

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАО «НИПТИЭМ» В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Захаров Алексей Вадимович¹, Макаров Лев Николаевич², Скитович Светлана Вадимовна³

¹ ПАО «НИПТИЭМ», Владимир, Россия, zaharovav@ec.vemp.ru

² ООО «Русэлпром», Москва, Россия, makarov@ruselprom.ru

³ ПАО «НИПТИЭМ», Владимир, Россия, skitovich72@mail.ru

Аннотация: в работе представлены новые направления исследований в области электродвигателей переменного тока, проводимые ПАО «НИПТИЭМ». Это разработки в гибридов электродвигателей: синхронно-реактивных, синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов с короткозамкнутыми пусковыми обмотками. Сформулирована задача применения металломатричных алюминиевых композитов для повышения удельных показателей электрических машин.

Ключевые слова: синхронно-реактивные двигатели, синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, пусковая клетка, металломатричный алюминиевый композитный материал.

I. ВВЕДЕНИЕ

Снижение материалоемкости электрических машин переменного и постоянного тока – глобальная задача электромеханики с растущей во времени актуальностью. Эта задача может быть решена различными способами, из которых следует выделить следующие: применение новых материалов; использование альтернативных типов электрических машин, взамен традиционным.

II. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, а также синхронно-реактивные двигатели характеризуются повышенными значениями КПД в сравнении с асинхронными, но обладают существенным недостатком – отсутствием пускового момента, который не позволяет их применять в сетях переменного тока без преобразователей частоты. Этот недостаток может быть скомпенсирован за счет добавления в конструкцию ротора пусковой короткозамкнутой обмотки, осуществляющей асинхронный пуск машины. Такие электродвигатели являются гибридами асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (АЭД) и соответствующих машин (синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ); синхронно-реактивных электродвигателей (СРД)). В настоящее время ПАО «НИПТИЭМ» проводит исследования указанных гибридных двигателей. Нашей компанией разработано и изготовлено несколько образцов указанных электродвигателей. На рис. 1 приведен график запуска гибрида АЭД + СРД на вентиляторную нагрузку с

инерцией четырехкратной к инерции ротора. На рис. 2 приведен график запуска гибрида АЭД + СДПМ на вентиляторную нагрузку.

Анализ результатов моделирования запуска исследуемых двигателей показал, что запуск гибридов АЭД + СДПМ происходит тяжелее, чем у гибрида АЭД + СРД, так как в процессе присутствует существенный участок вращения на подсинхронной скорости. Исследования показали, что улучшение запуска гибридного двигателя АЭД+СДПМ следует получать за счет снижения сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора.

В таблице 1 приведены полученные экспериментально энергетические характеристики гибридов АЭД+СРД.

Таблица 1
Основные энергетические характеристики СРД+АЭД

Параметр	Значение		
	Тип двигателя		
	<i>160S4</i>	<i>160S6</i>	<i>160M6</i>
P_2 , кВт	15	15	18,5
U_1 , В	360	360	320
f_1 , Гц	50	50	50
I_1 , А	33,6	36,5	49,6
I_0 , А	11,3	16,3	23
КПД	93,4	90	92,1
$\cos\varphi$	0,77	0,73	0,73
I_{Π} , А	220	197	186
M , Нм	95,5	143,2	176,7
M_M , Нм	290	294	295
M_{Π} , Нм	55	457	442
Θ , °С	40	75	92

В таблице 1: P_2 – мощность, U_1 , f_1 – действующее значение напряжения и частота подводимого напряжения, I_1 , I_0 , I_{Π} – значения тока в номинальной

нагрузке на холостом ходу и при пуске, соответственно; M , M_M , M_{II} – значения момента в номинальном режиме, режиме максимальной нагрузки и при пуске, соответственно.

Электродвигатели были изготовлены опытным производством ПАО «НИПТИЭМ» и испытаны в лаборатории на сертифицированном оборудовании. При этом короткозамкнутая клетка роторов электродвигателей типоразмеров 160S4, 160S6 была изготовлена из алюминия литьем под давлением, а клетка электродвигателя типоразмера 160M6 была изготовлена из меди сваркой.

