

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Овсянников Владимир Николаевич

**МОМЕНТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ОГРАНИЧЕННЫМ УГЛОМ  
ПОВОРОТА РОТОРА**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Диссертация на соискание  
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент Макаричев Ю.А.

Самара 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 4  |
| 1 АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МД И ТРЕБОВАНИЙ К НИМ .....   | 18 |
| 1.1 Конструктивные типы моментных двигателей и требования к ним<br>в зависимости от области применения ..... | 18 |
| 1.2 МД с ограниченным углом поворота ротора .....  | 22 |
| 1.2.1. Двигатели с подвижной обмоткой .....  | 22 |
| 1.2.2. Двигатели с магнитами на роторе.....  | 25 |
| 1.3 Обоснование выбора конструкции.....  | 27 |
| 1.3.1. Выбор типа обмотки.....   | 27 |
| 1.3.2. Выбор типа возбуждения.....   | 34 |
| 1.4 Выводы .....   | 38 |
| 2 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ МОМЕНТНОГО<br>ДВИГАТЕЛЯ.....  | 39 |
| 2.1 Математическое описание электромагнитного поля МД.....   | 40 |
| 2.2 Расчет и анализ магнитного поля МД.....  | 45 |
| 2.2.1. Геометрическая модель и ее физические свойства.....   | 46 |
| 2.2.2. Магнитное поле возбуждения и реакции якоря.....   | 49 |
| 2.3 Расчет моментных характеристик.....  | 52 |
| 2.4 Способы повышения стабильности моментной характеристики.....   | 57 |
| 2.5 Расчет параметров МД.....  | 62 |
| 2.6 Выводы .....   | 66 |
| 3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МД.....  | 69 |
| 3.1 Особенности проектирования МД с гладким якорем и ограниченным<br>углом поворота ротора.....              | 69 |
| 3.2 Критерий оптимальности.....  | 73 |
| 3.3 Структура математической модели.....   | 77 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.3.1. Функциональные связи параметров.....   | 80  |
| 3.3.2. Расчет коэффициента рассеяния.....   | 83  |
| 3.3.2.1. Аналитический расчет.....  | 83  |
| 3.3.2.2. Моделирование потоков рассеяния МКЭ.....   | 88  |
| 3.3.3 Алгоритм расчетной математической модели.....   | 90  |
| 3.4 Поверхность отклика целевой функции.....  | 93  |
| 3.4.1. Штрафные функции.....  | 96  |
| 3.4.2. Рельеф поверхностей отклика с учетом штрафных функций...                                     | 99  |
| 3.5 Выводы .....  | 105 |
| 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИОННОГО<br>ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ..         | 107 |
| 4.1. Постановка задачи и выбор метода оптимизации.....  | 107 |
| 4.2. Оптимизация МД методом Бокса-Уилсона.....  | 113 |
| 4.2.1. Построение матрицы факторного эксперимента и оценки<br>градиента.....                        | 113 |
| 4.2.2. Движение по линии кратчайшего спуска.....  | 117 |
| 4.3. Результаты оптимизационного проектирования двигателей<br>МД-100-1 и МД-6.....                  | 120 |
| 4.4. Экспериментальные исследования статических и динамических<br>характеристики двигателей МД..... | 127 |
| 4.5. Выводы .....   | 131 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....   | 133 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....   | 135 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ.....   | 146 |

## ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные моментные двигатели (МД) предназначены, как правило, для работы в локально замкнутых (с датчиком положения ротора) или разомкнутых по углу поворота быстродействующих системах автоматического регулирования. Требования по точности для таких систем определяются динамической ошибкой, не превышающей 1-3 угловых минуты [11,90]. Для обеспечения такой точности недостаточно только системных средств – МД, как силовое звено, должен обеспечивать ряд специфических параметров, которые позволяют строить подобные системы заданной точности. К таким параметрам относятся: линейность моментной характеристики в функции сигнала управления, стабильность момента от угла поворота ротора, минимальное значение зоны нечувствительности моментной характеристики. Для двигателей бортового применения в системах стабилизации и управления летательных аппаратов важнейшими критериями являются масса и потребляемая мощность. Экономические критерии во многом определяются себестоимостью изделия, которая не в последнюю очередь зависит от массы используемых магнитов – самого дорогостоящего компонента двигателя.

В бортовых авиационных системах для ориентации и стабилизации платформ, на которых расположены приборы наблюдений и контроля в качестве силовых элементов используются моментные двигатели, которые работают в пределах ограниченного угла поворота ротора. Отличительной особенностью работы таких МД является то, что они создают вращающий момент в режиме упора, когда ротор либо неподвижен, либо вращается с весьма малой скоростью. Рабочий угол поворота ротора может быть ограничен величиной всего в несколько градусов. Применение двигателей традиционной конструкции для работы в качестве моментных сопряжено с рядом трудноустраняемых недостатков – большие габариты и масса, наличие скользящего контакта в двигателях постоянного тока, зубцовые пульсации момента и невысокое быстродействие. Поэтому для

МД с ограниченным углом поворота ротора были разработаны специальные конструкции магнитных систем и обмоток якоря. В зависимости от назначения, в этих двигателях применяются зубцово-пазовые или беспазовые конструкции обмоточного слоя якоря, электромагнитное или магнитоэлектрическое возбуждение, распределенные или сосредоточенные обмотки. Каждая конструкция имеет свои особенности, достоинства и недостатки [16,19,92]. Актуальным является определение эффективности конструктивных схем МД с целью их рационального применения для конкретных условий работы.

Появление высокоэнергетических магнитов на основе сплавов редкоземельных материалов, таких как *NeFeB* и *SmCo* открыло возможности для снижения массогабаритных и повышения энергетических показателей МД. Анализ конструктивных схем индукторов МД является актуальной проблемой при синтезе МД с улучшенными характеристиками по быстродействию и массе.

Отечественные разработки МД базируются на фундаментальных трудах в области исследования и проектирования моментных двигателей В.А. Балагурова, Л.И. Столова, Б.Ф. Токарева, А.Ю. Афанасьева, Ю.М. Беленького, Б.Н. Зыкова, Б.В. Богданова, С.А. Грузкова. В работах этих авторов решаются задачи анализа и синтеза МД различных типов и конструктивных исполнений.

В своих исследованиях автор опирался также на работы И.Е. Тамма, В.П. Шуйского, И.П.Копылова, Ю.М. Пятина, К.С. Демирчяна, в которых заложены основы теории электромагнитных полей, расчётов электрических машин и их оптимизационного проектирования.

В настоящее время опубликованы работы, в которых проанализированы основные электромагнитные процессы в МД и заложены основы их проектирования с учетом конструктивных особенностей [14,23,26,38,40,51,81,90,92]. При этом необходимо отметить, что анализ массогабаритных и энергетических характеристик двигателей проводился аналитическими методами, учитывающими нелинейность характеристик стали магнитопроводов и постоянных магнитов, их

поля рассеяния, реакцию якоря и изменение параметров двигателя при повороте ротора приближенными методами, не отвечающими современным требованиям к точности расчетов. До настоящего времени не проведен количественный анализ диапазонов эффективного применения барабанных и кольцевых обмоток в МД с ограниченным углом поворота ротора. Остается не до конца решенным вопрос обеспечения стабильного момента во всем рабочем диапазоне. Актуальным является совершенствование характеристик МД за счет комплексного использования методов оптимизационного проектирования и численных методов моделирования электромагнитного поля машины.

Требования к параметрам и характеристикам МД определяются их областью применения и могут существенно отличаться в зависимости от назначения.

#### **Области применения моментных двигателей.**

МД находят широкое применение в следующих областях [11,23,26,46,49,57]:

- следящих системах и системах угловой стабилизации высокой точности, в том числе, для бортовых установок летательных аппаратов;
- системах автоматического управления в редукторном и безредукторном исполнении;
- исполнительных системах управления роботов и манипуляторов;
- медицинском приборостроении, где предъявляются повышенные требования к уровню шума и уровню пульсаций вращающего момента;
- химической и микробиологической промышленности для передачи вращающего момента через герметичную перегородку в изолированную полость;
- приводах мотор-колес гибридных электромобилей и т.д.

В настоящей работе область применения МД ограничена рассмотрением двигателей для систем угловой стабилизации высокой точности бортовых авиа-

ционных установок слежения и видеофиксации. Рабочий угол поворота таких двигателей, как правило, ограничен величиной 5-10°, и в этом диапазоне должна обеспечиваться стабильность момента не хуже 5%.

Исследованию, расчётам и проектированию подобных двигателей посвящён ряд публикаций в отечественной и зарубежной литературе [1,11,16,43,44,51,52,53,60,67,68,90,93,97,98,104,106].

Наиболее полно вопросы теории, конструирования, расчёта и испытаний МД изложены в книге [90]. В этом труде определена целесообразность применения безредукторных МД, которые наряду с крупными достоинствами нередко имеют бóльшие энергопотребление и массу, чем быстроходные двигатели с редукторами. В книге разработана методика параметрической оптимизации МД, основанная на теории электрических и магнитных цепей со сосредоточенными параметрами. Аналитические методы расчёта магнитных полей, предложенные автором, а также в работах [9,10], для исследования МД, такие как метод схем замещения, конформных отображений или параметрических функций, требуют существенных упрощающих допущений, например, о линейности магнитных характеристик магнитопроводов и постоянных магнитов, или о замене объёмных токов катушек бесконечно тонким токовым слоем. Аналитические методы расчёта обладают своими достоинствами – общностью результатов, широким диапазоном применимости, но по точности не отвечают современным требованиям. В настоящее время, благодаря бурному развитию вычислительных возможностей компьютерной техники и программного обеспечения, для решения типовых полевых задач, сформулированных в виде систем дифференциальных уравнений, каковыми являются задачи математического моделирования электромагнитного поля МД, стало возможным при минимальных допущениях, решить эти задачи с недостижимой ранее точностью, позволяющей часто исключить даже стадию физического моделирования на макетных и опытных образцах при разработке новых изделий. Поэтому решение задачи численного моде-

лирования электромагнитного поля МД и на его основе уточнённого определения параметров и характеристик двигателя – весьма актуальная проблема при разработке и совершенствовании двигателей с ограниченным углом поворота ротора.

В работах [24,40,41,48,53,60] приведены некоторые способы повышения точности и стабильности моментных характеристик МД. Они заключаются в том, что стабильность характеристик обеспечивается скосом пазов в зубчатых конструкциях, расширением дуги полюсного наконечника, профилированием формы воздушного зазора. Эти методы дают повышение стабильности моментной характеристики от угла поворота не выше 5% от среднего значения момента. Более высокие показатели достигаются при применении беспазовых обмоток, которые кроме лучших показателей по точности обладают и существенным достоинством, заключающимся в их малой индуктивности. У беспазовых обмоток есть один существенный недостаток: так как обмотка находится в зазоре, то немагнитный зазор за счёт толщины обмоточного слоя увеличивается на порядок по сравнению с зубчатыми машинами [69,76]. Это, естественно, требует более мощной системы возбуждения. Методы формирования желаемой кривой индукции в воздушном зазоре, предлагаемые в данных работах, не применимы к беспазовым машинам. Поэтому задача повышения стабильности моментной характеристики в машинах с гладким якорем остаётся актуальной.

Вопросам оптимизационного проектирования МД посвящены ряд публикаций [12,34,43,52,62,68,81,90,91], в которых заложены основы теории расчёта и стратегии выбора параметров оптимизации. В [90] рассматриваются в качестве критериев оптимизации, например, такие, как:

$$M_{\vartheta} \Rightarrow \max, \quad P \Rightarrow \min, \quad V \Rightarrow \min, \quad m_{\vartheta} \Rightarrow \min;$$

$$M_{\vartheta}/V \Rightarrow \max, \quad M_{\vartheta}/P \Rightarrow \max, \quad M_{\vartheta}/\sqrt{P/\rho} \Rightarrow \max;$$

$$M_{\text{э}} / \sqrt{PV} \Rightarrow \max,$$

$$M_{\text{э}} / (d_c \sqrt{l_a P T_{\text{э}}}) \Rightarrow \max,$$

где  $M_{\text{э}}$  – номинальный электромагнитный момент;  $P$  – потребляемая мощность;  $V$  – объем МД;  $m_{\text{д}}$  – масса МД;  $d_c$  – внутренний диаметр статора МД;  $l_a$  активная длина МД;  $\rho$  – удельное сопротивление меди обмотки МД;  $T_{\text{э}}$  электромагнитная постоянная времени обмотки МД.

Эти критерии, несомненно, отражают различные стороны качества моментного двигателя. Авторы проводят анализ эквивалентности этих и других критериев оптимальности и приходят к закономерному выводу, что не существует, и не может существовать единого критерия оптимальности такого сложного устройства, как моментный двигатель. Поэтому определение для каждого двигателя, или серии двигателей с общей архитектурой и назначением критерия оптимальности, остаётся актуальной задачей. Ввиду существенных конструктивных различий МД, в частности, с ограниченным углом поворота ротора, актуально и создание математической модели, ориентированный на их оптимизационный расчёт. В отличие от математической модели, построенной на численном моделировании электромагнитного поля МКЭ, эта модель должна быть гибкой для варьирования значений независимых переменных и должна позволять проводить тысячи и более расчётов за разумное машинное время.

Анализ литературы показывает, что в настоящее время при создании МД с ограниченным углом поворота ротора вопросы совершенствования их силовых, энергетических и точностных характеристик требуют более полных исследований и разрешения современными методами.

**Целью работы** является улучшение энергетических, массогабаритных и точностных показателей моментных электродвигателей с постоянными магнитами и ограниченным углом поворота ротора для автономных объектов на основе разработки их математических моделей и выработки рекомендаций по определению конструктивных параметров.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **основные задачи**:

- анализ современного состояния моментных двигателей в составе систем силовых электроприводов и перспектив их развития для определения типов конструкций моментных двигателей, обеспечивающих высокие точностные, энергетические и массогабаритные показатели;

- разработка математических моделей беспазовых моментных двигателей с постоянными магнитами, с учетом влияния действия полей рассеяния, нелинейности магнитной системы и изменения угла поворота ротора;

- выработка на основании исследования математических моделей рекомендаций по выбору конфигурации и оптимизированных геометрических соотношений магнитной системы и параметров гладкого статора, обеспечивающих улучшенные характеристики машины по сравнению с типовыми моментными двигателями;

- проведение экспериментальных исследований опытных образцов моментных двигателей для проверки корректности и определения точности предложенных математических моделей и расчетных зависимостей.

**Методы исследований** определялись спецификой расчётов, математических и физических моделей. В работе использованы фундаментальные основы теории электрических машин и электромагнитного поля, теории электрических и магнитных цепей, оптимизационного проектирования. Численное моделирование электромагнитного поля и переходных процессов проводилось с применением программных пакетов MATHCAD, ELCUT и FEMLAB. Экспериментальные исследования проводились на опытных образцах моментных двигателей в сертифицированной лаборатории ЦКБ «Фотон» г. Казань.

**Научная новизна** определяется тем, что в работе расширяются и углубляются методы анализа и синтеза моментных двигателей с ограниченным углом поворота ротора, на современном уровне решаются задачи их математического моделирования и оптимизационного проектирования.

В работе в указанном направлении получены следующие научные результаты:

1. Разработаны математические модели моментных электродвигателей с ограниченным углом поворота ротора, кольцевой обмоткой статора и магнитоэлектрическим возбуждением, отличающиеся тем, что в них за счет совмещения численного моделирования электромагнитного поля и расчетов нелинейных цепей с сосредоточенными параметрами, уточнено влияние потоков рассеяния магнитов, насыщение магнитопровода и угла поворота ротора в процессе работы на характеристики двигателей.

2. Впервые разработан комплексный метод расчета полей рассеяния постоянных магнитов моментных двигателей, основанный на аналитических зависимостях и дополненный проверкой численными методами моделирования магнитного поля.

3. Разработаны алгоритм и программа оптимизационного расчета моментных двигателей, основанные на методе Бокса-Уилсона усовершенствованном аппарате штрафных функций, учитывающие многокритериальность задачи, нелинейность и дискретность параметров для заданных ограничений и критериев оптимизации.

#### **Практическую ценность работы составляют:**

1. Прикладные программы, разработанные на основе математической модели, которые позволяют с учетом конструктивных особенностей рассчитывать выходные показатели и характеристики магнитоэлектрических моментных двигателей с ограниченным углом поворота ротора, а также решать задачи оптимизационного проектирования с целью получения требуемых характеристик.

2. Опытные образцы моментных двигателей МД-100-1 и МД-6, спроектированные и изготовленные по предложенным автором методикам, имеющие лучшие показатели по потребляемой мощности, массе и стабильности момента по сравнению с серийными машинами.

3. Полученные в результате исследований рекомендации по выбору конструктивных параметров МД для формирования формы кривой магнитного поля в зазоре позволяют повысить стабильность момента двигателя в пределах рабочего угла поворота ротора до значений, недостижимых в известных аналогах.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается применением строгих математических методов с корректными допущениями, сравнением результатов расчетов и моделирования с экспериментальными данными и данными, полученными другими авторами.

**Реализация результатов работы.** Представленная работа является частью научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, которые проводились кафедрой электромеханики и автомобильного электрооборудования СамГТУ для ЦКБ «Фотон» г. Казань и реализованы в виде опытных образцов моментных двигателей при создании системы стабилизации приборной платформы бортового оборудования самолета (отчет по НИР «Разработка САПР специальных электрических двигателей для САУ», № гос. регистрации 01870018323).

**Апробация работы.** Основные положения работы доложены и обсуждены: на 2-й Научно-технической конференции «Устройства и системы автоматики автономных объектов», г. Красноярск, 1990, Первой Всесоюзной школеконференции «Математическое моделирование в машиностроении», г. Куйбышев, 1990, Двенадцатой межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи», г. Самара, 2002, IV Международной научно-технической конференции. "Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии», г. Тольятти, ТГУ- 2012, Всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: состояние, проблемы, перспективы", ФГБОУ ВПО «ОГТУ», г. Оренбург, 2012, на XVII Бенардосовских чтениях,- Международной научно-технической конференции, г. Иваново. 2013.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 11 работ, три из которых входят в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий рекомендованных ВАК, получено 1 авторское свидетельство на изобретение и 1 патент РФ на изобретение.

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель моментных электродвигателей с ограниченным углом поворота ротора, кольцевой обмоткой статора и магнитоэлектрическим возбуждением, отличающаяся тем, что в ней за счет совмещения численного моделирования электромагнитного поля и расчетов нелинейных цепей с сосредоточенными параметрами, уточнено влияние потоков рассеяния магнитов, насыщение магнитопровода и угла поворота ротора в процессе работы на характеристики двигателей.

2. Комплексный метод расчета полей рассеяния постоянных магнитов моментных двигателей, основанный на аналитических зависимостях и дополненный проверкой численными методами моделирования магнитного поля.

3. Алгоритм и программа оптимизационного расчета моментных двигателей, основанные на методе Бокса-Уилсона усовершенствованном аппаратом штрафных функций, учитывающие многокритериальность задачи, нелинейность и дискретность параметров для заданных ограничений и критериев оптимизации.

4. Рекомендации по выбору конструктивных параметров МД для формирования формы кривой магнитного поля в зазоре, позволяющие повысить стабильность момента двигателя в пределах рабочего угла поворота ротора до значений, недостижимых в известных аналогах.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 180 страниц, 46 рисунков, 13 таблиц. Список использованной литературы включает 108 наименований. В общее количество листов входят 9 приложений на 35 страницах.

## Содержание работы.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены области применения МД, проведен краткий анализ научных публикаций по выбранной проблеме, определены цели, задачи, методы исследований и основные научные результаты, выносимые на защиту, изложена научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** проводится краткий анализ сведений по вопросам конструктивных типов моментных двигателей (МД), требований к ним в зависимости от назначения, а также путей совершенствования конструкций, технологии и методов проектирования МД. Предлагается методика выбора конструктивной схемы, способа возбуждения и типа обмотки на примере двигателя с ограниченным углом поворота ротора.

Исходя из требований, предъявляемых к МД с ограниченным углом поворота ротора, предназначенных для использования в системах стабилизации бортовых авиационных систем, установлено, что предпочтительной является конструкция ротора с радиально намагниченными высококоэрцитивными постоянными магнитами без полюсных наконечников. Для двигателей, предназначенных работать в быстродействующих системах, нецелесообразно использовать полюсные наконечники из магнитомягких сталей из-за шунтирования полезного потока магнитов, демпфирующего действия вихревых токов и реакции якоря в переходных режимах.

Автором предложена методика сравнения эффективности использования кольцевых и барабанных обмоток, основанная на сравнении значений коэффициента использования обмотки, равного отношению длины активных частей обмоток к средней длине витка. Установлено, что в относительно коротких ( $\lambda \leq 0,6$ ) многополюсных ( $p \geq 3$ ) МД с ограниченным углом поворота ротора кольцевая обмотка имеет лучшее использование, чем барабанная. С учетом технологического фактора диапазон использования кольцевой обмотки может быть расширен. Для быстродействующих МД предпочтительнее малоиндукционная

беспазовая обмотка.

