

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.

# Актуальность

## Широкое применение в технике



военной



медицинской



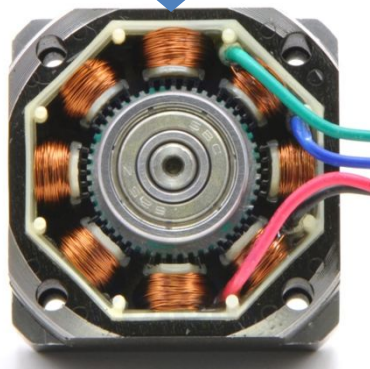
авиационной и  
космической



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. Апсид, 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  $P/\Omega$  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

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


Связь между диаметром ротора и  
его моментом инерции

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

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

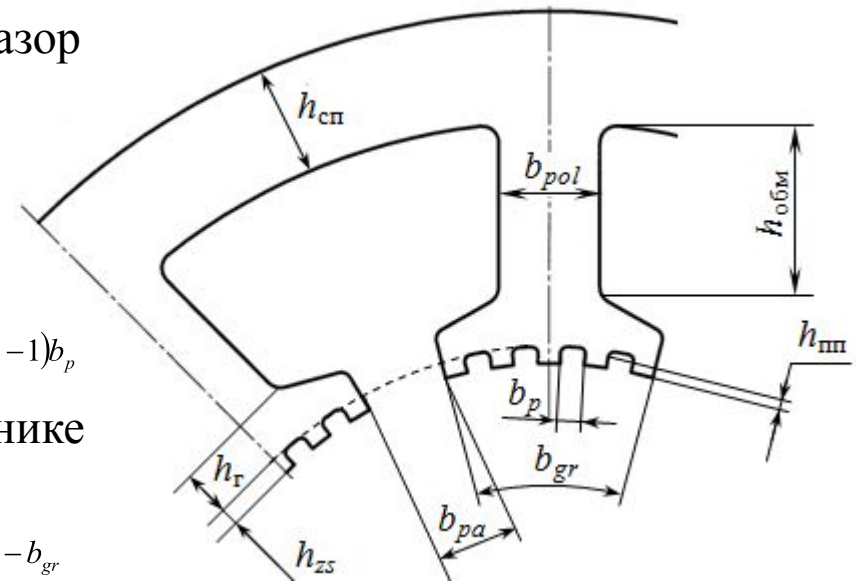
Ширина пазов  $b_p = t_z - b_z$

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

Ширина гребенчатых зубцовых зон  $b_{\text{gr}} = n_3 b_z + (n_3 - 1)b_p$

$n_3$  - число зубцов на одном полюсном наконечнике

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



# 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

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

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

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

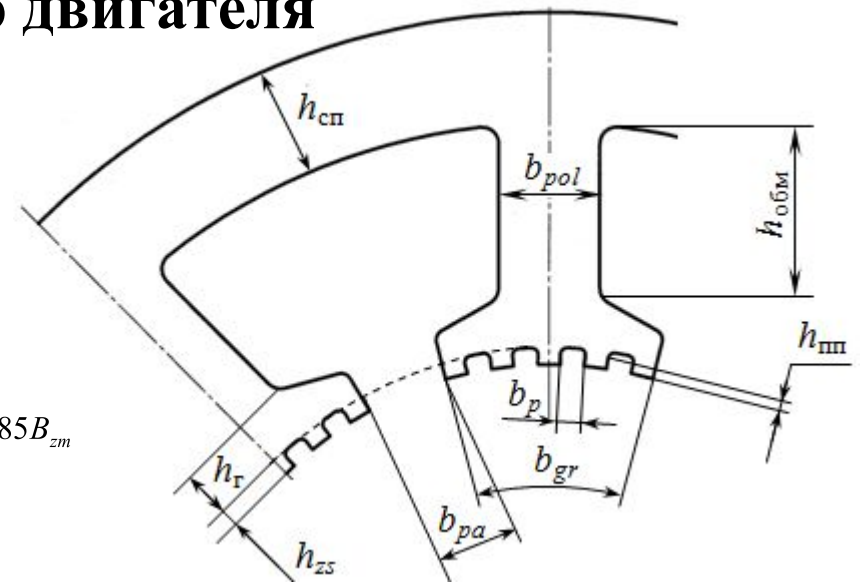
$s_{из}$  - площадь, занимаемая изоляцией

$H_{pol}$  - 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

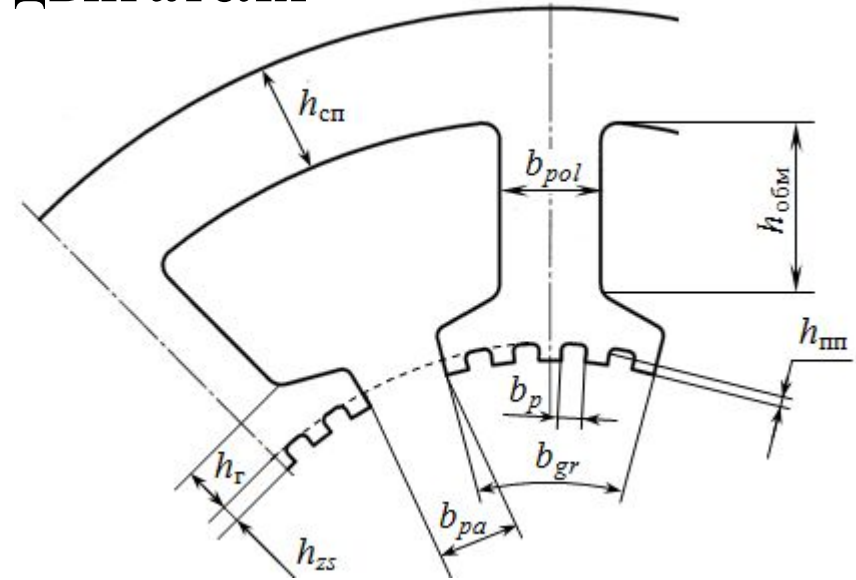
Момент инерции ротора  $J_p = \frac{\pi}{32} \rho_p \cdot D^4 \cdot l_\delta + \rho_m \frac{\pi(D_{mag}^2 + d_{mag}^2)}{32 \cdot 10^{15}} n_m l_m$

$\rho_m$  - плотность материала магнитов

$\rho_p$  - 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  $B_{\delta}$ ;
  - линейная нагрузка  $A$ ;
  - момент инерции ротора относительно момента инерции привода  $\beta$ ;
  - относительная длина ротора  $\lambda$ ;
  - 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.