Анализ характеристик, показанных в таблице 1, показывает, что разработанные двигатели с $2p=6$, обладают не только высокими энергетическими характеристиками, но и хорошими пусковыми свойствами, что нельзя сказать о двигателях $2p=4$, активная часть которых должна быть перепроектирована.

В настоящее время наша компания разработала синхронно-реактивные двигатели с высотой оси вращения: 100, 132, 160, 280, 315 мм с $2p=4, 6$. Из них возможность литой алюминиевой клетки ротора рассматривалась на габаритах 100-160 мм.

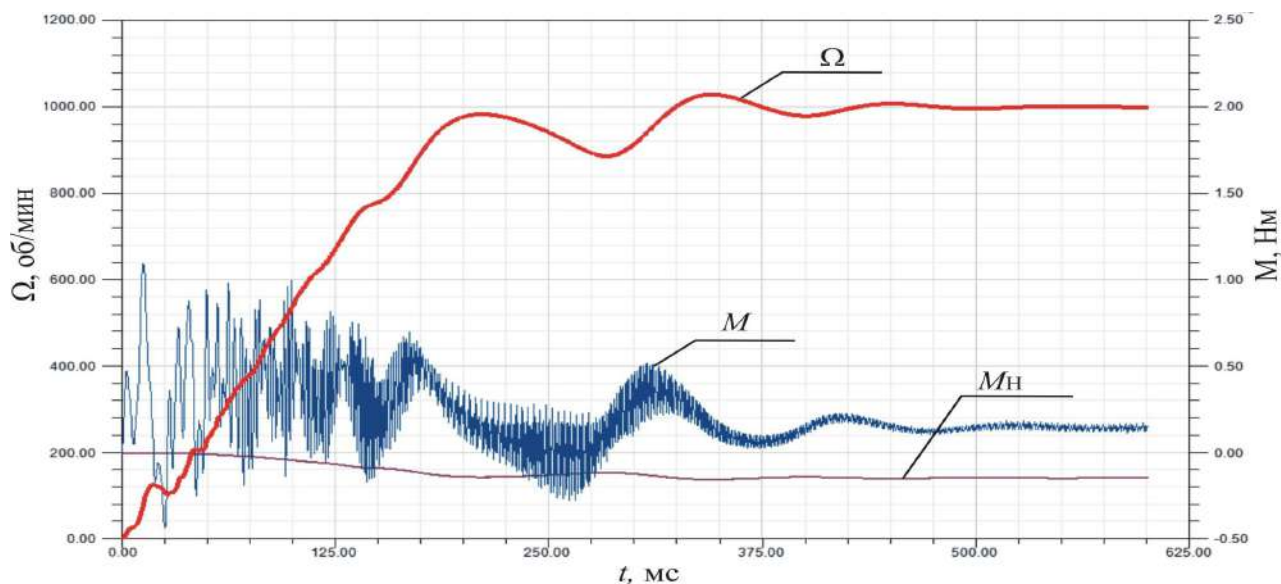


Рис. 1. Запуск синхронно-реактивного двигателя с короткозамкнутой пусковой обмоткой на роторе