Если к МД предъявляются повышенные требования к стабильности электромагнитного момента в пределах ограниченного угла поворота ротора, то этого можно добиться путём формирования заданной кривой магнитного поля в зазоре машины в соответствии с техническим решением, признанным изобретением, предложенным автором с соавторами [66]. Суть изобретения заключается в том, что для формирования желательной кривой магнитной индукции в зазоре, в активной зоне кольцевой беспазовой обмотки предлагается располагать ферромагнитные вставки, позволяющие сохранить постоянным потокосцепление при всех положениях ротора.

**Во второй главе** работы представлена методика расчёта параметров и характеристик МД, основанная на численном моделировании электромагнитного поля, отличающаяся от известных учётом нелинейности магнитных характеристик магнитопроводов и постоянных магнитов, изменения картины и параметров поля при повороте ротора от центрального положения, влияния реакции якоря и вихревых токов на динамические характеристики двигателя.

В качестве геометрической модели двигателя предложено использовать двумерную модель с возможностью поворота области ротора относительно статора (или наоборот) как в пределах рабочего угла, так и в пределах всего полюсного деления. Физические свойства блоков модели задавались в соответствии со свойствами используемых материалов и электромагнитными нагрузками моделируемого двигателя. Расчёт электромагнитного поля производился для установившегося режима (магнитостатическая задача) и для переходных динамических режимов (нестационарная задача переменных токов) в программной среде ELCUT на основе уравнений Максвелла и общепринятых допущений и граничных условий. В результате математического моделирования электромагнитного поля, было установлено, что реакция статора оказывает несущественное влияние на поле индуктора. Следствием этого является линейность момент-

ной характеристики в функции тока управления. Исследование моментной характеристики в функции угла поворота ротора показало, что для предложенной конструкции МД нестабильность момента составила допустимые 2,34%, что доказывает верность принятых конструктивно-технических решений при создании двигателей. Для двигателей с более высокими требованиями к стабильности момента, автором предложены конструктивные решения [66] направленные на повышение статической стабильности момента. Математическое моделирование этих конструкций показало их эффективность. Применение полюсных наконечников не только приводит к снижению результирующего момента из-за увеличенных потоков рассеяния, но и не дает повышения стабильности момента в пределах угла поворота. Расчет нестационарных режимов двигателя по предложенной математической модели показал высокое электромагнитное быстродействие (электромагнитная постоянная – 0,135 мс) и недостижимую в двигателях традиционной конструкции скорость нарастания вращающего момента. В математической модели впервые было учтено демпфирующее действие вихревых токов в сердечниках в переходных режимах.

**В третьей главе** изложена методика оптимизационного проектирования моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора, основанная на математической модели, учитывающей беспазовую структуру кольцевой обмотки статора, уточнённые значения коэффициентов магнитной проводимости и рассеяния полюсов, а также дискретность обмоточных слоёв и числа пар полюсов.

Результаты исследования показали, что, что при проектировании МД с ограниченным углом поворота ротора, в качестве критерия оптимальности целесообразно принимать обобщенный параметр, в который входят со своими весовыми коэффициентами относительные значения частных параметров машины – массы двигателя, массы магнитов, потребляемой мощности и т. д.

Разработанная аналитическая методика расчёта полей рассеяния радиальной магнитной системы даёт возможность определять уточнённые значения коэффициентов рассеяния для математической модели, используемой при оптимизационном проектировании. Методика проверена и уточнена численными расчётами магнитных полей рассеяния для конкретных двигателей.

Проведённый анализ поверхностей отклика, построенных сетчатым методом с учётом ограничений в виде штрафных функций, позволил определить предварительные области экстремумов параметров оптимизации и соответствующие им интервалы варьируемых переменных.

**В четвёртой главе** приведены результаты оптимизации МД по обобщённым параметрам и проведено сравнение статических и динамических характеристик разработанных двигателей с отечественными и зарубежными аналогами. Даны сравнения экспериментальных и расчётных статических и динамических характеристик МД, а также оценка адекватности разработанных теоретических моделей.

# **1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МОМЕНТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ТРЕБОВАНИЙ К НИМ**

В настоящей главе проводится краткий анализ конструктивных типов моментных двигателей (МД), требований к ним в зависимости от назначения, а также путей совершенствования конструкций, технологии и методов проектирования МД. Предлагается методика выбора конструктивной схемы, способа возбуждения и типа обмотки на примере двигателя с ограниченным углом поворота ротора.

## **1.1. Конструктивные типы моментных двигателей и требования к ним в зависимости от области применения**

В [90] предлагается следующее определение для МД: «МД называется электромеханический преобразователь, у которого на вход подается электрический сигнал постоянного или переменного тока, а выходом является электромагнитный момент; при этом в рабочем режиме ротор двигателя либо неподвижен, либо вращается, но с малой частотой». Часто очень трудно провести четкую границу между вращающимся МД и тихоходным двигателем с повышенным моментом. В режиме «чистого» МД, когда ротор его неподвижен, вся электрическая энергия, подводимая к нему, преобразуется в тепловую и идет на нагрев обмоток. Этот режим соответствует режиму короткого замыкания (пусковому режиму) обычных вращающихся двигателей. Вследствие этого МД, как правило, имеют из-за худших условий охлаждения, бóльшие массу и габариты по сравнению с вращающимися двигателями с таким же моментом.

МД находят применение в тех системах, где не всегда могут быть применены быстроходные двигатели с редуктором. В первую очередь - это системы автоматической ориентации и стабилизации различных приборов летательных аппаратов (ЛА), приводы осей гироскопических устройств, фотоаппаратов, платформ телескопов, датчиков ориентации и т.п. Там, где недопустимы неиз-

бежные в редукторах люфты, стабилизирующие МД незаменимы. Задача такого двигателя создавать вращающий момент, действующий на объект при отклонении его от заданного положения. Часто МД служит одновременно и для поворота объекта из одного фиксированного положения в другое.

По конструкции МД имеют множество различных модификации. МД могут отличаться способом создания основного магнитного потока (электромагнитное возбуждение или возбуждение от постоянных магнитов), числом полюсов (от униполярных до машин с сотнями полюсов, в приводах платформ крупных наземных телескопов), конструкцией якорной обмотки, которая может размещаться как на статоре, так и на роторе и многими другими признаками. МД с неограниченным углом поворота ротора бывают коллекторного типа или вентильные – с полупроводниковым коммутатором, питающим неподвижную многофазную обмотку статора. Если силовая обмотка расположена на роторе, то ее питание осуществляется либо через коллектор во вращающихся двигателях, либо через гибкие токоподводы в машинах с ограниченным углом поворота ротора.

Большое разнообразие конструкций МД объясняется широким диапазоном их применения. В некоторых системах [36] габариты и вес машины играют второстепенную роль, а на первый план выдвигается удельный по потребляемой мощности момент. В МД, которые предназначены для использования в ЛА [11,68], главным требованием к двигателю является его удельный по массе (реже по объему) момент и минимальная потребляемая мощность. При этом стоимостные характеристики отходят на второй план.

Анализируя возможные области применения, можно выделить основные требования, которые, как правило, предъявляются ко всем типам МД:

1. Минимальная масса и габариты двигателя. Следует отметить, что часто разработчик не имеет возможности оптимизировать МД по габаритам, так как двигатель является частью более сложной системы, ограничен размерами и

даже может не иметь собственных подшипников, являясь встроенной машиной [25,97].

2. Минимальная потребляемая двигателем мощность. Это требование в первую очередь определяет нагрев машины, а, следовательно, и стабильность её характеристик. Кроме того, в системах автономных объектов мощность, потребляемая МД может составлять существенную долю от ограниченной мощности бортовой сети.

3. К вращающимся МД, как правило, предъявляется требование стабильности момента в пределах одного оборота и его линейной зависимости от сигнала управления. Достаточно сложно получить линейную зависимость момента от напряжения питания из-за неустойчивости переходного падения напряжения на щетках в коллекторных машинах, действия реакция якоря и температурного изменения сопротивления управляющей обмотки. Поэтому системы стабилизации с МД чаще всего питаются от источников тока [27,29], которые хотя и сложнее источников э.д.с., но обеспечивают меньшую нелинейность выходной характеристики. Обеспечение стабильности момента в пределах одного оборота во вращающихся двигателях – одна из наиболее сложных проблем при создании МД. В зубцово - пазовых машинах даже с закрытыми пазами и оптимальным их скосом не удается достичь стабильности момента выше 3...4 % от среднего значения. В двигателях с гладким якорем пульсации момента обусловлены только числом ламелей в коллекторных машинах и числом фаз и формой питающего напряжения в вентильных МД. Во всех случаях к точности изготовления МД предъявляются более высокие требования, чем у обычных электрических машин.

4. Важной характеристикой качества МД является момент трогания двигателя и соответствующий ему уровень сигнала. Чувствительность МД определяется моментом холостого хода и переходным сопротивлением скользящего контакта в коллекторных машинах.

5. Так как МД работает чаще всего в автоматических системах, то высокие требования предъявляются к его быстродействию. Большие электромагнитные и электромеханические постоянные времени резко сужают полосу пропускания системы и могут привести ее к неустойчивости.

В [90] дается анализ эффективности использования МД в следящей системе по сравнению с редукторным приводом и быстроходным исполнительным двигателем. Отмечается, что при силовых внешних воздействиях возникает динамическая ошибка вследствие механической инерционности ротора и редуктора. В системе же стабилизации с МД энергия сети тратится лишь на компенсацию момента холостого хода двигателя и системы. Кроме этого любой редукторный привод имеет неустранимую статическую ошибку из-за неизбежного люфта в редукторе.

Наряду с отмеченными преимуществами безредукторный привод с МД имеет и недостатки, основные из которых следующие:

1. Так как ротор МД соединен непосредственно с исполнительным механизмом, то любые колебания момента в пределах рабочего угла поворота передаются на нагрузку и не всегда могут быть эффективно компенсированы системными средствами. Поэтому одна из задач настоящей работы заключается в получении стабильной, в пределах заданной точности, характеристики момента во всем диапазоне рабочих углов поворота. Для упрощения системы управления автором предлагается ряд конструктивно-технических мер для получения линейной зависимости момента от сигнала управления (тока в якорной обмотке).

2. МД обычной зубцово-пазовой конструкции проигрывает по быстродействию редукторному приводу с быстроходным двигателем [90]. Поэтому одной из основных задач предлагаемой работы является разработка МД, конкурентоспособного по быстродействию с редукторной системой.

3. МД, как правило, имеет худшие удельные по потребляемой мощно-

сти показатели по сравнению с быстроходным редукторным приводом. Поэтому вопрос минимизации потребляемой мощности весьма важен при разработке МД. Снижение удельной потребляемой мощности на единицу момента – актуальная проблема, решаемая в представленной работе.

## **1.2 МД с ограниченным углом поворота ротора**

Часто исполнительный механизм имеет ограниченный угол поворота и применение вращающихся коллекторных или вентильных МД становится излишним. Вместо них можно использовать специальные двигатели с ограниченным углом поворота ротора. Эти машины отличаются от вращающихся простотой конструкции, более высокой надежностью, большим удельным моментом и меньшей потребляемой мощностью. Для того чтобы избежать гибких токопроводов, ротор МД с ограниченным углом поворота (МДОУП) обычно является индуктором и выполнен с постоянными магнитами. Требования к МДОУП, в основном не отличаются от общих требований к МД, изложенным в разделе 1.1 настоящей работы. Однако, в связи с тем, что угол поворота ротора может составлять всего несколько градусов, стабильность моментной характеристики должна быть значительно выше, чем у вращающихся двигателей.

По конструкции МДОУП имеют множество типов и модификаций. Рассмотрим только основные типы магнитоэлектрических двигателей, так как электромагнитное возбуждение применяется в МД редко и, в основном, только в крупных машинах.

### **1.2.1. Двигатели с подвижной обмоткой**

Угол поворота ротора таких машин может быть от нескольких градусов до  $250 \dots 270^\circ$ . Неподвижная магнитная система создает основной поток, в зоне которого находится подвижная обмотка. Обмотка может быть, как полого типа, так и уложенной на подвижный магнитопровод (рис. 1.1 а, б) [92].

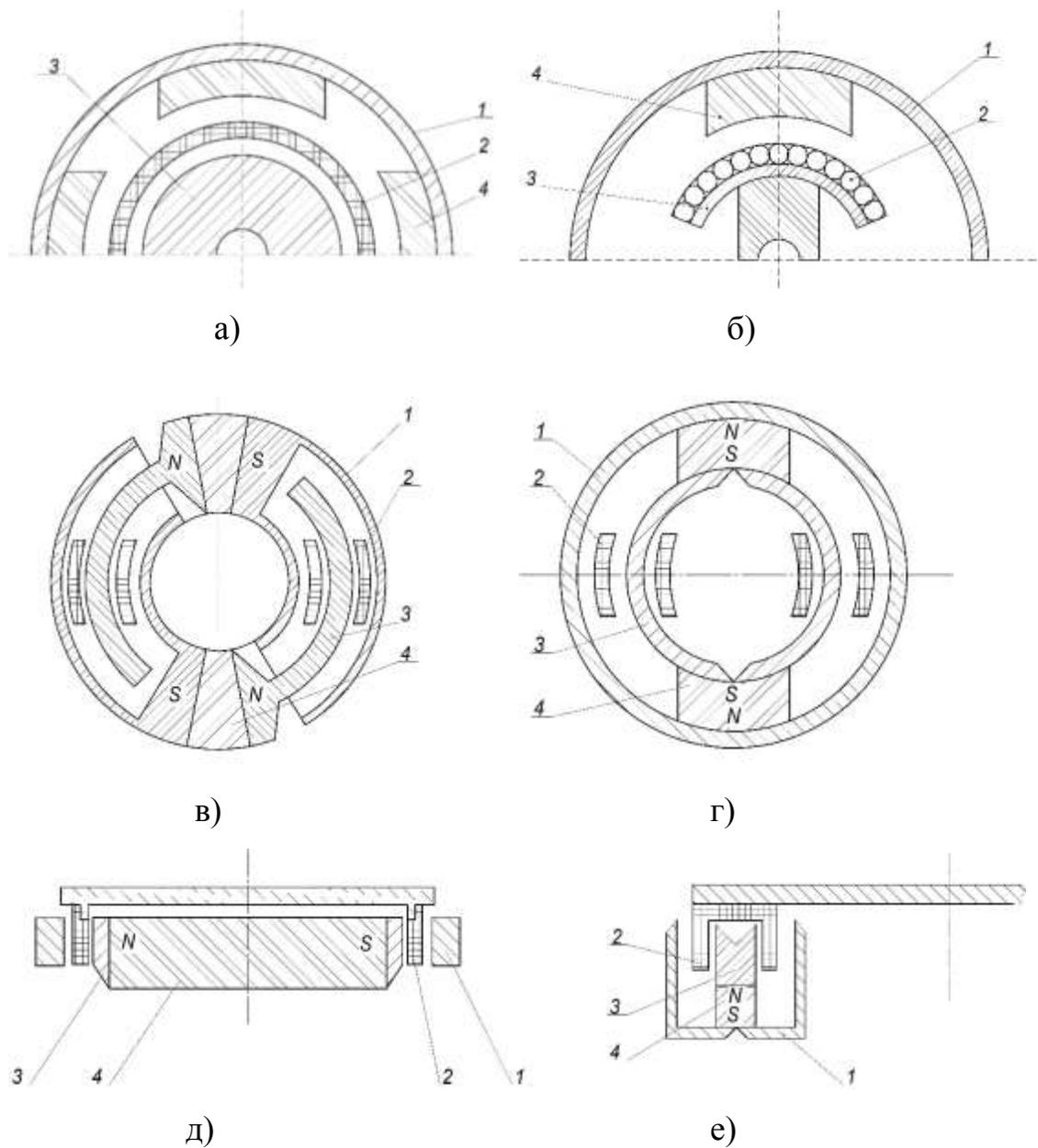


Рисунок 1.1 – МД с ограниченным углом поворота ротора и подвижной обмоткой.

а) ротор полого типа; б) МД с обмоткой типа «гладкий якорь»; в) МДОУП с полностью активной обмоткой; г) МДОУП с двумя магнитопроводами; д) МД с кольцевой обмоткой; е) МД с барабанной обмоткой.

1 – наружный магнитопровод; 2 – подвижная катушка; 3 – внутренний магнитопровод; 4 – магнит.

В первом случае электромагнитная постоянная мала, мал и момент инерции якоря, но из-за повышенного немагнитного зазора при одинаковой мощно-

сти системы возбуждения индукция в зазоре меньше, чем в машинах с гладким якорем и электромеханическая постоянная может оказаться соизмеримой и даже большей, чем в МД с ферромагнитным сердечником на якоре.

Для повышения коэффициента использования обмотки и снижения потребляемой мощности существует конструкция, в которой обмотка полностью активна [90] (рис. 1.1 в). В такой конструкции можно достичь весьма малого значения управляющей мощности, но масса магнитопроводов здесь велика. Кроме того, подобный двигатель сложен по конструкции и труднореализуем в производстве. Подобными недостатками обладает и МД, показанный на рис. 1.1 г. Отличие его от предыдущего заключается в том, что активной является только одна сторона подвижной обмотки. Во внутреннем магнитопроводе должен быть предусмотрен разрыв для ослабления поля реакции якоря.

Существует еще ряд конструкций МД, у которых обмотка располагается непосредственно на элементах исполнительного механизма [90,92]. При этом снижается момент инерции системы, исключаются узлы соединения двигателя и исполнительного органа. На рис. 1.1 д, е показаны в качестве примера встроенные МД, служащие для стабилизации оптических систем. Отличительной особенностью таких двигателей является их узкоспециальное применение.

Общими достоинствами описанных типов МД является малая мощность управления и высокая чувствительность. Эти двигатели имеют малый момент инерции и высокое быстродействие. К недостаткам, в первую очередь, следует отнести необходимость гибкого токоподвода к ротору, который создает дополнительный тормозной момент, влияющий на точность системы. Теплоемкость катушки подобных двигателей мала и, следовательно, возникает проблемы с отводом тепла и температурной погрешностью.

Все описанные двигатели имеют достаточно сложную технологическую реализацию. Отсюда следует вывод: МД с подвижной катушкой рационально применять лишь в маломощных приборных системах. Там же, где требуется со-

здание значительных моментов, оправданно использовать возбуждение со стороны ротора при неподвижной якорной обмотке, расположенной на статоре.

### 1.2.2. Двигатели с магнитами на роторе

МД с индуктором, расположенным на роторе наиболее распространены среди всех типов МД, как вращающихся, так и с ограниченным углом поворота ротора. Это объясняется отсутствием у них необходимости токоподвода к вращающейся части машины, а, следовательно, такие машины отличаются повышенной надежностью. Обмотка статора – сосредоточенная или распределенная, питается постоянным или модулированным током. При необходимости в многофазных системах статорная обмотка может питаться от преобразователя переменным током и МД в этом случае может работать как синхронный вращающийся двигатель или как вентильный двигатель постоянного тока.

По конструкции ротор с постоянными магнитами может быть цилиндрического или торцевого исполнения (рис. 1.2). При торцевом исполнении двигателя иногда удается сократить осевой размер машины, но у таких МД возникает проблемы, связанные с наличием сил одностороннего магнитного тяжения ротора, вызывающими значительные осевые нагрузки на подшипники.

Для создания желательной формы кривой магнитного поля в зазоре и для борьбы с размагничивающим действием реакции якоря часто и в цилиндрических и торцевых машинах используют полюсные наконечники из магнитомягкой стали. Эти наконечники легче обрабатываются и им можно придать желаемую форму путем механической обработки. Так, во вращающихся МД, где требуется, как правило, синусообразная форма кривой поля, за счет полюсных наконечников увеличивают воздушный зазор под краями полюсов так же, как у явнополюсных синхронных машин.

