

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Кафедра «Теоретическая и общая электротехника»

Зимин Андрей Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ОДНОИМЕННО –
ПОЛЮСНОГО ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ**

05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н, проф. Смирнов А.Ю.

Нижний Новгород, 2019

Актуальность

Широкое применение в технике



военной



медицинской



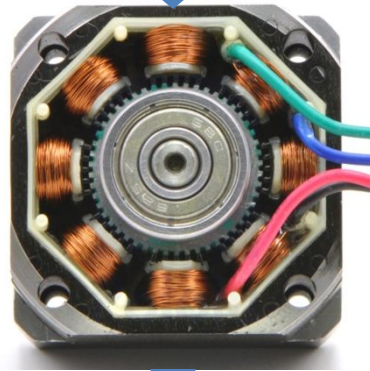
авиационной и
космической



ядерной
энергетике



офисном
оборудовании



Определяющие требования

необходимость сохранения
достигнутого углового
положения ротора после
отключения питания

обеспечение
максимальной точности
позиционирования
рабочего органа

Актуальность

Проблемами теории, расчёта, проектирования и исследований электропривода на базе синхронных машин с постоянными магнитами для автоматических устройств в разное время занимались: Ю.С. Чечет, А.Г. Иосифьян, В.В. Хрущёв, А.И. Бертинов, В.А. Ратмиров, Б.А. Ивоботенко, Д.В. Свечарник, Е.В. Арменский, Д.А. Бут, В.В. Аписид, В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев, Б.Х. Коник, Ф.Н. Сарапулов .



В настоящее время исследованиями в области синхронных машин с постоянными магнитами различного назначения занимаются коллективы учёных ряда образовательных и исследовательских институтов: НИУ МЭИ (Москва), ВНИИЭМ (Москва), УрФу (УПИ, Екатеринбург), НГТУ (Новосибирск), ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова (Новочеркасск), ЮУрГУ (Челябинск) и др.



Но несмотря на накопленный опыт, пока отсутствуют развёрнутые методики проектирования таких двигателей с учётом инерционных параметров шагового привода, нет методик поверочного расчёта некоторых их конструктивных модификаций, не сводящихся к плоским (двухмерным) моделям.

Цель и задачи

**Объект
исследования -**

Шаговый электропривод с одноимённо-полюсными индукторными двигателями с постоянными магнитами на роторе, предназначенными для работы в механизмах с высокой точностью позиционирования рабочих органов, достигаемой за счёт большого устойчивых положений ротора на оборот.

**Предмет
исследования -**

Методы проектирования, поверочного расчёта и режимы работы шагового электропривода с одноимённо-полюсными индукторными двигателями с постоянными магнитами на роторе.

Цель -

- Разработка методики проектирования одноимённо-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе в составе шагового электропривода.
- Проверка результатов проектирования путём сопоставления с экспериментальными данными и результатами поверочных расчётов.
- Создание математических моделей для исследования работы индукторных двигателей в составе шагового привода.

Цель и задачи

Задачи:

1. Создание методики и алгоритма проектирования одноимённо-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе в составе шагового электропривода.

2. Разработка компьютерных программ генерации 3D моделей одноимённо-полюсных индукторных двигателей, для проверки результатов проектирования на уточнённых моделях поверочного расчёта, с использованием современных методов математического анализа и программного обеспечения (метода конечных элементов и реализующих этот метод пакетов прикладных программ).

3. Оптимизация параметров зубцовой зоны и электромагнитных нагрузок рассматриваемой машины по одному из критериев минимизации габаритов, массы и расхода активных материалов.

4. Разработка математических моделей шагового электропривода, предназначенных для поиска наиболее рациональных режимов питания спроектированного двигателя от преобразователя частоты с источником (инвертором) напряжения.