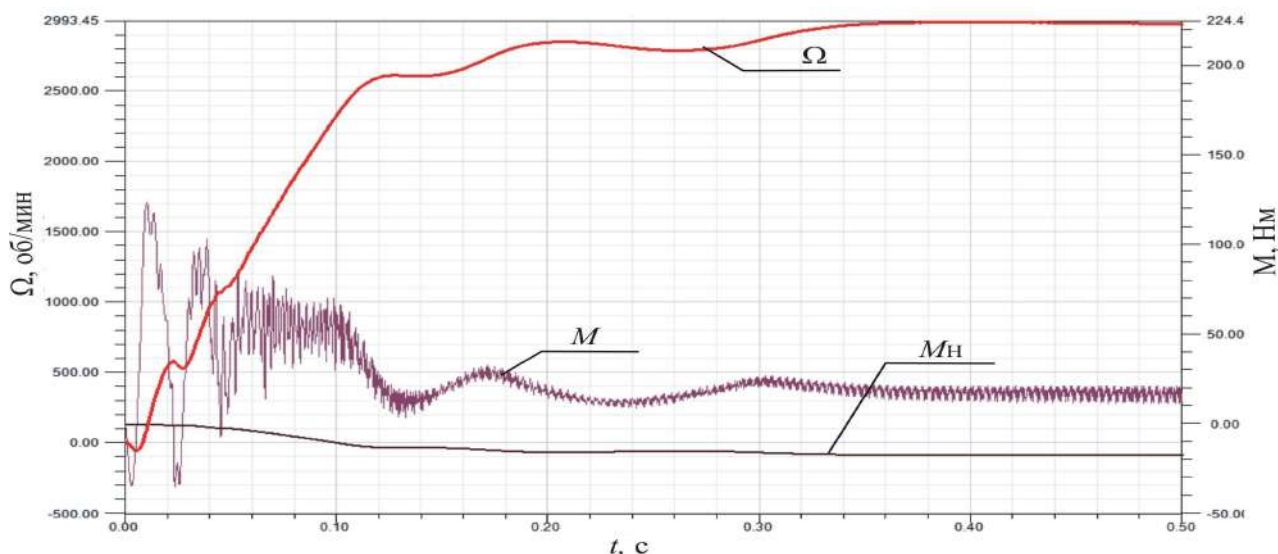


Рис. 2. Запуск синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов и короткозамкнутой пусковой обмоткой на роторе

В сфере исследований синхронно-реактивных электродвигателей предприятие активно сотрудничает с профильными кафедрами высших учебных заведений Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ), Московского энергетического института (НИУ МЭИ), а также с промышленными

предприятиями ООО «Автоматизированные системы и комплексы» г. Екатеринбург, ООО «Компания «Объединенная Энергия» г. Москва.

III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Использование металломатричных композитных материалов на основе алюминия в разработке и изготовлении электрических машин имеет значительные перспективы.

Разработка электрических машин с высокими показателями удельного момента и мощности, при использовании оболочек электродвигателей из традиционных материалов стали и чугуна затруднительна. При этом применение металлического алюминия, в особенности литого, не позволяет изготовить оболочки, обладающие соответствующей прочностью. Следует отметить, что при разработке энергонасыщенных электродвигателей с высокими удельными показателями момента, возрастают требования к элементам оболочки, что при использовании традиционных материалов приводит к увеличению ее массы. Таким образом, возрастающая масса оболочки снижает эффект от повышения удельной мощности, достигнутый при проектировании активной части машины.

Полученные в настоящее время технико-механические характеристики алюминиевых магнетоматричных композитов [3] позволяют рассматривать их как альтернативу конструкционной стали при изготовлении элементов оболочки электродвигателей.

С другой стороны значительный интерес представляют электрофизические свойства магнетоматричных алюминиевых композитов такие, как увеличение электрической проводимости относительно проводимости чистого алюминия. Так изготовление элементов короткозамыкающих стержней и колец из алюмоматричных композитов имеет перспективы в задачах разработки и изготовления высокоскоростных асинхронных двигателей, где использование меди и алюминия затруднительно по причине повышенных нагрузок, вызванных центробежными силами.

Еще одной перспективой использования алюмоматричных материалов является их применение в электрических машинах, предназначенных для применения в районах с пониженными окружающими температурами – крайнего севера и Арктики, в которых использование алюминия и его сплавов недопустимо в связи с его низкими эксплуатационными свойствами при низких температурах.

С точки зрения электромашиностроения, наибольший интерес представляют алюмоматричные композитные материалы, детали из которых могут быть изготовлены литьем и экструзией. При этом экструзию целесообразно применять для получения конструктивных элементов электрических машин, а литье следует использовать при изготовлении обмоток роторов. На наш взгляд, применение алюмоматричных композитов для изготовления обмоток роторов может стать альтернативой решения задачи снижения потерь в роторе электрической машины к традиционному решению, связанному с использованием литой медной клетки ротора, которая характеризуется сложной технологией производства и значительным влиянием на экологическую обстановку при массовом производстве.

