нм. При частоте вращения $n = 3000$ об/мин мощность на валу электродвигателя М1 равна $P_{(M1)} = 19$ кВт, мощность электродвигателя М2 равна $P_{(M2)} = 15,6$ кВт. Следует подчеркнуть, что мощность асинхронного электродвигателя АИР80 для частоты вращения $n = 3000$ об/мин составляет $P = 2,2$ кВт.

Масса электродвигателей М1 и М2 равна $m \approx 15$ кг. Удельный момент (отношение электромагнитного момента к массе электродвигателя) для диапазона частоты вращения $n = 100...2000$ об/мин электродвигателя М1 составляет $M_{уд(M1)} = 4,2$ Нм/кг, для электродвигателя М2 – $M_{уд(M2)} = 3,5$ Нм/кг. Удельная мощность при частоте вращения $n = 3000$ об/мин следующая: $P_{уд(M1)} = 1,27$ кВт/кг, $P_{уд(M2)} = 1,04$ кВт/кг. Таким образом, при жидкостном охлаждении и увеличенной плотности тока электродвигатель М1 обладает лучшими удельными характеристиками и обеспечивает запас по мощности и моменту.

На рис. 7 приведены графики мощности на валу (P) и мощности электрических потерь во всех фазах обмотки статора (P_3) для электродвигателя М1 в зависимости от частоты вращения ротора при плотности тока, равной $J = 25$ А/мм². Мощность электрических потерь в обмотках электродвигателя рассчитана с учетом нагрева обмоток. Из этих зависимостей

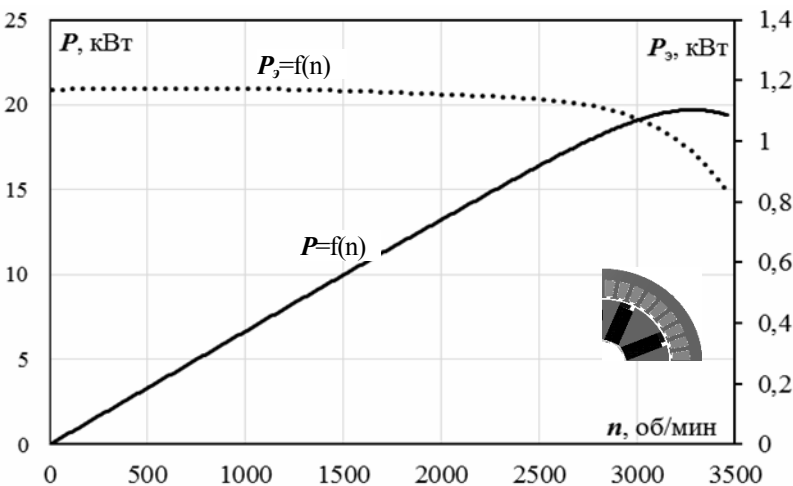


Рис. 7

Следует отметить, что при производительности циркуляционного насоса выше 2 л/мин температура обмоток снижается незначительно, поэтому нецелесообразно использовать насос большей производительности.

На рис. 6 приведены рабочие характеристики электродвигателей М1 и М2 при плотности тока $J = 25$ А/мм². Чтобы обеспечить частоту вращения ротора свыше

следует, что при повышении плотности тока в фазах увеличиваются активные потери в обмотках статора, но при этом достигается повышение удельных показателей электродвигателя. Удельный момент при плотности тока $J = 25$ А/мм² увеличивается примерно в пять раз по сравнению с номинальной плотностью тока, что является несомненным преимуществом при использовании электродвигателей для транспортных средств.

Выводы. 1. Проведено численне і експериментальне дослідження характеристик електричної машини з постійними магнітами для двох типів конфігурації магнітної системи ротора. Показано, що комп'ютерні моделі адекватно описують електричні машини з суттєво різною конфігурацією магнітної системи, оскільки середнє відхилення значень між експериментальними і розрахунковими характеристиками не перевищує 5 %.

2. Результати розрахунків підтверджують, що для даного габарита електричної машини і при рідинному охолодженні можна збільшити щільність струму до $J = 25 \text{ А/мм}^2$, забезпечив збільшення електромагнітного моменту приблизно в п'ять раз, по порівнянню з номінальною щільністю струму.

1. Гребеников В.В., Попков В.С., Богаєнко В.Н., Барабаш В.А., Гамалєя Р.Р., Приймак М.В. Влияние конфигурации магнитной системы ротора на характеристики электрической машины с постоянными магнитами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб наук. пр.– К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 37. – С. 53–57.
2. Гребеников В.В., Приймак М.В. Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами и зубцово-пазовым статором // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2010. – Вип. 27. – С. 52–58.
3. Шушов Ю.Н. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок) // Электричество. – 2016. – №1. – С. 55–65.
4. <http://www.gkn.com/driveline/our-solutions/edrive-systems/Documents/Datasheets/AF-140-Tech-Sheet-V13.pdf>
5. <http://www.yasamotors.com/wp-content/uploads/2015/09/YASA-750-Product-Sheet.pdf>
6. <https://www.tm4.com/products/high-speed-electric-powertrain/low-voltage-96-vdc/>

УДК 621.3.01,621.313

В.В. Гребеников, докт. техн. наук, **М.В. Приймак**, інж. I кат.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, м. Київ-57, 03057, Україна

Вплив рідинного охолодження на характеристики електричної машини з постійними магнітами

Викладено результати розрахунку і експериментального дослідження характеристик електричної машини з постійними магнітами для двох типів конфігурації магнітної системи ротора. Проведено теплові розрахунки і показано, що при рідинному охолодженні можна істотно підвищити питомі характеристики електричної машини з постійними магнітами. Теплові розрахунки проведені в пакеті Comsol, розрахунки магнітостатики і зовнішні характеристики розраховано відповідно в пакетах Magnet і MotorSolve, наданих компанією Infolytica. Бібл. 6, рис. 7, таблиця.

Ключові слова: постійні магніти, електрична машина, магнітне поле, експериментальні дослідження, зовнішня характеристика.

V.V. Grebenikov, M.V. Pryimak

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Influence of liquid cooling on characteristics of electric machine with permanent magnets

The results of calculation and experimental research of the characteristics of electric machine with permanent magnets for the two types of rotor magnetic system configuration are presented. The performed thermal calculations demonstrate that the liquid cooling can significantly improve specific characteristics of electric machine with permanent magnets. Thermal calculations are carried out by Comsol package, magnetostatics calculations and external characteristics are calculated respectively by Magnet and MotorSolve packages, supplied by Infolytica. References 6, figures 7, table.

Key words: permanent magnets, electric machine, magnetic field, experimental research, external characteristics.

Надійшла 15.11.2016

Received 15.11.2016