Научная новизна

1. Впервые разработана методика проектирования одноимённо-полюсных индукторных двигателей с учётом момента инерции подвижных масс шагового электропривода.
2. Разработана компьютерная программа генерации 3D сеточных моделей для расчёта одноимённо-полюсных индукторных двигателей методом конечных элементов, обеспечивающим наиболее глубокую детализацию электромагнитных процессов при проведении поверочных расчётов.
3. Выявлены оптимальные соотношения параметров зубцовой зоны и электромагнитных нагрузок индукторного двигателя с постоянными магнитами на роторе, при которых достигаются минимальные габариты, масса или расход активных материалов, в частности магнитотвёрдых материалов постоянных магнитов.
4. Разработана математическая модель шагового электропривода на базе индукторной машины с постоянными магнитами, предназначенная для поиска наиболее рациональных режимов питания спроектированного двигателя от преобразователя частоты с источником (инвертором) напряжения.

Практическая ценность

Обоснование и разработка математических моделей, которые позволяют:

1. Выполнять проектирование одноимённо-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе в составе шагового привода с учётом его момента инерции.
2. Осуществлять построение по формализованным процедурам трёхмерных моделей спроектированных двигателей для последующего проведения поверочного расчёта методом конечных элементов.
3. Оптимизировать параметры геометрии и электромагнитных нагрузок одноимённо-полюсных индукторных шаговых двигателей с возбуждением от постоянных магнитов на роторе, по критериям достижения минимальных габаритов, массы и расхода активных материалов.
4. На основе численных экспериментов подбирать форму импульсов напряжения, при которой при одной и той же мощности электрических потерь обеспечивается наиболее широкий диапазон рабочих частот шагового привода.

На защиту выносятся:

1. Методика проектирования одноимённо-полюсного индукторного двигателя, в которой учитывается момент инерции подвижных масс шагового привода.
2. Программа построения трёхмерных сеточных моделей одноимённо-полюсных индукторных машин для расчёта электромагнитного момента методом конечных элементов.
3. Математическая модель шагового электропривода с преобразователями напряжения.
4. Результаты оптимизационных расчётов и численных экспериментов.

Актуальность

Актуальность

Методика проектирования одноимённо-полюсного индукторного двигателя

$$\frac{D^2 l_{\delta} \Omega}{P} = \frac{6,1}{\alpha_{\delta} k_B k_{об} A B_{\delta}}$$

Постоянная Арнольда

$$M[\text{Н} \cdot \text{м}] = 0,1047 \frac{P[\text{Вт}]}{\Omega[\text{об/мин}]}$$

Зависимость
отношение P/Ω от M

$$D^3 = \frac{0,639M}{\alpha_{\delta} k_B k_{об} \lambda A B_{\delta}}, \text{ где } \lambda = \frac{l_{\delta}}{D} - \text{длина ротора } l_{\delta} \text{ по отношению к его диаметру } D.$$

$$J_{пр} = (1 \div 2) J_p = \beta J_p$$

Зависимость
оптимальной работы
шагового привода

$$J_p = m_{\text{цил}} \frac{D^2}{8} = \rho_{\text{ж}} \lambda \frac{\pi D^3}{4} \frac{D^2}{8} = \frac{\pi}{32} \rho_{\text{ж}} D^5 \beta \lambda$$

Связь между диаметром ротора и
его моментом инерции

$$D = \sqrt[5]{\frac{J_{пр}}{\frac{\pi}{32} \rho_{\text{ж}} \beta \lambda}}$$

Манипулируя значениями электромагнитных нагрузок, $A = (1 \div 5) \cdot 10^4$ А/м и $B_{\delta} = 0,7 \div 0,95$ Тл, и отношением моментов инерции привода и двигателя $\beta = 1,0 \div 2,0$, определяется диаметр ротора, чтобы его значение одновременно удовлетворяло обоим условиям

Методика проектирования одноимённо-полюсного индукторного двигателя

Внешний диаметр магнита $D_{\text{маг}} = D - 2h_{\text{пр}}$

Внутренний диаметр магнита $d_{\text{маг}} = \sqrt{D_{\text{маг}}^2 - \frac{2D^2 \lambda k_z k_\sigma}{B_r n_M}}$  Рекомендуемые условия $d_{\text{маг}} = (0,30 \div 0,45)D$