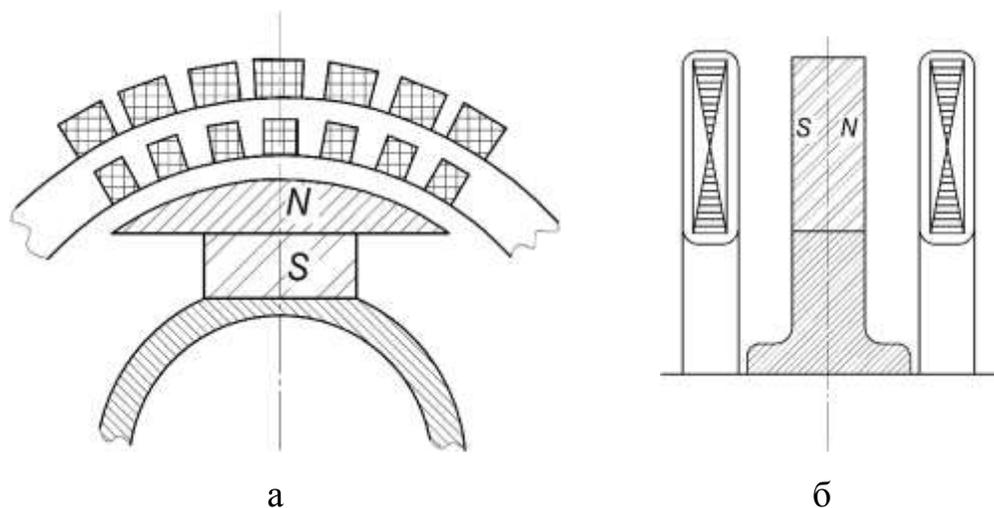


Рисунок 1.2 – МД цилиндрического и торцевого исполнения.

- а) МД цилиндрического исполнения с пазовой кольцевой обмоткой;
- б) МД торцевого исполнения с двухсторонним беспазовым статором.

В МД с ограниченным углом поворота ротора, наоборот, желательно приблизить кривую индукции в пределах рабочего угла поворота к прямоугольной. Иногда полюсные наконечники служат не для распределения магнитной индукции, а для ее концентрации (когда площадь полюсного наконечника меньше площади сечения магнита). Это бывает чаще всего в машинах с «коллекторным» типом магнитопровода (рис. 1.8 д) (не путать с коллекторным МД постоянного тока).

Во всех случаях применения полюсных наконечников есть два основных отрицательных момента:

первое – в полюсном наконечнике шунтируется часть, иногда значительная, магнитного потока магнита;

второе – полюсный наконечник из магнитомягкой стали, снижает быстродействие двигателя за счет демпфирующего действия вихревых токов в переходных режимах.

Во всех случаях не рекомендуется делать полюсные наконечники толщиной более чем 1/10 часть высоты магнита. Более подробно вопросы выбора системы возбуждения для МД описаны в разделе 1.3.2. настоящей работы.

### 1.3. Обоснование выбора конструкции

#### 1.3.1. Выбор типа обмотки

Для МД с постоянными магнитами и ограниченным углом поворота ротора необходимо сделать обоснованный выбор типа обмотки. Из возможных вариантов обмоток уже на первом этапе анализа были отклонены обмотки якоря, размещенные на немагнитном каркасе (обмотки типа «полый якорь»). Эти обмотки, несмотря на малые значения электромагнитной постоянной, имеют существенные недостатки – двойной воздушный зазор, большой поток рассеяния, сложную технологическую реализацию для высокомоментных двигателей.

Зубцово-пазовая конструкция статора с барабанной или кольцевой обмоткой позволяет получить высокие значения удельного (по массе или объему) момента. Так как, в конечном счете, момент двигателя определяется произведением

$$M = p \cdot A \cdot \Phi \cdot D, \text{ Нм} \quad (1.1)$$

где  $p$  – число пар полюсов;

$A$  – линейная нагрузка статора, А/м;

$\Phi$  – полезный магнитный поток полюса, Вб;

$D$  – расчетный диаметр двигателя, м.

В зубцово-пазовых машинах при одинаковой мощности системы возбуждения из-за малых значений воздушного зазора можно достичь весьма высоких значений индукции в зазоре, следовательно, полезного потока. Кроме того, при одинаковой плотности тока линейная нагрузка зубчатого статора больше, чем беспазового. Но, для случая, когда в техническом задании жестко определены требования к электромагнитному быстродействию и равномерности вращающего момента в пределах рабочего угла поворота ротора, зубцово-пазовая конструкция не может быть применена, в первую очередь из-за большой индуктивности обмотки, которая не позволяет реализовать требуемое быстродействие и, во-вторых, из-за зубцовых пульсаций момента, которые не-

возможно устранить системными методами.

МД с постоянными магнитами и полюсными наконечниками на роторе, (рис. 1.3) обладает, отмеченными выше, недостатками и будет рассмотрен как альтернативный вариант при анализе характеристик методом численного моделирования магнитного поля.

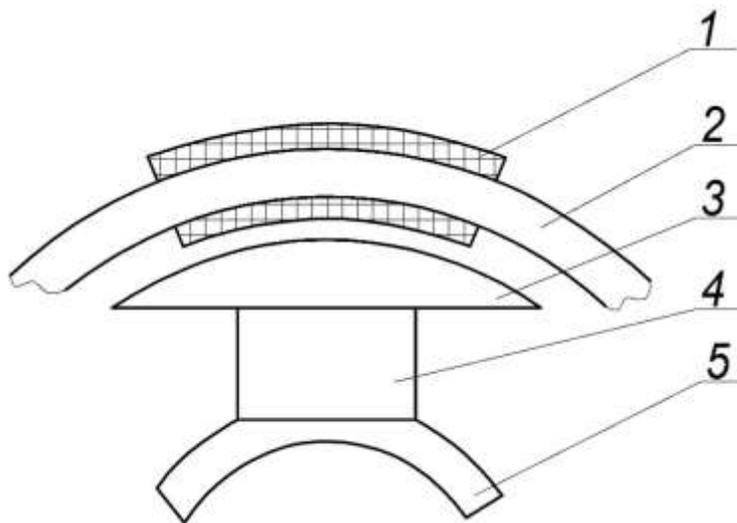


Рисунок 1.3 – МД с кольцевой обмоткой и полюсным наконечником на роторе.

1 – кольцевая обмотка; 2 – сердечник статора; 3 – полюсный наконечник;  
4- постоянный магнит; 5 – сердечник ротора.

Автором предлагается использовать беспазовую распределенную обмотку статора, занимающую дугу статора, несколько большую, чем дуга рабочего угла поворота ротора. Это необходимо для обеспечения постоянного момента в пределах рабочего угла поворота. Полюсный наконечник предлагается не использовать. Это дает выигрыш в полезном потоке не менее 10 %, хотя и несколько усложняет форму постоянных магнитов.

Тип обмотки (барабанная или кольцевая) необходимо определить на основе соотношений основных размеров двигателя. Известно, что в обычных машинах со значениями относительной длины ротора  $\lambda$ , лежащих в пределах 0,8...2,5 и выше, барабанные обмотки дают лучший коэффициент использования, чем кольцевые. Но моментные двигатели, как правило, имеют малые зна-

чения относительной длины, лежащие в пределах  $0,1 \dots 0,4$ . При этом даже в многополюсных двигателях часто кольцевые обмотки используются лучше, чем барабанные. Кроме того, кольцевые обмотки беспазового статора значительно технологичнее барабанных [37, 38].

Для более строгого обоснования выбора типа обмотки автором были проведены расчеты коэффициента использования  $K_{исп}$  для барабанных и кольцевых обмоток [77]

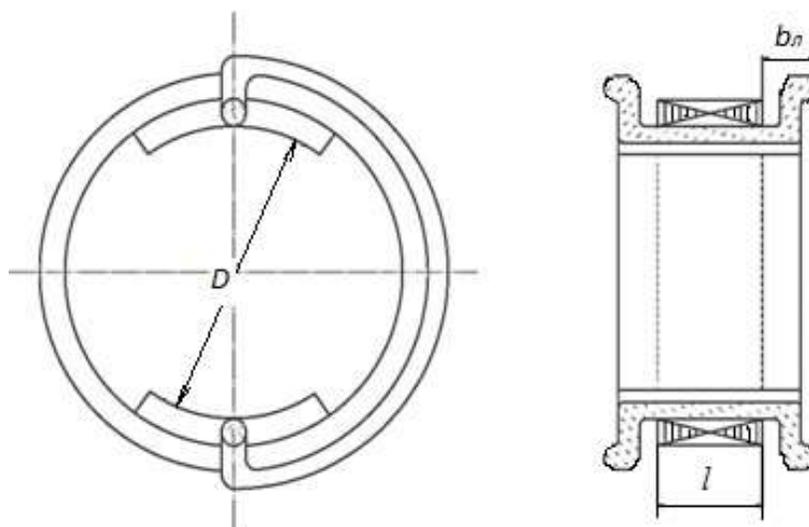


Рисунок 1.4 – Двухполюсная барабанная обмотка

$$K_{исп(\delta)} = \frac{2l}{l_{вит}} \quad (1.2)$$

$$K_{исп(\kappa)} = \frac{l}{l_{вит}} \quad (1.3)$$

В числителе первой формулы стоит множитель 2, так как в барабанных обмотках полезно используются две активные стороны витка, а в кольцевых только одна. Длина витка барабанной обмотки в первом приближении может быть определена выражением (1.4), предлагаемом в [88].

$$l_{\text{вум}(\delta)} = 2 \cdot \left( l + \frac{\kappa_l \pi D}{2p} + b_l \right), \text{ м} \quad (1.4)$$

Где  $\kappa_l = 1.15 \dots 1.25$  (см. [88]),

$l, D, b_l$  – см. рис 1.4.

$$K_{\text{усп}(\delta)} = \frac{l}{l + \frac{\kappa_l \pi D}{2p} + b_l}; \quad (1.5)$$

$$K_{\text{усп}(\delta)} = \frac{\lambda}{\lambda + \frac{\kappa_l \pi}{2p} + \frac{b_l \lambda}{l}}; \quad (1.6)$$

где  $\lambda = l / D$

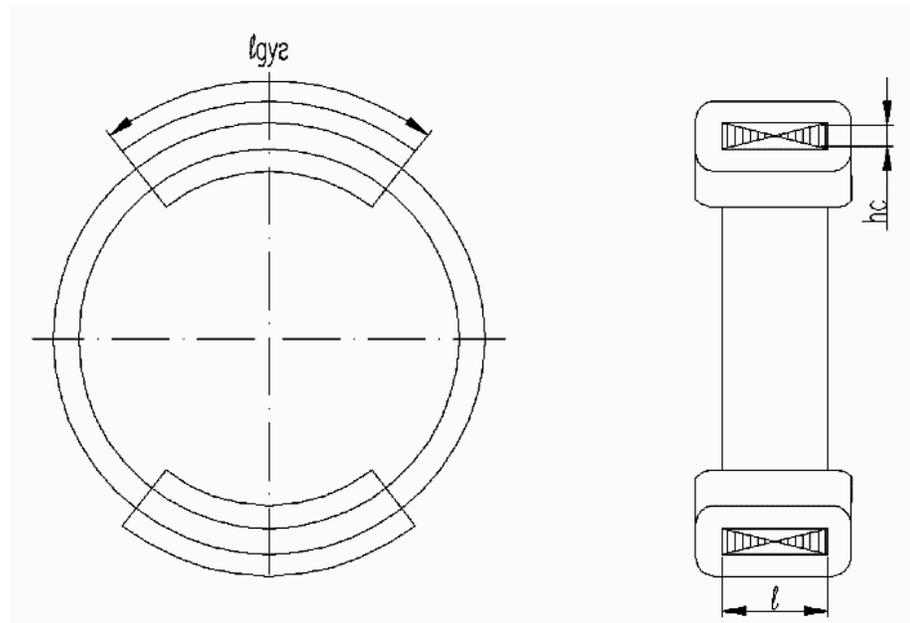


Рисунок 1.5 – Обмотка кольцевого типа.

Для обмоток кольцевого типа

$$l_{\text{вум}(\kappa)} = 2K_3 \cdot (h_c + l) \quad (1.7)$$

где  $K_3 = 1.05 \dots 1.1$

$h_c$  – высота спинки статора (см. рис 1.5)

$$K_{\text{усп}(\kappa)} = \frac{l}{2K_3(h_c + l)} \quad (1.8)$$

Для рассматриваемого интервала МД с номинальным моментом 1...10 Нм в таблице 1.1 и на графиках рис. 1.6 приведены значение коэффициентов использования кольцевых и барабанных обмоток при различных сочетаниях длины машины  $l$ , относительной длины машины  $\lambda$  и числа пар полюсов.

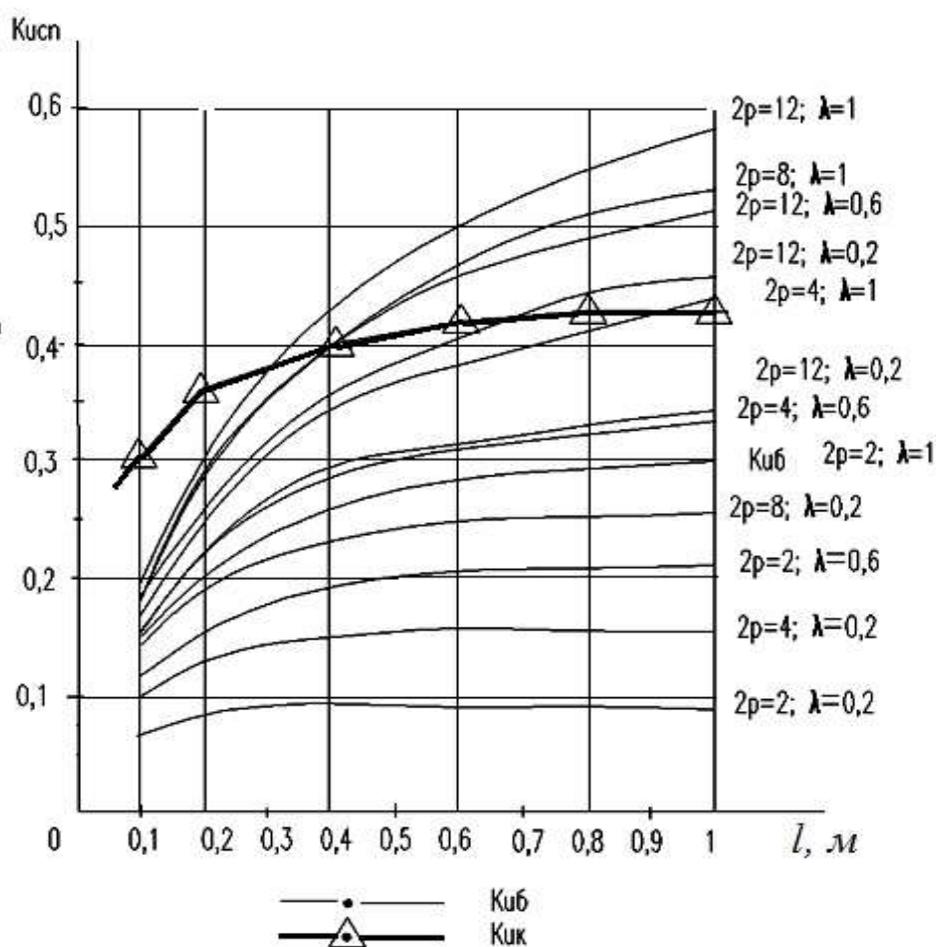


Рисунок 1.6 – Зависимость коэффициента использования обмотки кольцевого  $K_{ик}$  и барабанного  $K_{иб}$  типа от геометрии машины.

Анализируя результаты расчетов можно сделать следующие выводы:

–коэффициент использования барабанных обмоток для МД с беспазовым статором выше, чем у кольцевых только в относительно длинных ма-

шинах ( $\lambda \geq 0.4$  и  $l > 60$  мм);

– барабанные обмотки предпочтительнее в многополюсных машинах ( $2p$  не меньше 8). В таблице эти варианты выделены серой заливкой.

С учетом фактора технологичности следует в моментных двигателях с  $\lambda \leq 0.4$  отдать предпочтение кольцевым беспазовым обмоткам.

Таблица 1.1 - Зависимость коэффициента использования обмотки барабанного  $K_{и\bar{o}}$  и кольцевого  $K_{ик}$  типа от геометрии машины.

| $l, мм$<br>$\lambda$ | 10   | 20   | 40   | 60   | 80   | 100  | $2p$ |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1                    | 0.15 | 0.20 | 0.26 | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 2    |
| 0.8                  | 0.14 | 0.19 | 0.23 | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 2    |
| 0.6                  | 0.12 | 0.16 | 0.19 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 2    |
| 0.4                  | 0.10 | 0.13 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 2    |
| 0.2                  | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 2    |
| 0.1                  | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 2    |
| 1                    | 0.17 | 0.25 | 0.37 | 0.38 | 0.41 | 0.43 | 4    |
| 0.8                  | 0.16 | 0.24 | 0.31 | 0.35 | 0.37 | 0.39 | 4    |
| 0.6                  | 0.15 | 0.22 | 0.28 | 0.31 | 0.32 | 0.34 | 4    |
| 0.4                  | 0.14 | 0.19 | 0.23 | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 4    |
| 0.2                  | 0.10 | 0.13 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 4    |
| 0.1                  | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 4    |
| 1                    | 0.18 | 0.29 | 0.40 | 0.47 | 0.51 | 0.53 | 8    |
| 0.8                  | 0.18 | 0.28 | 0.39 | 0.44 | 0.48 | 0.50 | 8    |
| 0.6                  | 0.17 | 0.26 | 0.36 | 0.41 | 0.44 | 0.46 | 8    |
| 0.4                  | 0.16 | 0.24 | 0.31 | 0.35 | 0.37 | 0.39 | 8    |
| 0.2                  | 0.14 | 0.19 | 0.23 | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 8    |
| 0.1                  | 0.10 | 0.13 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 8    |
| 1                    | 0.19 | 0.30 | 0.43 | 0.50 | 0.55 | 0.58 | 12   |
| 0.8                  | 0.19 | 0.29 | 0.42 | 0.48 | 0.53 | 0.56 | 12   |
| 0.6                  | 0.18 | 0.28 | 0.40 | 0.46 | 0.49 | 0.52 | 12   |
| 0.4                  | 0.17 | 0.26 | 0.36 | 0.41 | 0.44 | 0.46 | 12   |
| 0.2                  | 0.15 | 0.22 | 0.28 | 0.31 | 0.32 | 0.34 | 12   |
| 0.1                  | 0.12 | 0.16 | 0.19 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 12   |
| $K_{ик}$             | 0.30 | 0.36 | 0.40 | 0.42 | 0.43 | 0.43 |      |

Как отмечалось выше, требование к стабильности моментной характери-

стики в пределах рабочего угла поворота ротора сводится в основном к формированию соответствующей формы кривой магнитной индукции в зазоре машины. Не всегда такую кривую удастся получить за счет профилирования магнита или его полюсного наконечника. Автором в соавторстве с Андреевым А.Н. и др. предложена конструкция МД постоянного тока с ограниченным углом поворота, признанная изобретением [66]. Суть изобретения заключается в следующем: МД постоянного тока с ограниченным углом поворота содержит магнитопровод ротора 1 (рис. 1.7) с радиально намагниченными постоянными магнитами 2 чередующейся полярности.

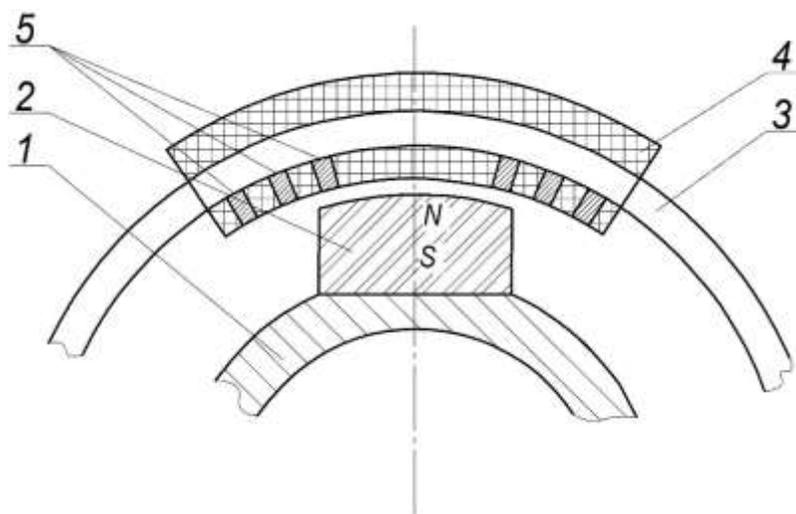


Рисунок 1.7 – МД с формированием кривой поля в зазоре с помощью ферромагнитных вставок.

Внешний тороидальный магнитопровод 3 содержит кольцевую распределенную обмотку 4, которая в пределах полюсного деления в активной зоне снабжена вставками 5. Вставки состоят из ферромагнитных и немагнитных прокладок. Такая конструкция дает возможность получить форму кривой поля, близкой к желаемой в рабочем диапазоне угла поворота ротора, что повышает стабильность моментной характеристики до 1,5...2 % без системной коррекции.