Для проведения исследований в обозначенной области наша организация планирует использовать производственный потенциал Владимирского электромоторного завода и научный потенциал кафедры литейных процессов Владимирского государственного университета (ВлГУ).

IV. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ВОЗНИКАЮЩИХ В ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Рост объемов разработок электрических машин для электрического и гибридного транспорта, сформировавшийся в последнее десятилетие требует проектировать и изготавливать электродвигатели с высокими удельными показателями мощности и габарите. При этом создание энергонасыщенных машин, как показала практика, связано не только с разработкой новых эффективных способов охлаждения электрических машин, но и с исследованием и устранением эффектов повышения потерь энергии. Как известно, повышение удельной мощности может быть получено либо за счет повышения удельного момента электрической машины, либо за счет повышения ее частоты вращения.

Повышение удельного момента всегда приводит к необходимости увеличивать магнитный поток машины, что в свою очередь приводит к завышенным значениям магнитной индукции в ядре статора. При этом существенное увеличение ширины ядра статора не может быть осуществлено из-за ограничения по внешнему диаметру статора и расточке в связи со стремлением максимизации электромагнитного момента в заданном габарите. Как показали экспериментальные исследования, увеличение значения магнитной индукции в спинке статора выше значения 1,65Тл приводит к возникновению добавочных потерь холостого хода, которые возникают в оболочке электродвигателя [4, 5]. Эти потери обусловлены вытеснением части магнитного потока из шихтованного ядра статора в нешихтованную станину. Суммарное увеличение магнитных потерь холостого хода может составлять до 400% от их расчетной величины, найденной на основе традиционных методик расчета, на основе метода теории цепей или моделей, использующих моделирование магнитного поля машины с помощью конечных элементов. Величина потерь может быть определена по методикам, рассмотренным в работе [6].

При увеличении номинальной частоты вращения в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором можно столкнуться с возникновением добавочных потерь, возникающих на поверхности ротора. Стремление к минимизации и упрощению технологических операций по изготовлению общепромышленных асинхронных электродвигателей и незначительная величина поверхностных добавочных потерь в роторе [7], характерная для общепромышленных электродвигателей, привели к тому, что проточка поверхности ротора осуществляется резанием на токарном станке. Хонингование поверхности или обработка самовращающимися резаками не применяется. При повышении частоты вращения электродвигателей указанная составляющая возрастает и на двигателе с высотой оси вращения (ВОВ) 250 мм при диаметре ротора 230 мм на частоте

вращения 10000 об/мин может достигать величины 0,7-1,0 кВт. При том, что указанная составляющая потеря на частоте вращения 3000 об/мин у той же машины менее 100Вт. Это отражается в эффекте разогрева поверхности ротора на холостом ходу выше температуры обмотки статора, что нехарактерно для асинхронных двигателей. Этот разогрев может приводить к увеличению слоя поверхностного замыкания листов ротора, который в свою очередь повышает величину добавочных поверхностных потерь. На рис. 3 приведена экспериментально снятая зависимость потерь холостого хода от квадрата напряжения, полученная на электродвигателе с ВОВ 250 мм при частоте вращения 6000 об/мин, измеренная после изготовления и после 80 часов работы на частоте вращения 10000 об/мин с номинальной нагрузкой 200кВт. При этом температура поверхности ротора в эксперименте холостого хода, после ее установления на указанной машине составила 160 °С при температуре лобовых частей обмотки статора 60-70°С.