Число зубцов ротора $Z = \frac{360}{C_y \cdot \alpha_{\text{ш}}}$ C_y - число тактов коммутации

Длина зубцового деления $t_z = \frac{\pi D_s \cdot 1000}{Z}$ $\alpha_{\text{ш}}$ - шаг, угол поворота ротора

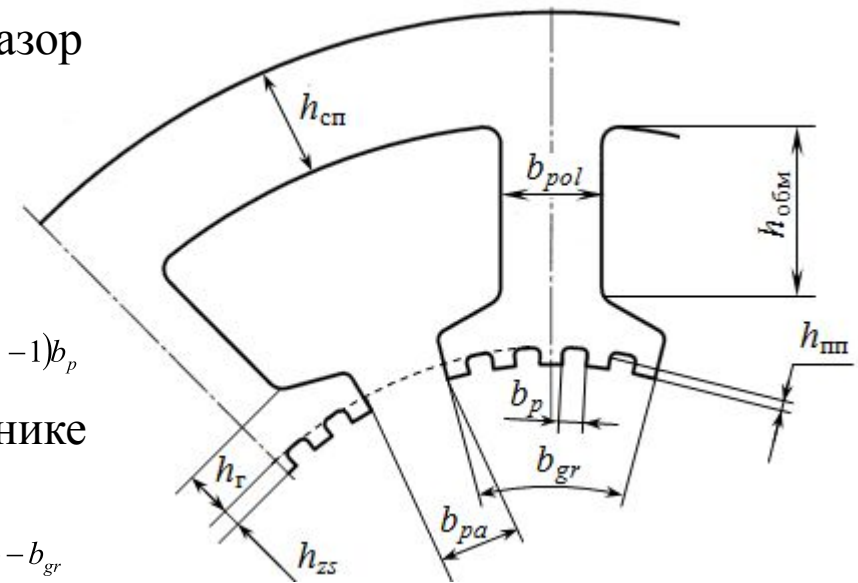
Ширина зубца $b_z = \left(\frac{t_z}{2} - 2\delta \right)$ δ - воздушный зазор

Ширина пазов $b_p = t_z - b_z$

Высота прямоугольной части паза $h_{\text{пр}} = 0,6b_p + 1$

Ширина гребенчатых зубцовых зон $b_{\text{гр}} = n_3 b_z + (n_3 - 1)b_p$
 n_3 - число зубцов на одном полюсном наконечнике

Ширина пазов между гребенчатыми зубцовыми зонами $b_{\text{па}} = \frac{1000\pi D_s}{Z_s} - b_{\text{гр}}$



Методика проектирования одноимённо-полюсного индукторного двигателя

Радиальный размер оснований гребенчатых зубцовых зон

$$h_r = \frac{b_z n_3}{(2 \div 3)}$$

Амплитуда индукции в зубцах

$$B_{zm} = B_\delta \frac{2Z}{n_3 Z_S}$$

Амплитуда индукции в полюсе статора $B_{pol} = 0,85 B_{zm}$

Ширина полюса статора

$$b_{pol} = \left(\frac{2n_3 b_z B_{zm}}{B_{pol}} \right) \cdot \frac{1}{2}$$

Высота обмотанной части полюсов статора

$$h_{обм} = \frac{1}{a} \left(\frac{-b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - ac} \right)$$

$$a = \frac{\pi}{Z_S}$$

$$b = \frac{\pi [1000 \cdot D_S + 2(h_{zs} + h_r)]}{Z_S} - b_{pol} - s_{из} - 2 \frac{0,001 H_{pol} d_{из}^2}{k_3 s_{пр} j}$$