### 1.3.2. Выбор типа возбуждения

В предыдущем разделе был определен выбор типа обмотки для моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора – беспазовая распределенная многослойная кольцевая обмотка из круглого провода. Применение такой обмотки накладывает определенные требования на систему возбуждения машины. Так как обмоточный слой вынесен в воздушный зазор, то величина немагнитного зазора между статором и ротором значительно возрастет, особенно в многослойных обмотках. Это, естественно, требует для обеспечения приемлемого уровня индукции в зазоре мощной системы возбуждения. Расчеты показывают, что для обеспечения индукции 0,35...0,6 Тл при помощи обмотки возбуждения, ротор с явно выраженными полюсами должен иметь массу в 5...8 раз большую, чем масса статора и в 3...4 раза большую, чем индуктор с постоянными магнитами. Кроме того, к ротору с электромагнитами нужно обеспечить токоподвод, например, гибкими проводниками, что снижает надежность двигателя и отрицательно влияет на его чувствительность.

Таким образом, выбор был остановлен на системе возбуждения от постоянных магнитов. При выборе материала постоянных магнитов автор исходил из следующих соображений:

- для обеспечения требуемого значения индукции в машине с зазором в несколько миллиметров нужен магнит с коэрцитивной силой не менее  $H_{св} \geq 400$  кА/м и остаточной индукцией не менее  $B_r \geq 0,7$  Тл;
- материал должен иметь стабильные магнитные характеристики в достаточно широком диапазоне рабочих температур (- 50°C ...+ 140°C);
- постоянные магниты должны иметь минимальный разброс параметров.

Из современных общедоступных материалов таким требованиям отвечают магниты на основе самарий – кобальтовых сплавов и магниты неодим –

железо – бор. Последние имеют очень высокие энергетические показатели  $H_{св} = 950 \dots 1100$  кА/м и  $B_r = 0,9 \dots 1,2$  Тл. К достоинству этих магнитов следует отнести и более низкую стоимость за счет отсутствия такого дорогого и дефицитного компонента, как самарий. Единственным существенным недостатком магнитов Nd – Fe – В на сегодняшний день является их низкая температурная стабильность. При рабочих температурах выше  $100^\circ\text{C}$  эти магниты существенно теряют свои свойства. Хотя в этой проблеме в настоящее время наметилось продвижение вперед, использовать этот материал в высоконагруженных МД для авиационных систем пока не представляется возможным.

Высококоэрцитивные редкоземельные магниты на основе Sm – Co (КС – 37, КС – 37А, КСП – 37 и т.п.) лишены недостатков, перечисленных выше, и отвечают всем требованиям к материалам для индуктора МД. Основным недостатком магнитов на основе Sm – Co – их высокая стоимость. Поэтому при выборе конструкции индуктора необходимо исходить из соображений использования минимального по массе количества магнитов. Естественно, что после выбора типа конструкции ротора, необходимо провести оптимизационный расчет (см гл.3). Существует несколько основных конструктивных схем ротора с постоянными магнитами [90]: литые роторы типа “звездочка” с неявновыраженными полюсами, когтеобразный ротор, ротор с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов (коллекторного типа) и др. (рис 1.8). Индукторы типа “звездочка” и с неявновыраженными полюсами (рис 1.8 а, в) не могут быть рекомендованы для изготовления из Sm – Co магнитов по причине трудности намагничивания и из-за большого объема магнитов. В системах с полюсными наконечниками, например, показанной на рис 1.8 б или с когтеобразными наконечниками (рис 1.8 г) есть два существенных недостатка, отмеченных ранее:

– в полюсных наконечниках из магнитомягкой стали шунтируется значительная часть потока постоянных магнитов (по данным [16] до  $10\dots 15\%$ , а при неправильном выборе размеров и до  $50\%$ );

– полюсный наконечник оказывает демпфирующее действие в переходных процессах, замыкая поперечную реакцию якоря, что приводит к снижению электромагнитного быстродействия двигателя.

Подтверждение этих тезисов будет доказано в главе 2 численными методами анализа магнитного поля машины.

Магнитная система «коллекторного» типа с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов (рис 1.8 д) позволяет в зоне магнитомягких вставок 2 достигать больших значений индукции за счет концентрации магнитного потока. Индукция в зазоре при этом может в 1,5...2 раза превышать остаточную индукцию магнита. Такая система рациональна для использования в зубчатых машинах с малыми зазорами. Но при использовании ее в МД с гладким якорем требуется большая высота магнитов и их объем необоснованно возрастает. Кроме того, коллекторная система не свободна от недостатка, присущего индукторам с полюсными наконечниками – шунтирования полезного потока в магнитомягких вставках.

Для использования в МД с кольцевой распределенной беспазовой обмоткой автором была выбрана система возбуждения с постоянными высококоэрцитивными магнитами, наклеенными на магнитомягкий магнитопровод ротора в виде полого цилиндра. Магниты прямоугольного сечения дугообразной формы намагничены в радиальном направлении. Полюсные наконечники не используются (рис. 1.8 е). Такая система дает возможность рационально использовать магниты в рабочей точке, близкой к максимуму магнитной энергии. Поток рассеяния на  $\frac{3}{4}$  замыкается по воздуху и сведен к минимуму.

Поток реакции якоря замыкается через постоянный магнит с малой магнитной проницаемостью и поэтому не оказывает влияния на основной магнитный поток и характеристики МД. Электрическая проводимость  $S_m - C_o$  магнитов также мала, следовательно, мало и демпфирующее действие вихревых токов в переходных процессах.

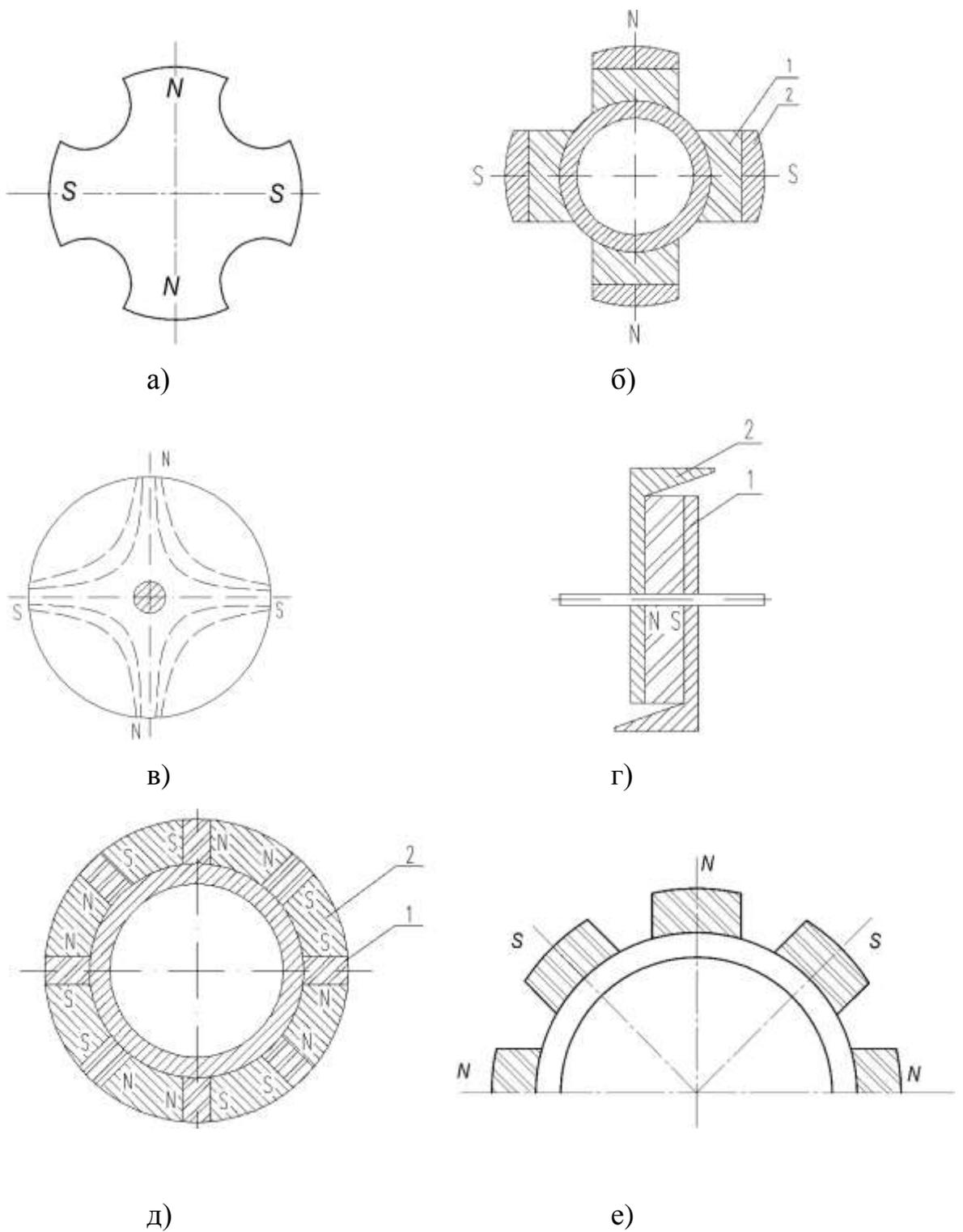


Рисунок 1.8 – Конструкции роторов МД.

а) ротор типа «звездочка»; б) ротор с полюсными наконечниками; в) неявнополюсный ротор; г) ротор с когтеобразными полюсами; д) индуктор «коллекторного типа»; е) ротор без полюсных наконечников.

## 1.4. Выводы

1. Анализ известных сведений об особенностях работы МДОУПР и направлениях совершенствования его технико-экономических характеристик показал целесообразность исполнения двигателя с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов, расположенных на роторе и намагниченных радиально.
2. Для двигателей, предназначенных работать в быстродействующих системах, нецелесообразно использовать полюсные наконечники из магнитомягких сталей из-за шунтирования полезного потока магнитов, демпфирующего действия вихревых токов и реакции якоря в переходных режимах.
3. В относительно коротких ( $\lambda \leq 0,6$ ) многополюсных ( $p \geq 3$ ) МД с ограниченным углом поворота ротора кольцевая обмотка имеет лучшее использование, чем барабанная. С учетом технологического фактора диапазон использования кольцевой обмотки может быть расширен. Для быстродействующих МД предпочтительнее малоиндукционная беспазовая обмотка.
4. Для формирования желательной кривой магнитной индукции в зазоре, в активной зоне кольцевой беспазовой обмотки рекомендуется располагать ферромагнитные вставки, позволяющие сохранить постоянным потокосцепление при всех положениях ротора в соответствии с рекомендациями, запатентованными в [66].

## **2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ МОМЕНТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Традиционные методы расчетов электрических машин [58,88,92], основанные на законах и уравнениях цепей, по мере накопления опыта проектирования дополнялись большим количеством поправок, эмпирических коэффициентов, вспомогательных таблиц и графиков. Благодаря этому и многолетнему опыту производства традиционных электрических машин достигнута удовлетворительная точность их расчетов инженерными методами.

При расчетах моментных двигателей с ограниченным углом поворота ротора, отличающихся от общепромышленных машин конструктивным типом кольцевой беспазовой обмотки, возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов, традиционные методы, основанные на расчете линейных цепей, могут дать удовлетворительную точность только при учете особенностей и уточненном определении сосредоточенных параметров методом численного моделирования магнитного поля машины.

Моментный двигатель представляет собой систему распределенных обмоток статора, магнитопроводов статора и ротора с анизотропными или изотропными ферромагнитными свойствами и систему возбуждения с постоянными магнитами, имеющую нелинейную намагниченность по одной оси. Решив аналитически известные уравнения магнитного поля для этих сред с заданными физическими параметрами для установившихся и переходных режимов, теоретически можно получить все характеристики МД, не пользуясь схемами замещения и другими подобными упрощающими методами. Однако вследствие чрезмерной сложности такого решения для реальной геометрии электрической машины на практике этот метод нереализуем. Аналитическое решение частных задач расчета магнитного поля возможно и весьма эффективно. Так в настоящей работе аналитическим методом решена в общем виде задача расчета полей рас-

сеяния с боковых граней магнитов. Численное моделирование на конкретной модели подтвердило правомерность принятых допущений и предложенной методики (см. гл. 3).

На практике решение нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих магнитное поле в МД, возможно численными методами математического моделирования, в частности, наиболее распространенным методом конечных элементов (МКЭ).

### 2.1. Математическое описание электромагнитного поля МД

Электромагнитное поле внутри и вне МД описывается системой дифференциальных уравнений Максвелла [94] и уравнениями связи между векторами магнитной индукции  $\vec{B}$  и векторами напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , векторами электрического смещения  $\vec{D}$  и векторами напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Уравнения Максвелла для определенности должны быть дополнены граничными условиями на поверхностях раздела сред. При расчетах используются следующие общепринятые допущения [45]:

1. По сравнению с ЭДС электромагнитной индукции пренебрежимо малы контактные ЭДС, ЭДС Томпсона, ЭДС Холла и ЭДС Толмена.
2. Токи в диэлектриках и конвекционные токи отсутствуют.
3. Пренебрежимо малы токи смещения (электромагнитное поле в машине квазистационарное).
4. Механические напряжения не влияют на параметры и размеры сред.
5. Параметры и размеры сред не зависят от температуры.

При принятых допущениях система дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитное поле моментного двигателя будет иметь вид[94]:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_i &= \vec{j}_i, & \operatorname{rot} \vec{E}_i &= -\frac{\partial \vec{B}_i}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{B}_i &= 0, & \operatorname{div} \vec{j}_i &= 0 \\ \vec{B}_i &= f_{Hi}(\vec{H}_i), & \vec{j}_i &= f_{Ei}(\vec{E}_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Первые четыре уравнения в системе (2.1) являются уравнениями Максвелла для  $i$ -той среды математической модели.  $\vec{j}_i$  - вектор плотности тока в  $i$ -той среде,  $\vec{B}_i$  - вектор магнитной индукции. Уравнение  $\operatorname{div} \vec{j}_i = 0$  следует из уравнения  $\operatorname{div} \vec{D}_i = \rho$ , так как в МД отсутствуют свободные заряды

Граничные условия для поверхностей раздела сред  $i$  и  $j$  определяются равенствами

$$\vec{B}_i = \vec{B}_j; \quad \vec{H}_i = \vec{H}_j \quad (2.2)$$

Для описания электромагнитного поля МД удобно воспользоваться цилиндрической системой координат  $\vec{r}, \vec{\alpha}, \vec{z}$ , для которой любой из векторов системы уравнений (2.1) может быть определен через его проекции на оси координат, например

$$\vec{B} = \vec{r}B_r + \vec{\alpha}B_\alpha + \vec{z}B_z, \quad (2.3)$$

где  $\vec{r}, \vec{\alpha}, \vec{z}$  - единичные векторы (орты) по соответствующим осям;

$B_r, B_\alpha, B_z$  - проекции вектора  $\vec{B}$  на оси координат.

Если для описания поля воспользоваться двумерной моделью, то последнее слагаемое в уравнении (2.3) отсутствует.

Кроме уравнений электромагнитного поля (2.1) для описания процессов, происходящих в МД необходимо учитывать уравнения движения ротора

$$\left. \begin{aligned} M - M_0 &= J \frac{d\Omega}{dt} + M_{нз}; \\ \Omega &= \Omega_0 + \int_0^t \left( \frac{d\Omega}{dt} \right) dt \\ \varphi &= \varphi_0 + \int_0^t \Omega dt \pm 2\pi c \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

где  $M$  - электромагнитный момент;

$M_0$  - момент сопротивления холостого хода;

$J \frac{d\Omega}{dt}$  - динамический момент;

$M_{нз}$  - нагрузочный момент;

$J$  - приведенный момент инерции нагрузочного механизма и ротора двигателя;

$\Omega$  - угловая скорость ротора;

$\varphi$  - угол поворота ротора.

Индексом “0” сопровождаются начальные значения величин.

Математическое описание электромагнитного поля электрической машины, представленное уравнениями (2.1-2.4) не вызывает затруднений для всех сред, имеющих в реальном МД, но, как отмечалось ранее, решение этих систем уравнений для конкретной конструкции машины не представляется возможным. С развитием и совершенствованием компьютерной техники стало возможным решение этой задачи приближенными численными методами как для двумерных, так и для трехмерных моделей. Для этого операции интегрирования и дифференцирования заменяются операциями над числами с переходом от бесконечных множеств к конечным с весьма большим количеством элементов. Переход осуществляется от непрерывных дифференциальных уравнений к системе алгебраических с конечным числом элементов, которая может быть решена на ЭВМ.

Для сокращения числа уравнений и упрощения решения в универсальных программных комплексах часто используют преобразование исходных уравнений поля (2.1) посредством введения векторных  $\vec{A}$  и скалярных  $\varphi_m$  магнитных потенциалов, определяемых тождествами [45]

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}; \quad (2.5)$$

$$\vec{H} = -\text{grad}\varphi_m. \quad (2.6)$$

Калибровочное условие для вектора магнитного потенциала имеет вид

$$\text{div}\vec{A} = 0 \quad (2.7)$$

Введение скалярного магнитного потенциала  $\varphi_m$  правомерно лишь для областей, где отсутствуют токи, например, для диэлектриков в которых поле является безвихревым. С некоторыми допущениями можно считать безвихревым и поле постоянных магнитов, если электропроводность их материала мала, как у композиционных магнитов.

Для безвихревого поля непроводящих сред, система уравнений (2.1) сведется к уравнению Лапласа [94]

$$\text{div grad}\varphi = 0 \quad (2.8)$$

или в цилиндрической системе координат

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial z^2} = 0, \quad (2.9)$$

где  $\varphi_m = \varphi_m(r, \alpha, z, t)$ .

Решив уравнение (2.9) относительно  $\varphi_m$ , можно рассчитать и значения индукции и напряженности магнитного поля по (2.5) и (2.6).

Для электропроводных ферромагнитных сред уравнение магнитного поля сводится к уравнению Пуассона [94]

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot}\vec{A} \right) = -\vec{j}. \quad (2.10)$$

Если записать векторное уравнение (2.10) через проекции на оси координат, то получится система из трех дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка.

Так как основная часть энергии магнитного поля МД сосредоточена в воздушном зазоре, имеющем малые размеры по сравнению с осевыми размерами машины, для большинства практических задач достаточно расчета плоскопараллельной модели двигателя. Торцевые эффекты можно рассчитать отдельно от основной задачи. Так поля рассеяния с торцов магнитов будут рассчитаны аналитическим и численным методами в главе 3.

Для двумерной модели составляющие вектора индукции магнитного поля в полярных координатах будут определяться по выражениям

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A_z}{\partial r}. \quad (2.11)$$

Наиболее эффективно задача расчета электромагнитного поля электрических машин, в частности МД, решается методом конечных элементов, согласно которому расчетная область разбивается на элементы конечного размера – в общем случае нерегулярной структуры. На основе МКЭ построены универсальные и специальные программные комплексы ANSYS, FEMLAB, ELCUT и другие [107]. Благодаря наличию развитых сервисных функций и совместимости с пространственными графическими редакторами эти комплексы обладают возможностью автоматизированного разбиения расчетной области на элементы, а также табличного и графического представления результатов расчета. Главная задача исследователя при этом заключается в корректной постановке задачи, заключающейся в разработке геометрической модели и задания физических параметров сред и граничных условий. На основе интерпретации полученных результатов разработчик может исследовать практически любые характеристики и параметры машины.

## 2.2. Расчет и анализ магнитного поля МД

Основным режимом работы МД является режим короткого замыкания, когда на статорную обмотку подается управляющий сигнал в виде постоянного тока, а ротор заторможен моментом нагрузки. Близким к этому режиму работы является режим, когда нагрузочный механизм поворачивается двигателем на некоторый угол, заданный системой управления. И в первом и во втором случае величиной ЭДС вращения можно пренебречь и принять токовый сигнал за постоянный. Из этого следует, что задача расчета и анализа магнитного поля МД относится к магнитостатической задаче, в которой картина магнитного поля и его параметры не зависят от временной координаты [107].

Исходные допущения для магнитостатической задачи расчета поля МД были приняты следующие:

- источники магнитного поля стационарны (магнитодвижущие силы (МДС) постоянных магнитов неизменны, токи обмотки статора постоянны);
- материал магнитопроводов изотропный, нелинейный по магнитным свойствам;
- ротор неподвижный ( $\omega = 0$ );
- намагниченность магнитопроводов (кроме постоянных магнитов) при нулевых токах отсутствует;
- задача двумерная, плоскопараллельная (геометрия расчетных областей, свойства средств и параметры, характеризующие источники поля неизменны в направлении оси  $z$ ).

Последнее допущение обосновывается тем, что силовые параметры МД определяются магнитным полем в зазоре машины. Параметры поля рассеяния магнитов и лобовых частей обмотки, оказывающие влияние на индуктивные сопротивления обмотки, можно учесть отдельно (см. главу 3).

Уравнение Пуассона, описывающее электромагнитное поле в двумерном пространстве имеет вид [24]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (2.12)$$

В этом уравнении учтено то, что вектор магнитного потенциала  $\vec{A}$  и вектор плотности тока  $\vec{j}$  имеют только одну составляющую, отличную от нуля ( $A_z$  и  $j_z$  соответственно). Поэтому векторы  $\vec{A}$  и  $\vec{j}$  заменены скалярами  $A = A_z$  и  $j = j_z$ .