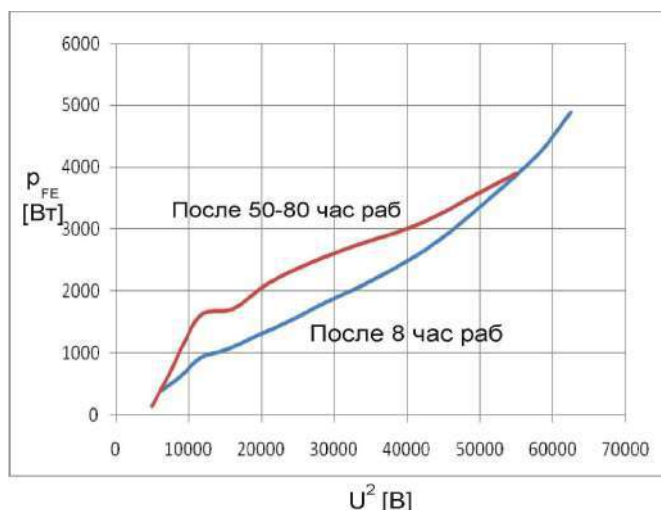


Рис. 3. Экспериментальная зависимость потерь холостого хода от квадрата напряжения для электродвигателя 250М2 200кВт при частоте питания 100Гц

Рассмотренные эффекты увеличения добавочных потерь, возникающие в энергонасыщенных машинах, требуют дальнейшего детального исследования, так как могут стать причиной критического увеличения потерь. Пренебрежение указанными эффектами существенно увеличивает риски опытно-конструкторских работ по изготовлению энергонасыщенных электродвигателей.

Выводы

1. Таким образом, исследования электрических машин, являющихся гибридами электродвигателей синхронных типов и асинхронного электродвигателя, то есть синхронно-реактивные двигатели и синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов с короткозамкнутыми обмотками на роторе, имеют перспективы освоения производством и внедрения в промышленность, так как такие электродвигатели могут быть интересны в электроприводе вентиляторов и насосов.

2. Повышение удельных показателей электрических машин при проектировании должно быть обеспечено не только при оптимальном проектировании активной части, но и при разработке конструктивной части. При этом хорошие результаты могут быть получены на основе использования металломатричных композитных материалов на основе алюминия.

3. При проектировании энергонасыщенных электродвигателей с высокими удельными показателями мощности следует тщательно определять добавочные потери, учитывать их повышение при увеличении магнитного потока машины и частоты вращения ротора. Применение материалов, имеющих низкую магнитную проницаемость и высокое удельное сопротивление для изготовления оболочек энергонасыщенных электродвигателей, имеет перспективы в задаче снижения добавочных потерь в оболочке.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Макаров Л.Н. Новые направления совершенствования низковольтных электродвигателей / Л.Н. Макаров, А.В. Захаров // Известия Академии электротехнических наук РФ. Выпуск 18. – С.72-80.
- [2] Галдин А.Ю. Экспериментальные исследования характеристик синхронно-реактивных электродвигателей / А.Ю. Галдин, А.В. Захаров, С.В. Скитович // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIX Бенардосовские чтения), Иваново 2017. –Т.3, С127-130.
- [3] Евдокимов И.А. Модифицированные углеродными наноструктурами функциональные металломатричные композитные материалы на основе алюминия и его сплавов с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами / И.А. Евдокимов, Е.С. Прусов, А.В. Киреев // Ползуновский альманах, 2010, №2. – С.264-268.
- [4] Захаров А.В. Влияние оболочки электрической машины на величину магнитных потерь / А.В. Захаров, А. С. Кобелев, С.В. Кудряшов // Труды международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты», Алушта, Крым, Украина, 2012. –С.101-103.
- [5] Глинкин С.А. Экспериментальные исследования эффекта увеличения магнитных потерь в электродвигателях с оболочками из различных материалов / С.А. Глинкин, А.М. Зайцев, А.В. Захаров // Труды международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты», Алушта, Крым, 2014. –С.136-137.
- [6] Захаров А.В. Научные основы энергетического расчета и проектирования электродвигателей переменного тока для мехатронных систем: автореферат дисс... доктора техн. наук: 05.09.01.- Владимир, 2017. –36с.
- [7] Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / В.И. Радин, Й. Лойдин, В.Д. Розенкноп и др.; под. ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416с.