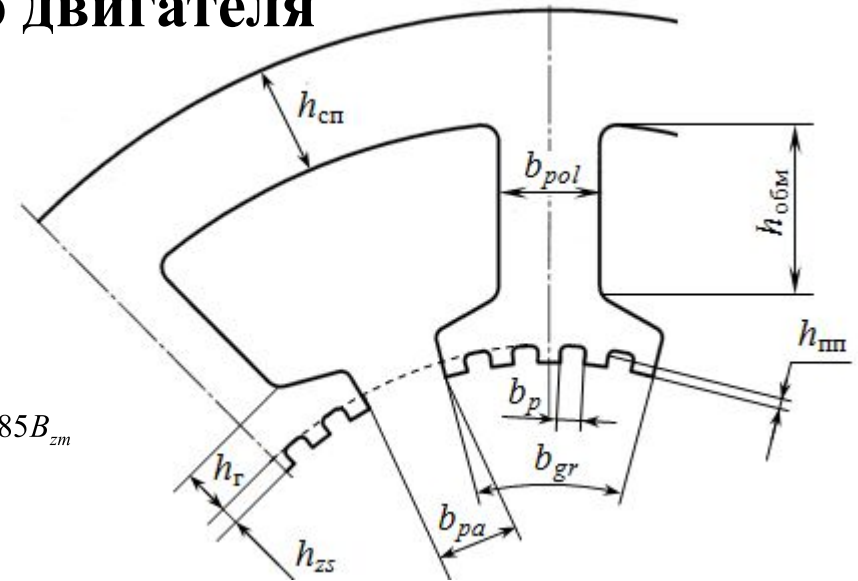
$s_{из}$ - площадь, занимаемая изоляцией

H_{pol} - напряжённость магнитного поля в полюсах статора

k_3 - коэффициент заполнения паза медью

$d_{из}$ - диаметр обмоточного провода в изоляции

j - плотность тока



Методика проектирования одноимённо-полюсного индукторного двигателя

$$c = s_{из} - \frac{2(A\pi D + F_z + F_{zs} + F_{pol})d_{из}^2}{k_3 s_{пр} j Z_S}$$

$s_{пр}$ - площадь сечения обмоточного провода

F_z - падение магнитного напряжения в зубцах ротора

F_{zs} - падение магнитного напряжения в зубцах статора

F_{pol} - падение магнитного напряжения на полюсе статора

h_{cn} - радиальный размер спинки статора

Наружный диаметр магнитопровода статора $D_{нар} = [D_S \cdot 1000 + 2(h_{обм} + h_{cn} + h_r + h_{zs})]$

h_{zs} - высота зубцов и пазов гребенчатых зубцовых зон статор

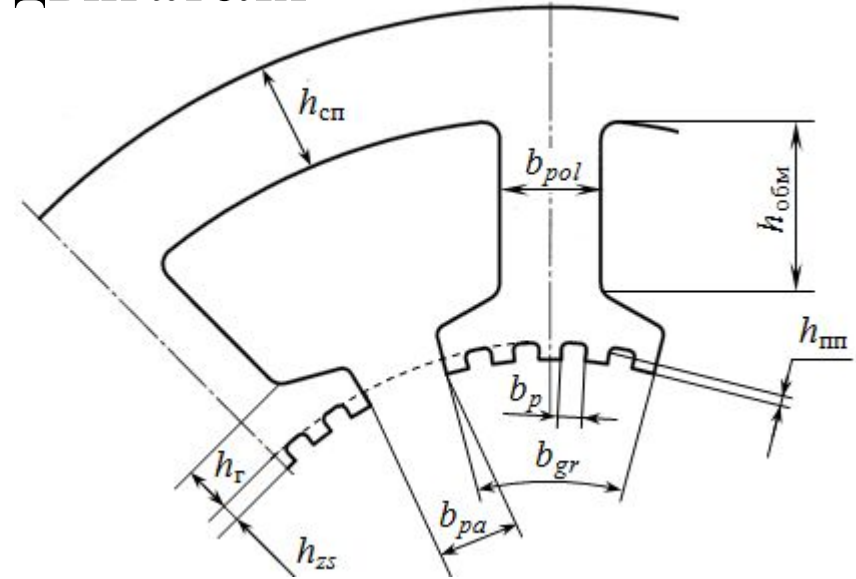
Момент инерции ротора $J_p = \frac{\pi}{32} \rho_p \cdot D^4 \cdot l_\delta + \rho_m \frac{\pi(D_{mag}^2 + d_{mag}^2)}{32 \cdot 10^{15}} n_m l_m$