Компоненты тензора магнитной проницаемости  $\mu_x$  и  $\mu_y$  для изотропной электротехнической стали (магнитопровод статора) и малоуглеродистой конструкционной стали (магнитопровод ротора) нелинейны и изотропны. То есть

$$\mu_{xcm} = \mu_{ycm} = \mu_{cm} = f(B_{cm});$$

$$\mu_{xp} = \mu_{yp} = \mu_p = f(B_p).$$

Магнитные проницаемости определяются кривой намагничивания материала.

### 2.2.1. Геометрическая модель и ее физические свойства

Решение задачи численного моделирования электромагнитного поля подразумевает расчет для конкретной геометрической модели с заданными физическими свойствами сред.

В качестве объекта моделирования выберем моментный двигатель, имеющий кольцевую беспазовую обмотку на статоре и четырехполюсную конструкцию ротора с радиально намагниченными магнитами без полюсных наконечников. Как было показано в первой главе настоящей работы, эта конструкция отвечает в наиболее полной мере требованиям к МД с ограниченным углом поворота ротора.

Прототипом этой модели стал двигатель МД-100-1, разработанный на кафедре электромеханики СамГТУ и изготовленный на опытном производстве

ЦКБ «Фотон» г. Казань. Основные параметры двигателя приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры двигателя МД-100-1

|    |   |               |
|----|---|---------------|
| 1. | Максимальный момент в длительном режиме работы,<br>$M_m$ , Нм | 1,0           |
| 2. | Угол поворота ротора (рабочий с постоянным моментом)          | $\pm 5^\circ$ |
| 3. | Номинальное напряжение питания, $U_n$ , в                     | 27            |
| 4. | Наружный диаметр корпуса, $D_n$ , м                           | 0,120         |
| 5. | Внутренний диаметр ротора, $D_r$ , м                          | 0,06          |
| 6. | Активная длина статора, $l_i$ , м                             | 0,027         |

Основные размеры двигателя показаны на рисунке 2.1.

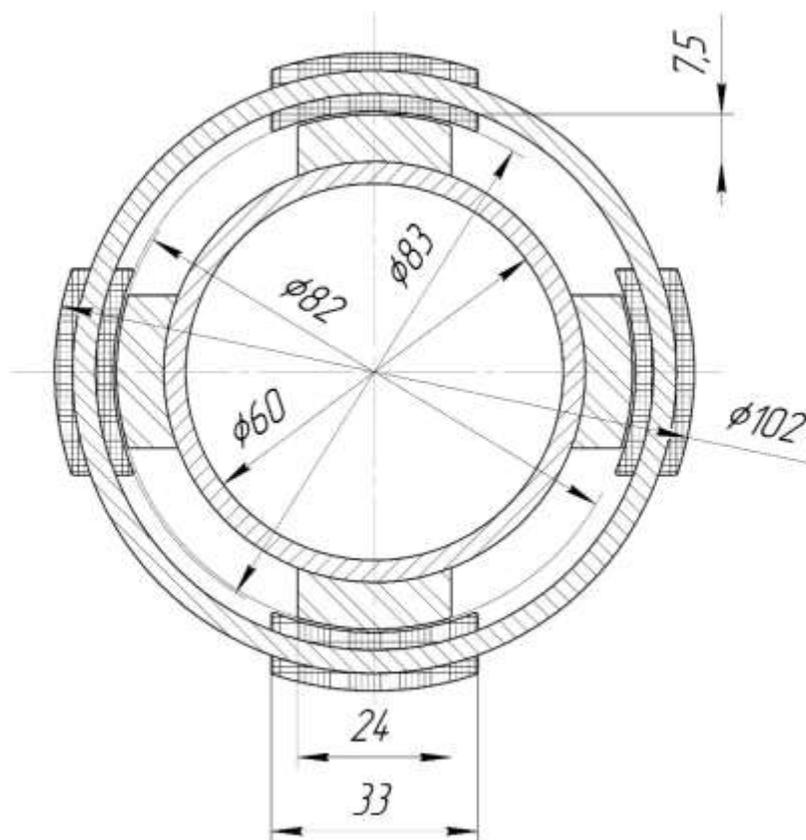


Рисунок 2.1 – Основные размеры геометрической модели двигателя МД - 100-1.

Для решения плоскопараллельной магнитостатической задачи в качестве программного средства был выбран программный комплекс ELCUT фирмы TOP г. Санкт- Петербург [107]. Ядро комплекса основано на решении дифференциальных уравнений второго порядка методом конечных элементов. ELCUT обладает удобным интерфейсом для решения задач расчёта электромагнитных полей и набором полезных сервисных программ для анализа результатов расчётов.

Физические свойства блоков модели задавались согласно таблице 2.2.

Таблица 2.2. Физические свойства областей модели.

| Область               | Удельная электропроводность, $\sigma$ , см/м | Плотность тока, $j$ | Магнитная проницаемость, $\mu$ | Коэрцитивная сила, $H_c$ , кА/м |
|-----------------------|--|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Магнитопровод статора | $0,45 \cdot 10^6$                            | 0                   | $B_{cm} = f(H)$                | 0                               |
| Магнитопровод ротора  | $10 \cdot 10^6$                              | 0                   | $B_p = f(H)$                   | 0                               |
| Обмотка статора       | $58,8 \cdot 10^6$                            | $j = f(i)$          | $\mu_0$                        | 0                               |
| Постоянные магниты    | $0,56 \cdot 10^6$                            | 0                   | $1,094 \mu_0$                  | 550                             |
| Воздушный зазор       | 0  | 0                   | $\mu_0$                        | 0                               |

Граница области расчёта задалась нулевым значением магнитного потенциала на окружности диаметром 0,12м. Как показали дальнейшие расчёты, величина магнитной индукции за пределами наружного диаметра двигателя составляет пренебрежимо малую величину 0,002 Тл.

Эскиз фрагмента разбиения расчётной области на элементы сетки показан на рисунке 2.2.

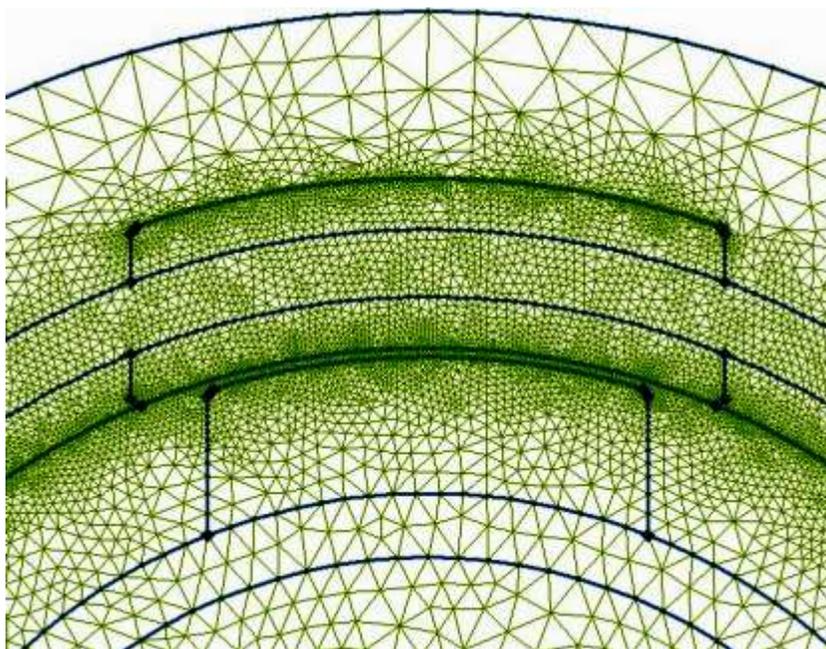


Рисунок 2.2 – Фрагмент разбиения области на элементы расчетной сетки.  
Параметры геометрической модели: число узлов сетки – 29146; количество блоков – 21; количество рёбер – 102; количество вершин – 86.

### 2.2.2. Магнитное поле возбуждения и реакции якоря

Основное магнитное поле МД создаётся постоянными магнитами, расположенными на роторе. Направление намагниченности полюсов ротора - по ортогональным осям, полярность магнитов чередуется. Как было показано в первой главе, для беспазовых машин с относительно большим немагнитным зазором применение полюсных наконечников ухудшает энергетические характеристики магнитов.

На рисунке 2.3 показана картина магнитного поля в виде линий магнитной индукции для моделируемого двигателя, полученная по результатам расчета. Максимальные значения индукции в магнитопроводе статора  $B_c=1,81$  Тл, ротора –  $B_p=1,67$  Тл. Выпучивания силовых линий за пределы магнитопровода статора практически не наблюдается, а потоки внутри ротора – минимальны.

На графиках рис.2.4 приведены расчётные кривые нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции в воздушном зазоре на протяжении двух полюсных делений  $2\tau$ .

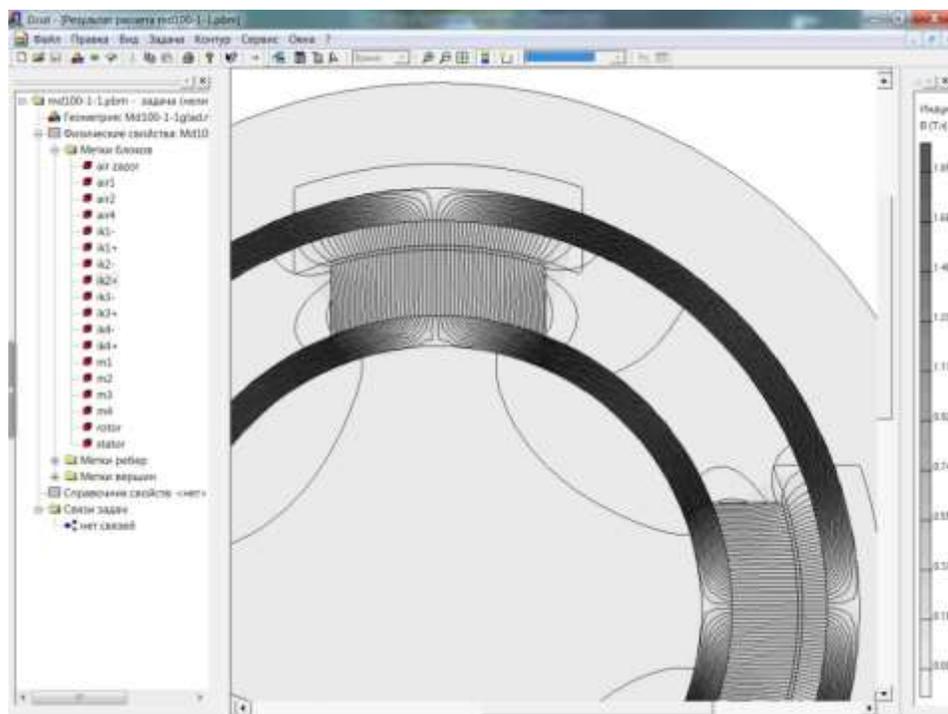


Рисунок 2.3 – Картина магнитного поля (линии магнитной индукции) при центральном положении ротора.

Для дальнейшего анализа необходимо исследовать магнитное поле реакции якоря. Модель позволяет это сделать, если задать МДС магнитов равной нулю.

На рисунке 2.5 в виде линий магнитной индукции показана картина поля реакции якоря (статора). Так как магнитная проводимость постоянных магнитов близка к  $\mu_0$ , то основные пути замыкания магнитного потока реакции якоря проходят по воздуху. Поэтому максимальное значение магнитной индукции в наиболее напряжённой точке магнитопровода статора не превысило значения 0,17 Тл.

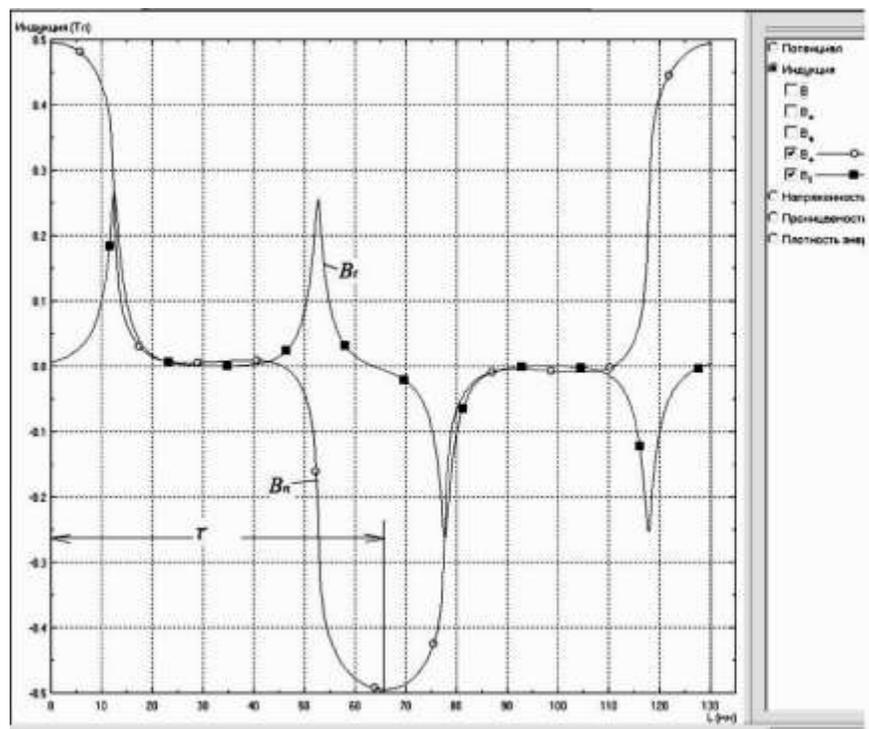


Рисунок 2.4 – Кривые нормальной  $B_n$  и тангенциальной  $B_t$  составляющих индукции в воздушном зазоре.

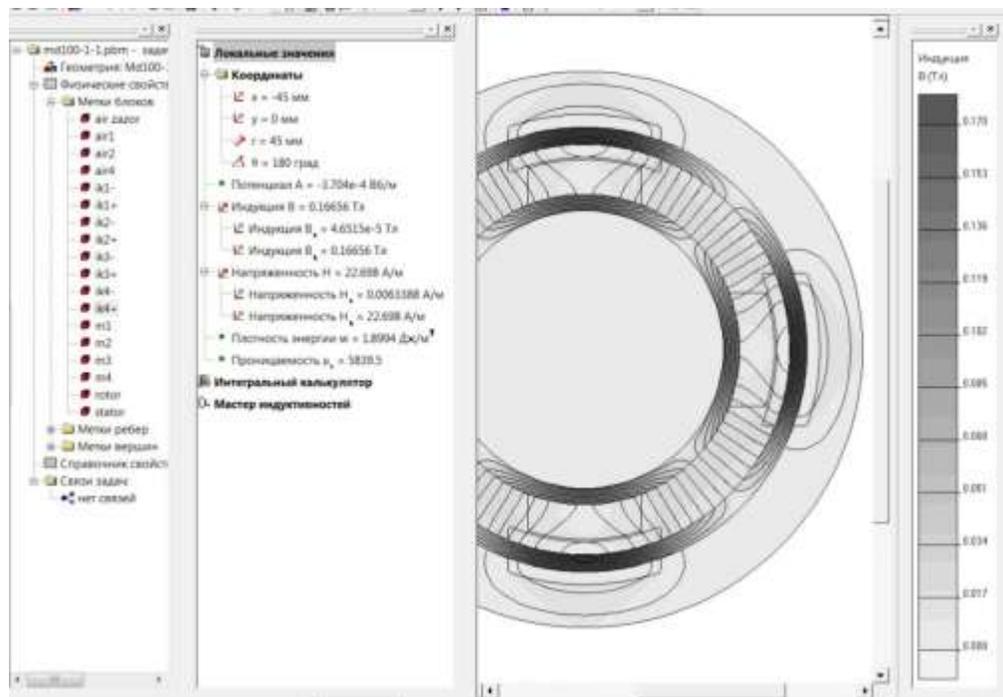


Рисунок 2.5 – Магнитное поле реакции якоря.

Следует отметить и тот факт, что наиболее напряжённые участки магнитопроводов от потока возбуждения и потока реакции якоря не совпадают (см. рис. 2.3 и 2.5).

### 2.3 Расчёт моментных характеристик

Основной характеристикой МД, определяющей его работоспособность, является его моментная характеристика, которая может определяться двумя зависимостями: момента от угла поворота ротора при постоянном токе управления ( $M=f(\alpha)$ ) и момента от тока управления при фиксированном угле поворота ( $M=f(I)$ ). Стабильность момента в пределах рабочих углов поворота имеет важное значение для построения системы управления. Эта величина, как правило, входит в число параметров, регламентируемых техническим заданием. Так, при разработке двигателей МД-100-1 величина пульсаций момента в пределах заданного угла ( $\pm 5^\circ$ ) не должна была превышать 5% от номинального момента.

Ко второй характеристике предъявляются два основных требования: первое – минимизация зоны нечувствительности (в идеале равной нулю); второе – линейность характеристики и её достаточная крутизна.

Вращающий момент в программе рассчитывается как интегральная характеристика [45].

$$\vec{M} = \frac{1}{2} \int ((\vec{r} \times \vec{H}) \cdot (\vec{n} \cdot \vec{B}) + (\vec{r} \times \vec{B}) \cdot (\vec{n} \cdot \vec{H}) - (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot (\vec{H} \cdot \vec{B})) ds, \quad (2.13)$$

где  $\vec{B}, \vec{H}$  - индукция и напряжённость магнитного поля;

$\vec{r}, \vec{n}$  - радиальный и нормальный векторы.

Для плоскопараллельной задачи вектор момента направлен параллельно оси  $z$ . Момент вычисляется относительно начала координат, которое совпадает в данной задаче с центром оси вращения ротора. Область интегрирования включает все элементы ротора, и ограничена поверхностью воздушного зазора. Как и в других плоскопараллельных задачах расчет ведется на единицу осевой

длины машины (1 п.м.), поэтому размерность рассчитанного момента – Нм/м. для расчета в абсолютных величинах значение удельного момента необходимо умножать на активную длину машины.

На рис. 2.6 даны графики моментной характеристики в зависимости от тока управления.

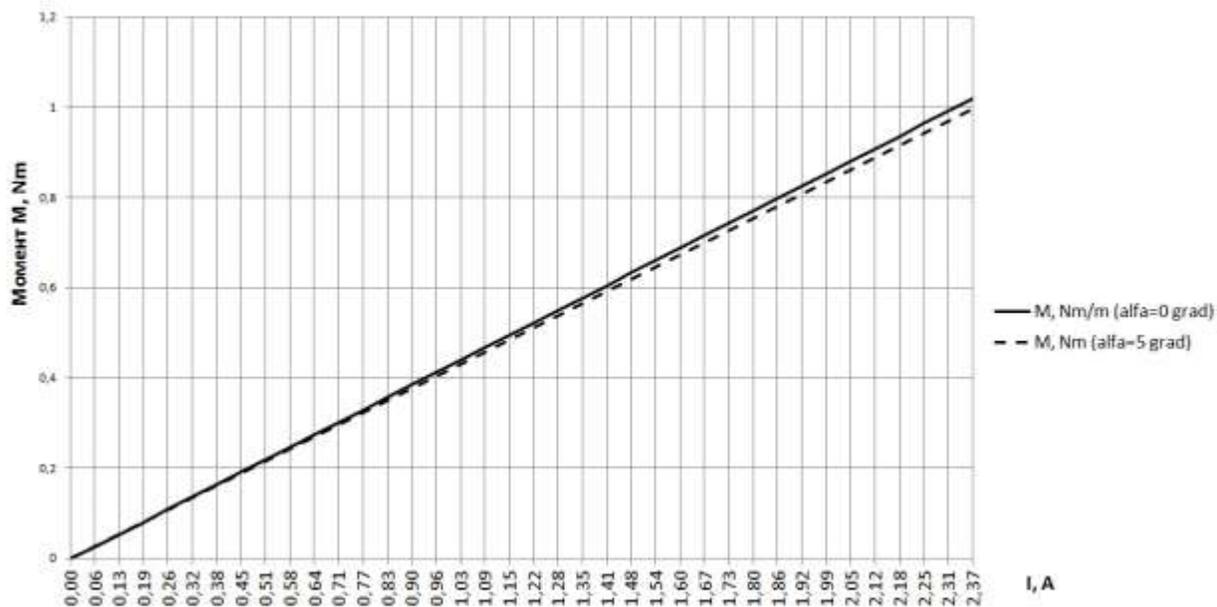


Рисунок 2.6 – Зависимость момента от тока управления при центральном положении ротора (сплошная линия) и повороте на  $+5^0$  (пунктирная линия).

Сплошная линия, соответствующая центральному положению ротора ( $\alpha = 0$ ), идет на 2,2% выше пунктирной, соответствующей повороту ротора на  $+5^0$ . Обе линии практически не отличаются от прямых, что подтверждает предположение о несущественном размагничивающем действии реакции якоря и практически неизменном магнитном потоке при увеличении нагрузки МД.

Расчет зависимости момента от угла поворота ротора при постоянном токе в обмотке статора проводился путем трансформации геометрической модели МД, заключающейся в повороте всех блоков модели, относящихся к статору относительно начала координат, совпадающего с осью вращения двигателя.

ля. Граница раздела областей статора и ротора проходила по середине воздушного зазора.

На рис. 2.7 приведена картина поля при максимальном рабочем угле поворота  $+5^{\circ}$ . Этому положению ротора и номинальному току статора соответствует значение удельного вращающего момента  $36,4 \text{ Нм/м}$  ( $M=0,983 \text{ Нм}$ ) (см. табл. 2.3).

На рис. 2.8 приведена расчетная кривая момента двигателя МД-100-1 на всем диапазоне поворота ротора (сплошная линия). Пунктирной линией обозначен расчетный график момента, полученный по инженерной методике, изложенной в главе 3. Расхождение результатов на  $2,3\%$  в пределах рабочего угла поворота ротора  $\pm 5^{\circ}$  объясняется тем, что в инженерной методике не учитывается изменение потокосцепления при повороте ротора. За пределами рабочего угла поворота ротора упрощенная инженерная методика для расчета момента дает неприемлемый по точности результат (см. таблицу 2.3).

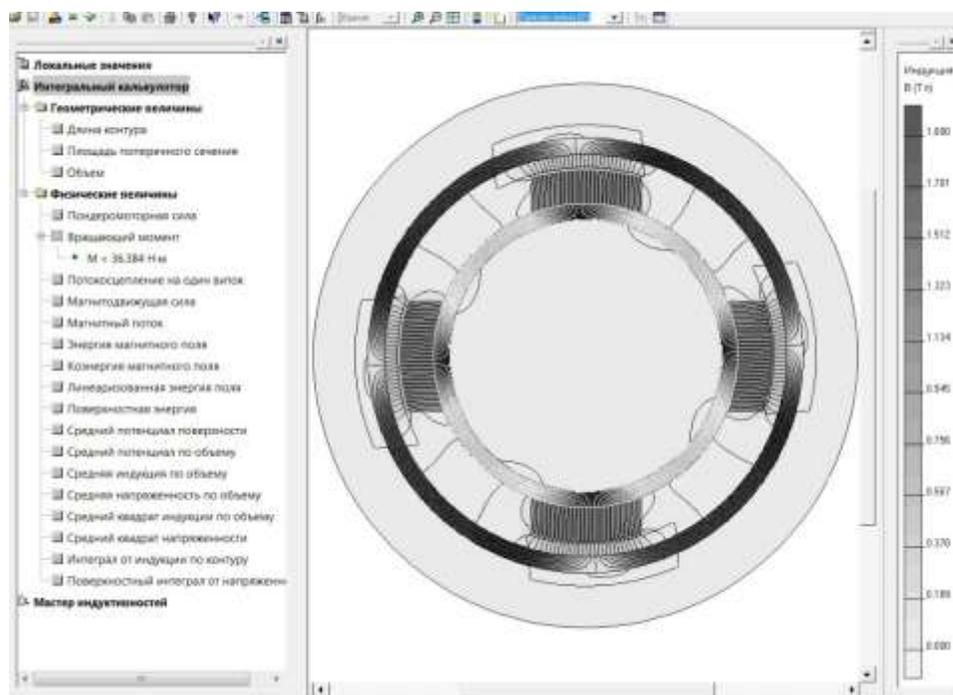


Рисунок 2.7 – Картина поля и расчет момента при повороте ротора на  $+ 5^{\circ}$ .



Рисунок 2.8 – Кривая момента во всем диапазоне поворота ротора.  
 $M_{cp}$  – среднее значение момента в рабочей области.

Расчеты по уточненной математической модели, впоследствии подтвержденные экспериментальными данными, показали, что нестабильность момента в пределах рабочего угла не превышает 2,3%. Этот результат говорит о правильности выбора основных конструктивных решений МД: беспазовой обмотки статора, возбуждения от постоянных магнитов, длины дуги обмотки, превышающей ширину полюса на заданный угол поворота.

Таблица 2.3 -Зависимость момента от угла поворота  
 Двигатель МД100-1-1

ld= 0,027

m

| α, град | M <sub>уд</sub> , Nm/m | M, Nm | ΔM, %  | M <sub>p</sub> , Nm |
|---------|------------------------|-------|--------|---------------------|
| -45     | 0,2555                 | 0,007 | -99,31 | 1,0                 |
| -35     | 4,526                  | 0,122 | -87,72 | 1,0                 |
| -25     | 14,965                 | 0,404 | -59,39 | 1,0                 |
| -15     | 26,718                 | 0,721 | -27,50 | 1,0                 |
| -14     | 29,3095                | 0,791 | -20,46 | 1,0                 |
| -13     | 28,8715                | 0,780 | -21,65 | 1,0                 |
| -12     | 29,6015                | 0,799 | -19,67 | 1,0                 |
| -11     | 30,514                 | 0,824 | -17,20 | 1,0                 |
| -10     | 32,1565                | 0,868 | -12,74 | 1,0                 |
| -9      | 32,9595                | 0,890 | -10,56 | 1,0                 |
| -8      | 33,7625                | 0,912 | -8,38  | 1,0                 |
| -7      | 34,602                 | 0,934 | -6,10  | 1,0                 |
| -6      | 35,04                  | 0,946 | -4,91  | 1,0                 |
| -5      | 35,98754               | 0,972 | -2,34  | 1,0                 |
| -4      | 36,35546               | 0,982 | -1,34  | 1,0                 |
| -3      | 37,23                  | 1,005 | 1,03   | 1,0                 |
| -2      | 37,1205                | 1,002 | 0,73   | 1,0                 |
| -1      | 37,23                  | 1,005 | 1,03   | 1,0                 |
| 0       | 37,51105               | 1,013 | 1,79   | 1,0                 |
| 1       | 37,23                  | 1,005 | 1,03   | 1,0                 |
| 2       | 37,1205                | 1,002 | 0,73   | 1,0                 |
| 3       | 37,23                  | 1,005 | 1,03   | 1,0                 |
| 4       | 36,354                 | 0,982 | -1,35  | 1,0                 |
| 5       | 35,989                 | 0,972 | -2,34  | 1,0                 |
| 6       | 35,04                  | 0,946 | -4,91  | 1,0                 |
| 7       | 34,602                 | 0,934 | -6,10  | 1,0                 |
| 8       | 33,7625                | 0,912 | -8,38  | 1,0                 |
| 9       | 32,9595                | 0,890 | -10,56 | 1,0                 |
| 10      | 32,1565                | 0,868 | -12,74 | 1,0                 |
| 11      | 30,514                 | 0,824 | -17,20 | 1,0                 |
| 12      | 29,6015                | 0,799 | -19,67 | 1,0                 |
| 13      | 28,8715                | 0,780 | -21,65 | 1,0                 |
| 14      | 29,3095                | 0,791 | -20,46 | 1,0                 |
| 15      | 26,718                 | 0,721 | -27,50 | 1,0                 |
| 25      | 14,95478               | 0,404 | -59,42 | 1,0                 |
| 35      | 4,538775               | 0,123 | -87,68 | 1,0                 |
| 45      | 0,2397685              | 0,006 | -99,35 | 1,0                 |
|         | Среднее на 5 град      | 0,995 | Nm     |                     |

## 2.4. Способы повышения стабильности моментной характеристики

Как было показано в предыдущем разделе, принятые конструктивные решения обеспечивают в заданном диапазоне углов поворота ротора достаточно высокую стабильность момента. Однако на практике могут возникнуть требования к расширению этого диапазона.

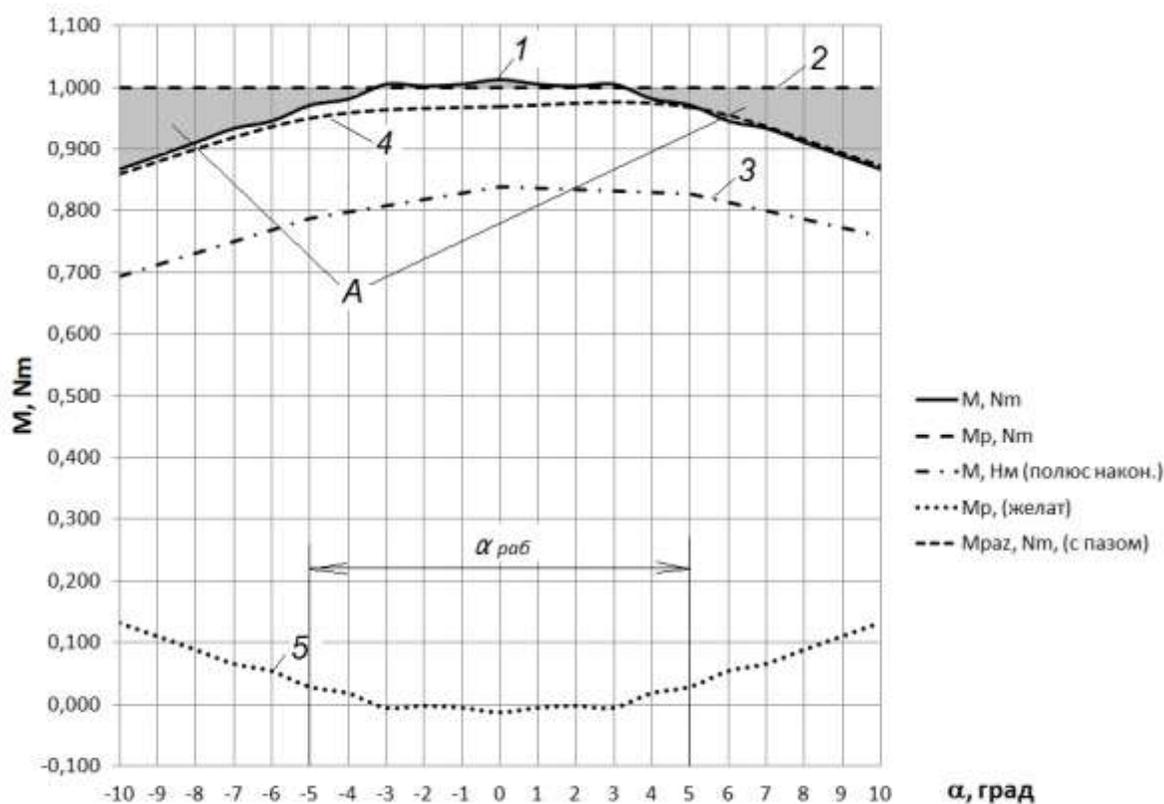


Рисунок 2.9 – Моментные характеристики двигателя в рабочем диапазоне углов поворота.

1 – моментная характеристика двигателя без полюсных наконечников; 2 - расчетное значение момента; 3 - моментная характеристика двигателя с полюсными наконечниками; 4 - моментная характеристика двигателя с мостиками насыщения (рис. 2.12); 5 – желательная характеристика дополнительного реактивного момента.

Если для исследуемого двигателя увеличить диапазон поворота до  $\pm 10^\circ$ , то отклонение момента от заданного составит 13% (рис. 2.9).

Из графика момента (1) видно, что для обеспечения постоянства характеристики необходимо каким-либо способом увеличить значение момента при максимальных углах поворота ротора. В [90] для этого предлагается применять широкие полюсные наконечники. Для проверки этой гипотезы был смоделирован МД, имеющий магнитную систему и обмотку, идентичные исследуемому двигателю. Отличие заключалось лишь в наличии магнитомягких полюсных наконечников (рис. 2.10) на полюсах ротора.

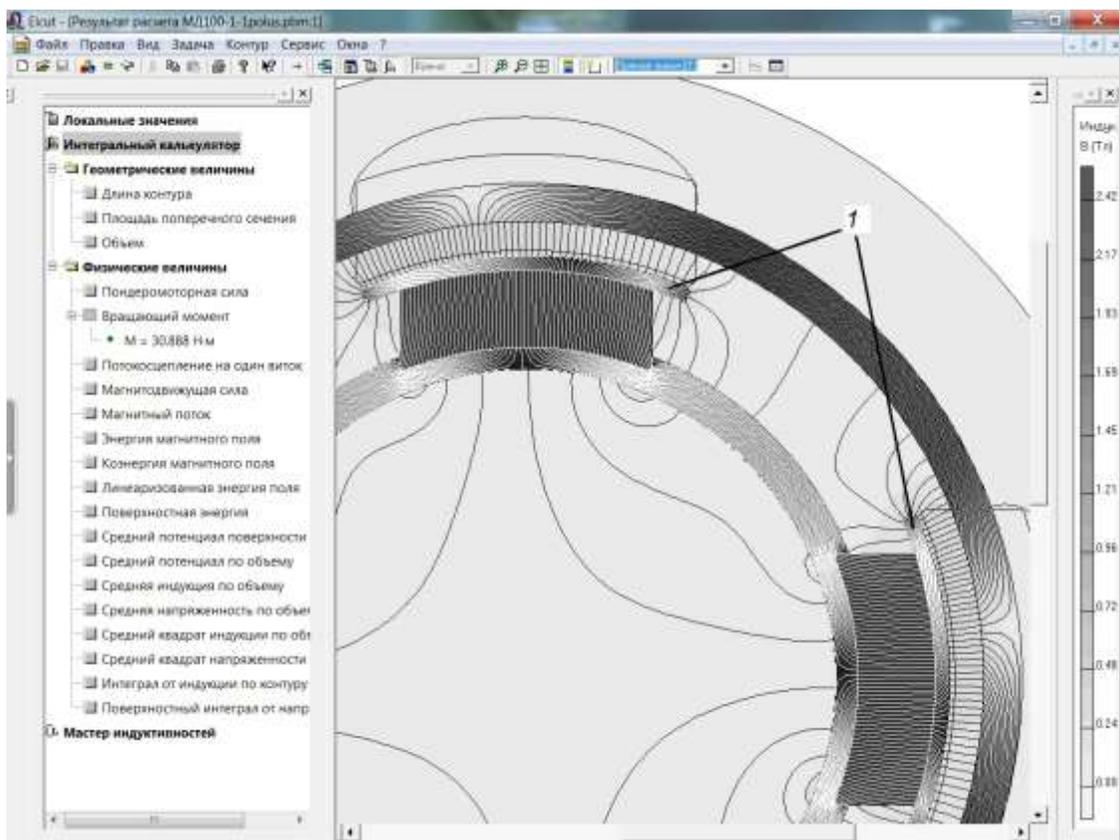


Рисунок 2.10 –Магнитное поле в виде линий магнитной индукции двигателя с полюсными наконечниками на роторе (1).

Как показали расчеты, величина вращающего момента ожидаемо снизилась примерно на 17% (кривая 3 на рис. 2.9). Это объясняется существенным увеличением потоков рассеяния. Кроме этого, кривая 3 заметно несимметрична, относительно центрального положения. Это связано с большим влиянием размагничивающего действия реакции якоря, для которой полюсные наконечники

являются ферромагнитными путями для замыкания ее магнитного потока. Прогнозируемого в [90] улучшения кривой момента с применением полюсных наконечников не произошло. Нестабильность характеристики на диапазоне  $\pm 10^\circ$  составила 18,8%, что даже несколько хуже, чем у двигателя без полюсных наконечников. Отсюда следует однозначный вывод, что применение полюсных наконечников для рассматриваемого класса машин – нецелесообразно.

Анализ кривой 1 на рис. 2.9 показывает, что для постоянства момента в расширенном диапазоне угла поворота ротора, необходимо компенсировать каким-либо образом зоны А (на рис. 2.9 они заштрихованы). Для этого необходимо создать некоторый момент  $M_{p.желат}$ , кривая которого показана на рис. 2.9 в виде графика 5.

В техническом решении, признанном изобретением [66] автором с соавторами предложено решить эту задачу за счет размещения в активной зоне обмотки статора в пределах полюсного деления вставок из ферромагнитного и (или) немагнитного материала. В этом случае за счет появления реактивного момента, совпадающего по форме с кривой 4 стабильность момента на расширенном диапазоне углов поворота ротора удастся довести до значений в пределах  $\pm 8\%$ .

Один из примеров технической реализации этой идеи показан на рис. 2.11. Для создания требуемого реактивного момента на статоре по краям дуги обмоточного слоя размещаются зубцы 1, создающие требуемый дополнительный реактивный момент.

Следует отметить, что реактивный момент складывается с электромагнитным только в рабочем диапазоне. За пределами рабочего диапазона реактивный момент направлен против основного момента и оказывает дестабилизирующее действие.

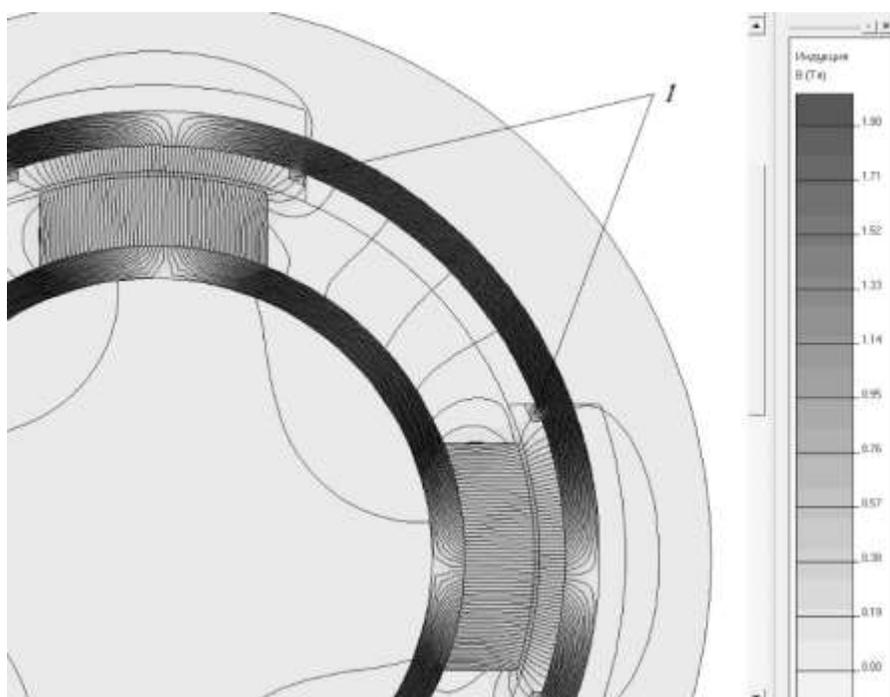


Рисунок 2.11 – Магнитная система с ферромагнитными вставками 1  
1 – ферромагнитные вставки

Другой способ повышения стабильности моментной характеристики основывается на том, что изменение момента в пределах расширенного рабочего угла осуществляется “срезанием” пика характеристики в ее центральной части. Этого возможно добиться, если в магнитной системе ввести мостики насыщения (рис. 2.12).

В этом случае значение момента снижается (в рассматриваемом примере на 4%), но стабильность характеристики возрастает: в рабочем диапазоне при  $\alpha = \pm 5^\circ$  до  $\pm 1,3\%$ , а на угле  $\alpha = \pm 10^\circ$  - до 10%. Снижение среднего значения момента в схеме с мостиками насыщения не принципиально, - оно легко компенсируется пропорциональным увеличением тока управления. На тепловой режим увеличение тока на 4% практически не влияет.

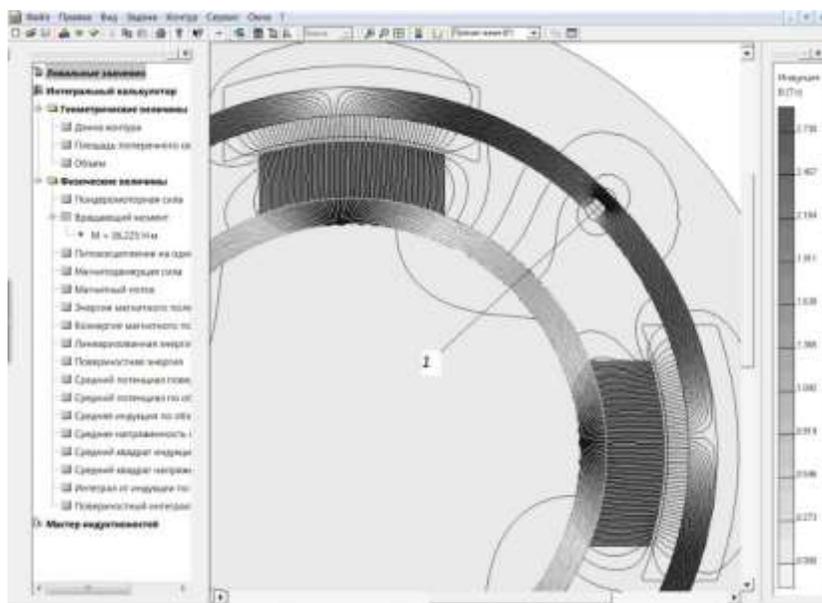


Рисунок 2.12 – Магнитное поле в виде линий магнитной индукции в МД с мостиками насыщения (1) на статоре.