ρ_m - плотность материала магнитов

ρ_p - плотность материала ротора

n_m - количество магнитов на роторе

l_m - длина магнита в направлении намагничивания



Методика проектирования одноимённо-полюсного индукторного двигателя

Частота приемистости при идеальном холостом ходе	$\frac{C_y Z n}{60}$
Угловая скорость вращения при идеальном холостом ходе	$\frac{60}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{2C_y}\right) \sqrt{\frac{M_m}{Z(J_{\text{пр}} + J_p)}}$
Средний статический синхронизирующий момент на интервале в один шаг	$\frac{C_y}{\pi} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{C_y}\right) M$
Общая масса активных частей	$m_{\text{меди}} + m_{Fe}$
Масса меди обмоточных проводов	$2w_k Z_S l_{\text{ср}} s_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{меди}}$
Общая масса ферромагнитных материалов статора и ротора	
Число витков одной катушки обмотки	
Средняя длина витка	
Удельная тепловая нагрузка от электрических потерь в обмотке	$\frac{1,140 P_M}{[1 + 0,004(T_{\text{гор}} - 20)] \pi D_S l_{\text{ср}}}$

Актуальность

Актуальность

Актуальность

Актуальность

Актуальность

Актуальность

Актуальность

Актуальность

Актуальность

Актуальность

Оптимизационные расчеты электродвигателей в составе шагового электропривода

Целью оптимизации поставлено достижение одного из следующих результатов:

- минимизация габаритов электромеханического преобразователя (внешнего диаметра и осевой длины статора);
- минимизация общей массы активных частей или массы обмоточных проводов, массы постоянных магнитов, по отдельности;
- минимизация потерь в меди обмотки и достижение максимального КПД;
- получение наибольшей частоты приемистости в шаговом приводе.

В качестве переменных проекта используются исходные данные:

- индукция в зазоре B_{δ} ;
 - линейная нагрузка A ;
 - момент инерции ротора относительно момента инерции привода β ;
 - относительная длина ротора λ ;
 - число зубцов на поверхности одного полюсного наконечника статора n_z .
- количество магнитов на роторе n_m на роторе.

Оптимизационные расчеты электродвигателей в составе шагового электропривода

Оптимизационные расчеты электродвигателей в составе шагового электропривода

Основные результаты работы

1. Разработаны методика и алгоритм проектирования одноимённо-полюсных индукторных электромеханических преобразователей (двигателей) индукторного типа с постоянными магнитами на роторе в составе шагового электропривода с привязкой моменту нагрузки и моменту инерции подвижных масс. Эти двигатели конструктивно обладают возможностью выполнения мелкого шага, а потому наиболее подходят для высокоточных систем позиционирования регулирующего органа, а также для привода механизмов подачи станков с числовым программным управлением.

2. Предложены алгоритмы и программное обеспечение (на встроенном языке использованного пакета прикладных программ) для поверочного расчёта посредством МКЭ электромагнитного момента электромеханического преобразователя индукторного типа с возбуждением от постоянных магнитов на роторе.

3. Разработана математическая модель шагового электропривода на базе индукторной машины, предназначенная для подбора рациональных режимов питания от преобразователя частоты с источником (инвертором) напряжения.

Основные результаты работы

4. Предложена методика оптимизации одноимённо-полюсного электромеханического преобразователя индукторного типа по наиболее важным характеристикам двигателя и привода.

5. Выполнены оптимизационные расчёты аналогов серийных двигателей для шагового электропривода, которые позволили в соответствии с расчётными оценками, сократить массу их активных частей на 37,6% и на 7,4% по сравнению с серийным двигателем.