Таблица 2.4 – Параметры моментных характеристик МД различных конструктивных схем.

| №  | Конструктивная схема      | Максимальный момент, $M_m$ , Нм | Средний момент, $M_{cp}$ , Нм, на рабочем угле $\pm 5\%$ | Нестабильность момента, $\Delta M$ , % |                         |
|----|---------------------------|---------------------------------|--|--|-------------------------|
|    |                           |                                 |  | $\alpha = \pm 5^\circ$                 | $\alpha = \pm 10^\circ$ |
| 1. | Без полюсных наконечников | 1,013                           | 0,995  | -2,34%<br>-2,34%                       | -12,74%<br>-12,74%      |
| 2. | С полюсными наконечниками | 0,839                           | 0,817  | -3,73%<br>+1,13%                       | -15,04%<br>-7,25%       |
| 3. | С магнитными вставками    | 1,021                           | 1,003  | -1,31%<br>-0,80%                       | -8,12%<br>-7,31%        |
| 4. | С мостиками насыщения     | 0,969                           | 0,962  | -1,27%<br>-0,60%                       | -10,68%<br>-9,29%       |

Анализируя данные таблицы 2.4 можно дать следующие рекомендации:

- при малых углах поворота ротора (до  $\pm 5^\circ$ ) беспазовая конструкция статора и магниты без полюсных наконечников обеспечивают стабильность момента в пределах  $\pm 2,5\%$  без дополнительных конструктивных решений;

- для расширения рабочего диапазона со стабильным моментом необходимо в конструктивную схему магнитопровода статора вводить либо ферромагнитные вставки, либо мостики насыщения;

- применение полюсных наконечников в рассматриваемом классе МД не дает положительного эффекта ни по величине момента, ни по его стабильности.

Сравнение параметров исследуемого двигателя с серийными аналогами приведено в главе 4.

## 2.5. Расчет параметров МД

Моментные двигатели работают, как правило, в качестве силового исполнительного элемента систем автоматического регулирования. Поэтому, наряду с требованием стабильности моментной характеристики, к ним предъявляются повышенные требования к быстродействию. Основными параметрами, определяющими динамические характеристики МД, являются электромагнитная  $T_{эм}$  и электромеханическая  $T_{эмех}$  постоянные времени. Для рассматриваемого класса устройств электромеханическая постоянная при заданном моменте определяется, в основном, приведенным моментом инерции нагрузочного механизма, который более чем на порядок превосходит собственный момент инерции ротора МД. Поэтому в режиме упора, когда ротор практически неподвижен, основным динамическим параметром МД становится электромагнитная постоянная времени

$$T_{эм} = \frac{L}{R}, \text{ с}, \quad (2.14)$$

где  $L$  – собственная индуктивность обмотки статора, Гн;

$R$ – активное сопротивление обмотки, Ом.

Индуктивность обмотки можно определить, как экспериментальными методами (см. главу 4), так и расчетными. Наиболее достоверные результаты дает расчет индуктивности методом численного математического моделирования, например, МКЭ. Это связано с тем, что из-за сложности картины магнитного поля распределенной обмотки статора, классические методы дают значительную погрешность из-за ряда существенных допущений: невозможности учета насыщения, полей рассеяния и нелинейности магнитных материалов.

В электрических машинах, когда магнитная система насыщена, величина индуктивности в общем случае не постоянная. Однако, в МД с постоянными магнитами, как было показано ранее (см. раздел 2.2.2.), магнитный поток реакции статора не оказывает существенного влияния на магнитную цепь машины. Поэтому, изменением индуктивности обмотки статора при изменении нагрузки двигателя можно пренебречь.

Влияние поворота ротора на индуктивность обмотки ранее не рассматривалось и требует дополнительного исследования.

В программном комплексе ELCUT после решения задачи расчета магнитного поля индуктивность можно определить двумя способами: через потокосцепление

$$L_k = \frac{\Psi_k}{I_k}, \text{ Гн}, \quad (2.15)$$

где  $\Psi$  - потокосцепление контура  $k$ , Вб;

$I_k$  - ток  $k$ -го контура, А;

И через полную магнитную энергию контура  $W_m$

$$L = \frac{2W_m}{I_k^2}, \text{ Гн}. \quad (2.16)$$

Второй способ предпочтительнее, так как учитывает нелинейную характеристику магнитной энергии в функции тока контура.

В таблице 2.5 приведены расчетные параметры обмотки статора двигателя, определенные как интегральные параметры результатов расчета магнитного поля машины.

Таблица 2.5 – Индуктивности и постоянные времени двигателя МД-100-1.

| Угол поворота ротора      | Индуктивность обмотки, $L$ , мГн | Активное сопротивление, $R$ , Ом | Электромагнитная постоянная, $T_{эм}$ , мс |
|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| $\alpha = 0$              | 1,161                            | 8,6                              | 0,1350                                     |
| $\alpha = \pm 5^{\circ}$  | 1,164                            | 8,6                              | 0,1353                                     |
| $\alpha = \pm 10^{\circ}$ | 1,165                            | 8,6                              | 0,1354                                     |

Электромагнитная постоянная традиционно определяется по значению статического параметра – индуктивности обмотки. Однако во время динамического переходного процесса, происходящего при включении питающего напряжения на обмотку статора, в магнитопроводах статора и ротора возникают вихревые токи, которые демпфируют нарастание магнитного потока. Действие вихревых токов на динамические характеристики МД практически не изучено. Современные методы анализа, основанные на расчете магнитных полей, позволяют решить и нестационарные задачи расчета электромагнитного поля МД для случаев, когда на обмотку статора мгновенно подается номинальное значение тока от источника бесконечной мощности (график переходного процесса показан на рис. 2.13), и для случая, когда на статорную обмотку подается «ступенька» номинального напряжения (рис. 2.14).

В первом случае постоянная времени нарастания момента составляет значение  $T_m=7$  мс, а время переходного процесса  $T_{\infty}=28$  мс. Это объясняется тем, что при питании обмотки от источника тока бесконечной мощности вихревые

токи не влияют на процесс нарастания тока статора, но демпфируют рост магнитного потока.

Второй случай более соответствует практическому переходному процессу, когда на обмотку статора подается постоянное напряжение, и ее ток зависит от демпфирующего действия индуцированных в сердечниках вихревых токов. Постоянная времени нарастания момента  $T_m$  увеличивается в 1,6 раза (см. рис. 2.14), а время переходного процесса затягивается до значения  $T_\infty=72$  мс.

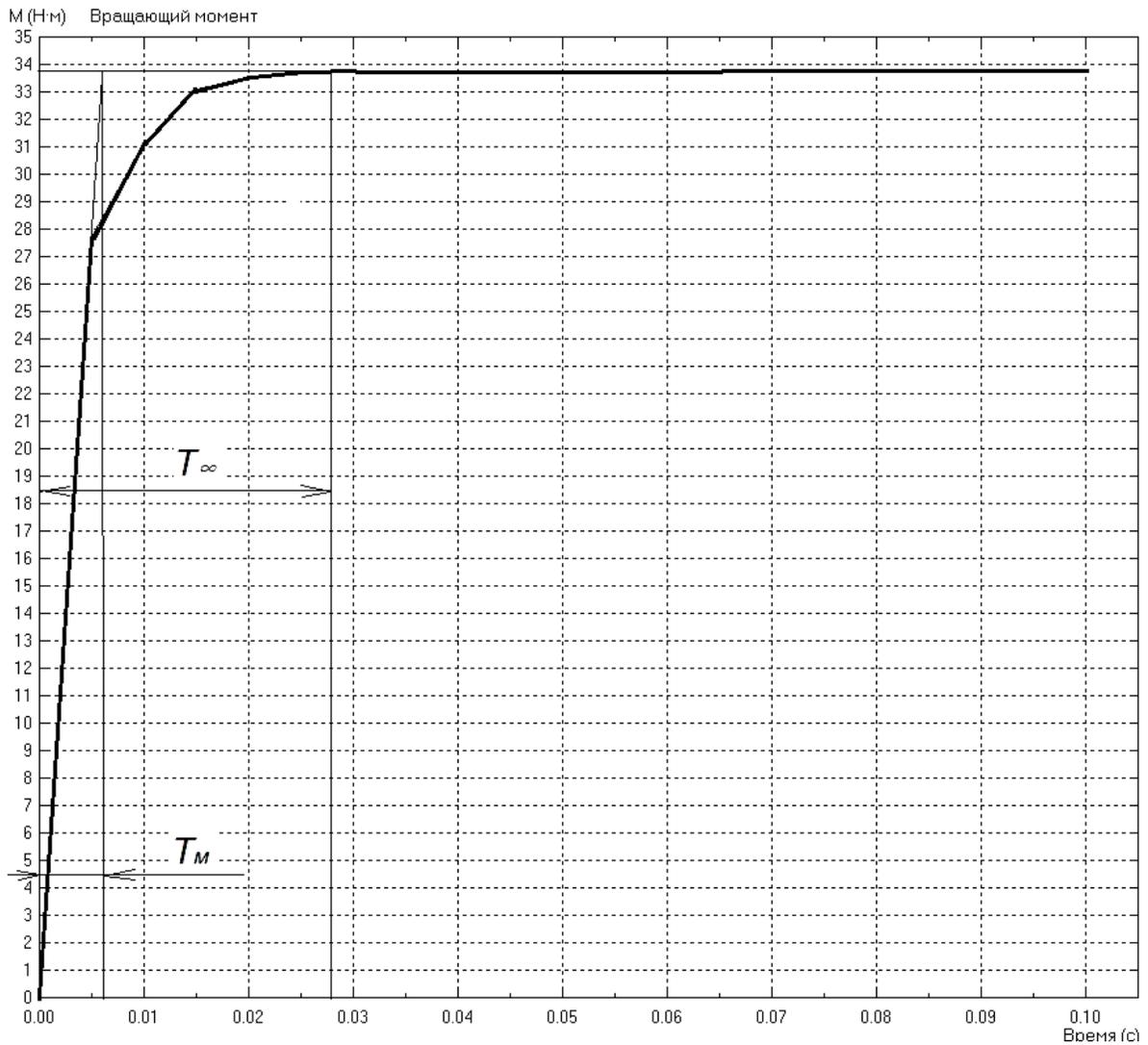


Рисунок 2.13 – Кривая нарастания удельного момента при ступенчатой подаче номинального тока в обмотку.

Так как для не вращающегося двигателя теряет смысл электромеханическая постоянная времени, то полученная кривая нарастания момента и ее постоянная времени  $T_M$  может быть использована в качестве одной из динамических характеристик МД с ограниченным углом поворота ротора.

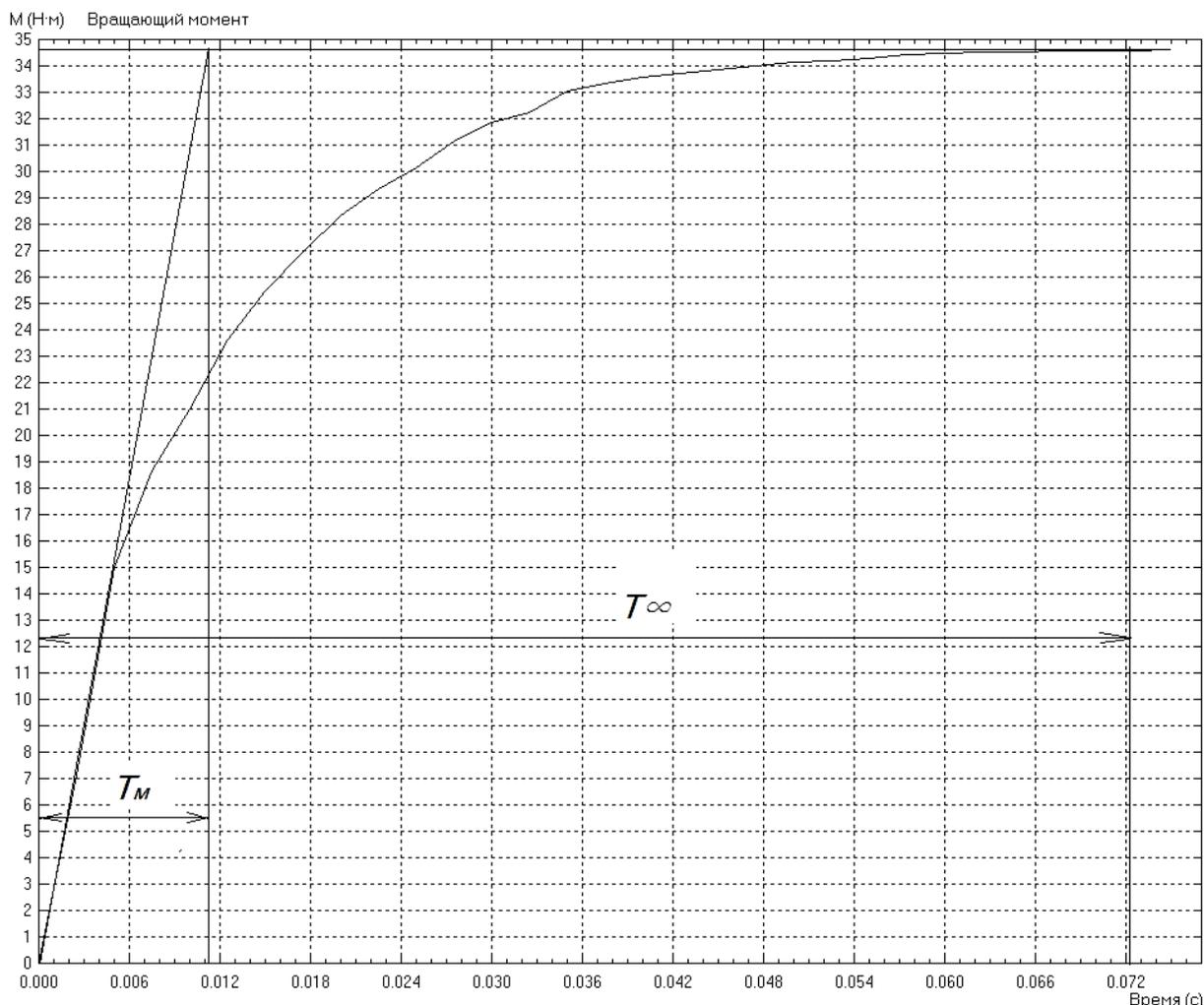


Рисунок 2.14 – Кривая нарастания удельного момента при подаче на обмотку номинального напряжения.

## 2.6. Выводы

По результатам аналитических исследований магнитного поля и параметров МД, проведенных во второй главе, можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель МД, функционально ориентированная на расчет параметров и моментных характеристик двигателя

ля, на основе МКЭ, отличается от известных учетом беспазовой геометрии магнитной системы, ее нелинейных физических свойств и потоков рассеяния, позволяет с высокой точностью рассчитывать электромагнитные и силовые параметры МД при повороте ротора в пределах заданного угла.

2. Математическое моделирование электромагнитного поля показало, что реакция статора оказывает несущественное влияние на поле индуктора. Следствием этого является линейность моментной характеристики в функции тока управления.
3. Исследование моментной характеристики в функции угла поворота ротора показало, что для предложенной конструкции МД нестабильность момента составляет допустимые 2,34%, что доказывает верность принятых конструктивно-технических решений при создании двигателей.
4. Для двигателей с более высокими требованиями к стабильности момента, автором предложены конструктивные решения [66] направленные на повышение статической стабильности момента. Математическое моделирование МД этих конструкций показало их эффективность.
5. Применение полюсных наконечников не только приводит к снижению результирующего момента из-за увеличенных потоков рассеяния, но и не обеспечивает повышения стабильности момента в пределах угла поворота.
6. Расчет нестационарных режимов двигателя по предложенной математической модели показал высокое электромагнитное быстродействие (электромагнитная постоянная – 0,135 мс) и недостижимую в двигателях традиционной конструкции скорость нарастания вращающего

момента. В математической модели впервые было учтено демпфирующее действие вихревых токов в сердечниках в переходных режимах.

### **3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МД**

#### **3.1 Особенности проектирования МД с беспазовым статором и ограниченным углом поворота ротора**

Основные задачи при создании электроприводов и, в частности их электромеханической части – моментных двигателей, для авиационного электрооборудования сформулированы в [16,90]следующей последовательности:

- повышение надежности (вероятности безотказной работы в заданное время) системы;
- снижение относительной массы, уменьшение габаритов и повышение энергетических показателей электрических машин;
- повышение конкурентоспособности изделий, в том числе за счет снижения их себестоимости;
- развитие теории специальных электрических машин и усовершенствование методов их проектирования, включая создание систем автоматизированного проектирования (САПР).

Эти задачи могут быть решены при применении системного подхода к процессу автоматизированного проектирования, заключающегося в создании адекватной математической модели машины, учитывающей массогабаритные, энергетические, стоимостные показатели, характеристики ее надежности. Несомненно, что для получения такой математической модели требуется решить задачу расчета магнитного поля машины. Моментный двигатель (МД) с ограниченным углом поворота ротора, конструкция которого описана в главе 1, из-за своих особенностей не может рассчитываться по традиционным инженерным методикам.

Несмотря на относительную простоту конструкции МД, его геометрия и основные параметры, как показал опыт проектирования, не могут быть рассчитаны последовательным линейным алгоритмом. В расчете, как правило, требуется несколько итеративных циклов, которые не при всяких сочетаниях пара-

метров являются сходящимися. Кроме того, последовательность расчета во многом определяется выбором критерия оптимальности и набора варьируемых переменных. Но во всех вариантах методик имеется ряд основных блоков, которые определены особенностями моментных двигателей.

В первую очередь, - это особенности, связанные с беспазовой конструкцией обмотки статора вынесенной в воздушный зазор (рис. 3.1).

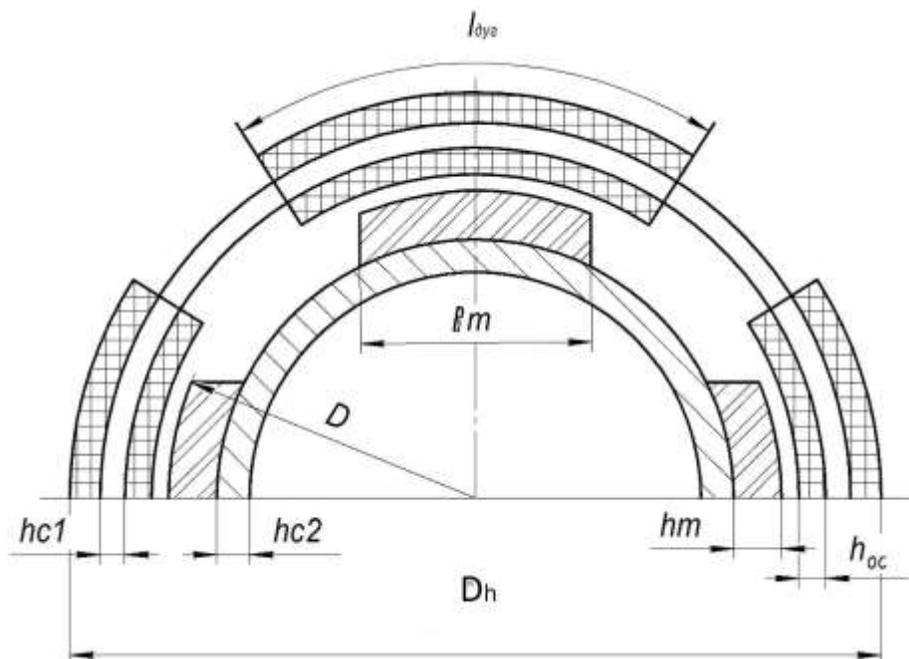


Рисунок 3.1 – Основные размеры МД с ограниченным углом поворота ротора.

Одним из основных требований к МД являются требования стабильности его моментной характеристики в зависимости от угла поворота ротора

$$M = f(\alpha) \quad (3.1)$$

Интегрально момент двигателя определяется произведением

$$M = p \cdot A \cdot \Phi \cdot D, \text{ Нм}, \quad (3.2)$$

где  $p$  - число пар полюсов;

$A$  - линейная нагрузка статора, А/м;

$\Phi$  - полезный магнитный поток полюса, Вб;

$D$  - расчетный диаметр ротора, м.

Для обеспечения постоянства момента при неизменном потоке, линейная нагрузка  $A$  на всем диапазоне рабочих углов поворота ротора должна быть строго постоянной. Это обеспечивается рядовой намоткой обмотки статора с постоянным коэффициентом линейного заполнения. Слои обмотки должны быть полностью заполнены обмоточным проводом. Из этого следует условие (3.3), которое обязательно необходимо включить в качестве ограничения в расчет

$$d_{из}WK_l = b_{дуг}n_{сл}, \quad (3.3)$$

где  $d_{из}$  – диаметр изолированного проводника, м;

$W$  – число витков одного полюса статора;

$K_l$  – линейный коэффициент заполнения обмотки статора;

$b_{дуг}$  – длина дуги, занятой обмоткой статора, м;

$n_{сл}$  – число слоев обмотки статора.

Число слоев обмотки статора может быть, как четным, так и нечетным. Отличие будет лишь в сборке схемы обмотки статора.

Другой особенностью беспазовых МД является то, что обмотка статора вынесена в воздушный зазор. Это наряду с естественным увеличением мощности системы возбуждения, дает возможность избавиться от зубцовых пульсаций момента и повысить электромагнитное быстродействие двигателя за счет снижения индуктивности статорной обмотки. В беспазовых машинах (с полым, дисковым или гладким якорем) размеры якорного проводника оказывают определяющее влияние не только на параметры обмотки якоря, но и на индуктор двигателя, так как от диаметра проводника и числа слоев обмотки статора в основном зависит величина немагнитного зазора – важнейшего параметра любой электрической машины.

Высоту обмоточного слоя можно определить через диаметр проводника и количество слоев обмотки

$$h_{oc} = n_{cl}(d_{из} + \Delta_m), \text{ м} \quad (3.4)$$

где  $\Delta_m$  – толщина межслойной изоляции, м.

Немагнитный расчетный зазор  $\delta$  складывается из высоты обмоточного слоя и непосредственного воздушного зазора  $\delta_в$

$$\delta = h_{oc} + \delta_в, \text{ м}, \quad (3.5)$$

причем, первое слагаемое является определяющим, так как  $h_{oc}$  в 10...20 раз больше  $\delta_в$ .

Таким образом, в беспазовых машинах существует детерминированная связь диаметра проводника обмотки статора и индукторной части двигателя, которой в классических зубцово-пазовых конструкциях не наблюдается. Это накладывает ещё одно ограничение при проектировании МД с беспазовой обмоткой.

Основной параметр системы возбуждения на основе постоянных магнитов – это расчетная высота магнита  $h_m$ , которая при заданных величинах немагнитного зазора и коэффициента насыщения магнитной цепи, прямо зависит от индукции в зазоре и характеристик магнитов.

Для магнитов на основе Sm – Co (например, КС – 37 или КС – 37А) с прямолинейной характеристикой размагничивания, высота магнита может быть определена выражением (3.6)

$$h_m = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot B_r \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\mu}{H_{cb} \cdot (B_r - B_\delta K_\sigma)}, \text{ м}, \quad (3.6)$$

где  $B_r$  – остаточная индукция магнита, Тл;

$B_\delta$  - расчетная магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл;

$k_\mu$  - коэффициент насыщения в магнитной цепи;

$H_{cb}$  – коэрцитивная сила магнита, А/м;

$K_\sigma$  коэффициент рассеяния магнита.

Выражение 3.6 получено при следующих допущениях:

1. Кривая размагничивания магнитов аппроксимируется прямой линией. Для магнитов типа КС – 37 и КС – 37А это дает погрешность не более 1,5%, что вполне приемлемо для инженерных и оптимизационных расчетов. Для магнитов с нелинейной кривой размагничивания, естественно, потребуется подпрограмма аппроксимации. В простейшем случае – кусочно-линейная аппроксимация с заданным числом отрезков может обеспечить приемлемую точность.

2. Известны значения коэффициентов насыщения магнитной цепи  $k_\mu$  и рассеяния  $K_\sigma$ . При строгом подходе эти коэффициенты можно рассчитать только после уточненного расчета магнитного поля. Аналитические и численные методы расчета полей рассеяния приведены в разделе 3.3.2. настоящей главы. Опыт проектирования показывает, что при предварительном задании этих коэффициентов ошибка даже в 15...20% дает погрешность в расчете интегральных параметров не более 2...3%.

3. Реакция якоря (статора) не оказывает существенного влияния на положение рабочей точки магнита. Как показали расчеты магнитного поля численными методами, МДС реакции якоря составляет не более 5...7% от НС магнита (см. главу 2).

Как следует из выражения (3.6), высота магнита жестко связана с величиной немагнитного зазора  $\delta$ , а, следовательно, и с диаметром проводника обмотки статора. Вследствие этого, область допустимых значений параметров резко сокращается, что часто приводит к невозможности реализации большого числа расчетных вариантов.

### 3.2 Критерий оптимальности

Критерием качества электрической машины является совокупность технических, экономических и эксплуатационных параметров. Эта совокупность должна, как правило, учитывать сразу несколько разнородных параметров, которые могут находиться между собой в логическом противоречии [1,89]. Можно

построить для каждого параметра математические модели и определить области оптимума для них, но одновременно оптимизировать сразу все параметры невозможно [2,101]. Есть несколько компромиссных решений этой проблемы. Первое – выбирается главный параметр, который оптимизируется, а второстепенные выступают в виде функций-ограничителей. Функции-ограничители могут задаваться либо в виде жестких условий уравнениями или неравенствами, либо в виде штрафных функций, которые искусственно ухудшают главный параметр, если второстепенный вышел за границы оптимальных значений [108]. В применении к МД, предназначенному для работы в бортовой автоматике, за главный параметр, очевидно, следует принять массу машины. В роли функций – ограничителей могут выступать потребляемая мощность, габариты двигателя и его себестоимость. Если определяющим критерием является себестоимость двигателя, которую на раннем этапе проектирования трудно определить, можно в качестве главного параметра принять массу постоянных магнитов. Известно, что редкоземельные магниты, примерно, в 80...150 раз дороже обмоточной меди и в 300...1000 раз дороже электротехнической стали. Таким образом, себестоимость двигателя с постоянными магнитами во многом определяется их массой. Параметры ограничители в этом варианте будут – потребляемая мощность и габариты двигателя [63,70].

Вторым методом многокритериальной оптимизации является построение обобщенного параметра  $Y$  в виде суммы (3.7) или произведения (3.8) частных параметров оптимизации [15].

$$Y = \alpha_1 y_1^* + \alpha_2 y_2^* + \dots + \alpha_n y_n^*, \text{ о.е.} \quad (3.7)$$

где  $y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*$  - относительные значения частных откликов;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  – коэффициенты значимости (весовые коэффициенты) соответствующих частных параметров. Обычно эти коэффициенты выбираются из интервала  $0 \dots 1$ , таким образом, чтобы их сумма была равна 1.

$$Y = (y_1^*)^{\alpha_1} \cdot (y_2^*)^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot (y_n^*)^{\alpha_n}, \text{ о.е.} \quad (3.8)$$

Следует помнить, что в выражении 3.8 наиболее значимому параметру соответствует наименьшее значение весового коэффициента  $\alpha_i$ , так как относительные значения частных откликов лежат в интервале от 0 до 1.

Для того, чтобы в выражениях (3.7) и (3.8) складывать и перемножать различные параметры их нужно привести к однородной безразмерной шкале. Методы, основанные на экспертных бальных оценках дают слишком грубые результаты и не могут быть рекомендованы для этой цели. Замена физического параметра его относительным значением в виде линейной функции может дать существенное искажение адекватности модели, если «идеальное» значение выбрано необоснованно. Сгладить ошибки субъективного выбора позволяет предложенная Харрингтоном [108] методика. Она заключается в следующем. Каждый частный параметр трансформируется в относительное значение по выражению:

$$y_i^* = \exp[-\exp(-\frac{y_{0i} - y_i}{\Delta y_i})], \text{ о.е.}, \quad (3.9)$$

где  $y_{0i}$  – минимально удовлетворительное значение частного параметра;

$y_i$  – текущее значение частного параметра;

$\Delta y_i$  – масштаб по абсолютной шкале параметра.

Выражение во внутренних скобках следует брать с обратным знаком если отыскивается минимум параметра.

Достоинствами преобразования (3.9) являются:

- монотонность функции на интервале  $[0;1]$  при изменении аргумента от  $-\infty$  до  $+\infty$ ;
- высокая чувствительность функции в рабочем диапазоне;
- простота программной реализации.

В качестве примера на рис. 3.2 приведена функция Харрингтона с двумя шкалами частных параметров – массой машины и потребляемой мощностью.

Кривой Харрингтона можно пользоваться как номограммой, но основное её значение – преобразование частных параметров в относительные безразмерные в математической модели объекта при его анализе и оптимизации. С помощью этой методики часто удается найти компромиссные варианты при противоречивых требованиях к частным откликам.

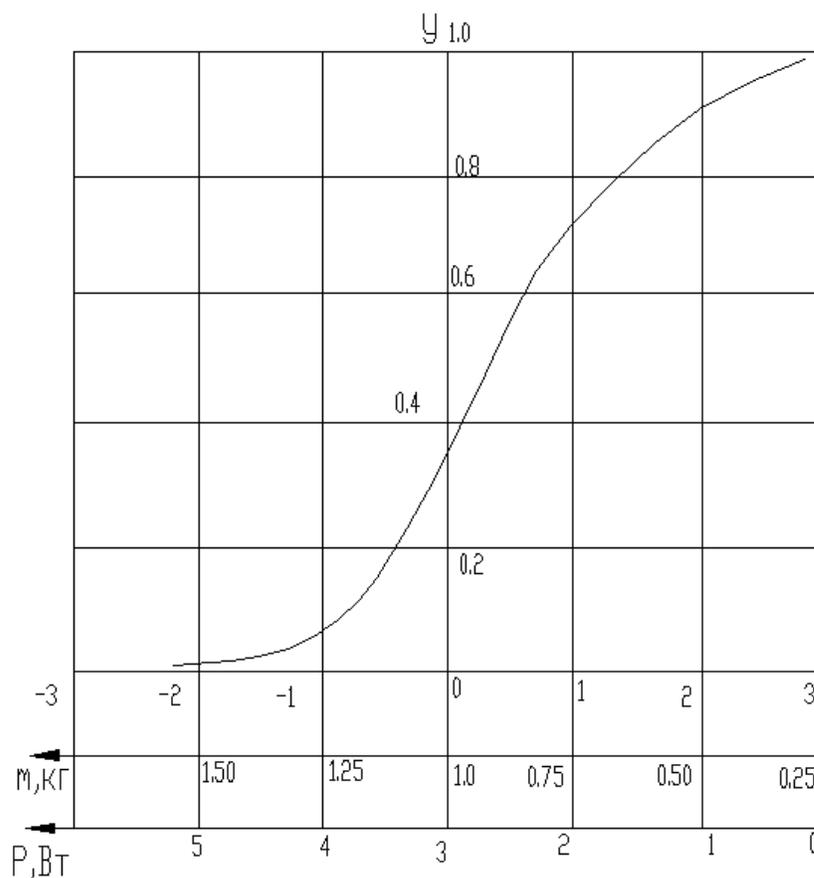


Рисунок 3.2 – Функция Харрингтона.

В МД с ограниченным углом поворота ротора могут возникнуть в зависимости от требований технического задания следующие варианты постановки задачи оптимизации:

1. Главный параметр оптимизации – масса двигателя, вспомогательные – габаритные размеры; варьируемые факторы – потребляемая мощность и размеры магнита.

2. Главный параметр – себестоимость машины, прямо зависящая от размеров магнита, а габариты, масса и потребляемая мощность – параметры ограничителя.

3. Главный параметр – габаритные размеры, вспомогательные – масса магнитов и полная масса машины; варьируемый фактор – потребляемая мощность.

Возможны и иные сочетания главных и вспомогательных параметров, но перечисленные определяют три основных подхода к расчету МД с ограниченным углом поворота ротора.

### **3.3 Структура математической модели**

Математическая модель (ММ) моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора, ориентированная на расчет основных параметров, должна удовлетворять специфическим требованиям автоматизированного проектирования. В предложенной модели формализованы все логические операции, которые в «ручных» методиках выполняет расчетчик. Кроме этого, весь расчет строится таким образом, что на основании ограниченного числа независимых переменных, последовательно получены все геометрические и электромагнитные соотношения с минимальным количеством уточняющих итераций. Табличные и списочные массивы организованы в виде файлов данных, которые при необходимости могут быть изменены или дополнены. Гибкость математической модели обеспечивает возможность подключения уточняющих подпрограмм, в частности блоков расчета магнитных полей двигателя.

Если задача проектирования состоит в создании МД с минимальной массой, и при этом потребляемая мощность ограничивается только тепловым фактором, то структура программы построена следующим образом:

В качестве независимых варьируемых факторов были выбраны:

- индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$ , Тл;
- число пар полюсов  $p$ ;
- длина и ширина магнитов  $l_m$  и  $b_m$ , м;
- число слоев обмотки якоря  $n_{сл}$ ;
- потребляемая мощность  $P_I$ , Вт.

Последний фактор ( $P_I$ ) достаточно сложно исключить из числа варьируемых параметров. Хотя, на первый взгляд, логичнее в этом варианте рассчитывать потребляемую мощность как функцию допустимого перегрева машины. Но это не удастся сделать без существенных допущений в тепловом расчете, которые могут привести к значительным погрешностям вычислений. Поэтому предлагается следующая последовательность расчета.

1. Предварительный расчет длины витка обмотки якоря и определение числа витков на один полюс. Как отмечалось выше, из-за того, что в беспазовых машинах существует детерминированная связь диаметра проводника и магнитных характеристик двигателя, уже на этом этапе удастся определить расчетный диаметр машины.

2. Предварительный расчет диаметра индуктора, и проверка предварительно принятого значения длины витка и дуги обмотки. Как показал опыт проектирования этот цикл сходится до приемлемой точности за 3...6 итераций.

3. Расчет требуемого диаметра провода и уточнение активного и индуктивного сопротивления обмоток. Расчет геометрии статора. Этот этап не вызывает принципиальных затруднений и требует лишь файла данных со стандартными значениями размеров голых и изолированных проводников.

4. Определение высоты магнита по упрощенной методике (без численных расчетов магнитного поля). Здесь используются файлы данных с набором кривых размагничивания для различных марок магнита.

5. Расчет магнитной цепи и геометрии активной части двигателя. В дальнейшем, когда выбран окончательный вариант, проводится детальный уточненный расчет магнитного поля двигателя аналитическим и (или) численным методом, изложенным в главе 2.

6. Проверочный тепловой расчет. На этом этапе отбрасываются все варианты в которых перегрев обмотки превышает допустимый.

7. Расчет массы элементов и суммарной массы машины. Здесь же возможно включение расчета обобщенного параметра качества, который будет использоваться при оптимизации.

Если потребляемая двигателем мощность ограничивается техническим заданием, то это упрощает задачу, так как исключается один из варьируемых факторов, что существенно сокращает количество вариантов расчета.

В случае, если в задании на проектирование требуется, кроме минимизации массы, ещё и минимизация потребляемой мощности, задача строго не разрешима. Это типичная задача многокритериальной оптимизации и решаться она должна методом компромиссов. Например, как описано выше, методом построения обобщенного параметра оптимизации.

Если рассматривать третий вариант постановки задачи: минимизация массы магнитов (в основном определяющих себестоимость двигателя) без дополнительных ограничений, то можно прийти к парадоксальному решению: минимальная масса магнитов и потребляемая мощность будет у двигателя с наибольшим, ничем не ограниченным, диаметром. Очевидна абсурдность такого варианта. Для преодоления противоречия требуется в постановке задачи наложить ограничения на габариты двигателя.

### 3.3.1. Функциональные связи параметров

Для реализации любой из поставленных выше задач установим функциональные связи параметров в той последовательности, в которой они используются в математической модели МД.

Электромагнитный момент двигателя определяется по выражению (3.10), полученному на основе формулы (3.2)

$$M = pIw \frac{b_m}{b_{\text{дуг}}} \cdot B_{\delta} \cdot \ell_m \cdot D, \text{ Нм}, \quad (3.10)$$

где  $I$ - ток статора, А;

$D$ -наружный диаметр индуктора, м.

Если исходить из того, что напряжение питания  $U$  определяется техническим заданием, то при известной потребляемой мощности  $P$  (независимая варьируемая переменная) можно предварительно рассчитать число витков на полюс статорной обмотки

$$W = \left( \frac{\pi U^2 b_{\text{дуг}}^2 a^2 n_{\text{сл}}^2}{4PK_{\text{л}}^2 \rho_0 l_{\text{вум}} 2p} \right)^{1/3}. \quad (3.11)$$

В этом выражении

$b_{\text{дуг}}$ - предварительное значение длины дуги обмотки, которое в дальнейшем будет уточняться, м;

$a$ - число параллельных ветвей обмотки;

$n_{\text{сл}}$ - число слоев обмотки (независимый варьируемый фактор);

$K_{\text{л}} = 0,9 \dots 0,93$  линейный коэффициент заполнения медью;

$\rho_0$ - удельное электрическое сопротивление материала обмотки статора в нагретом состоянии, Ом·м;

$l_{\text{вит}} -$  длина витка обмотки (предварительно), м.

В формуле (3.11) заложены ограничения на полное заполнение всех слоев обмотки (3.3), закон Джоуля– Ленца, выражение для активного сопротивления обмотки

$$R = \frac{\rho_{\theta} l_{\text{вит}} W 2p}{qa^2}, \text{ Ом}, \quad (3.12)$$

и закон Ома для участка цепи.

Расчетный диаметр машины (наружный диаметр индуктора) можно получить из выражения (3.10) для момента

$$D = \frac{Mb_{\text{дуг}}}{pB_{\delta} b_m l_m IW}, \text{ м} \quad (3.13)$$

Теперь, когда известен диаметр индуктора, уточняется значение длины дуги обмотки

$$b'_{\text{дуг}} = b_m + \frac{\alpha D \pi}{360}, \text{ м}, \quad (3.14)$$

где  $\alpha -$  рабочий угол поворота ротора, град.

Затем должны последовать несколько уточняющих циклов всех предыдущих расчетов до тех пор, пока не будет выполняться условие  $|b_{\text{дуг}} - b'_{\text{дуг}}| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon -$  допустимая погрешность вычисления длины дуги. Так как выражение 3.11 составлено с учетом полного заполнения слоев, то диаметр проводника однозначно рассчитывается по выражению 3.15

$$d = \frac{b_{\text{дуг}} n_{\text{сл}}}{WK_n}, \text{ м} \quad (3.15)$$

После автоматического выбора из файлов данных ближайшего стандартного диаметра проводника активное сопротивление статора рассчитывается по (3.12) и уточняется ток двигателя.

$$I = \frac{Mb_{\text{двз}}}{pWb_m l_m B_\delta D}, \text{ А}, \quad (3.16)$$

Величина немагнитного зазора, как уже отмечалось, в основном определяется высотой обмоточного слоя.

$$\delta = h_{oc} + \delta_g, \text{ м}, \quad (3.17)$$

где  $\delta_g$  – непосредственно воздушный зазор, м;

$h_{oc} = n_{cl}(d_{uz} + \Delta_{uz})$  – высота обмоточного слоя, м;

$d_{uz}$  – диаметр изолированного проводника, м;

$\Delta_{uz}$  – толщина межслойной изоляции, м.

На этапе предварительного расчета можно сделать допущение, что суммарная намагничивающая сила (Н.С.) машины линейно зависит от индукции в зазоре, так как доля Н.С. “стальных” участков не превышает обычно 5...7% и может быть учтена коэффициентом  $k_\mu$ , а рассеяние магнитного потока коэффициентом  $K_\sigma$ . В этом случае для магнитов типа КС – 37 и КС – 37А с линейной кривой размагничивания высота магнита рассчитывается по выражению (3.6). В том случае, когда кривая размагничивания далека от линейной, например, как у магнитов Nd – Fe – В, её проще всего аппроксимировать линейными отрезками и определить н.с. магнита по формуле

$$F = \frac{F_{i+1} - F_i}{B_{i+1} - B_i} (B - B_i) + F_i, \text{ А}, \quad (3.18)$$

где  $F_i, F_{i+1}, B_i, B_{i+1}$  – координаты соседних точек кривой размагничивания, между которыми попадает  $B$  – текущее значение индукции (размерность в

системе СИ). Число точек кривой размагничивания  $i_{max}$  может изменяться в зависимости от требуемой точности. Файлы данных по различным материалам входят в базу данных математической модели.

После расчета геометрических размеров остальных активных частей машины и уточнения электромагнитных параметров производится тепловой расчет. Расчет производится для установившегося теплового режима с учетом того, что теплоотдача происходит в спокойный воздух. Для теплового расчета воспользуемся методикой [50], дополненной из [58] расчетом перепада температур в корпусной изоляции.

Результатом теплового расчета является перегрев обмотки статора над температурой окружающей среды. Его величина является функцией ограничителем для значения потребляемой мощности в данном варианте расчета.

На последнем этапе рассчитываются массы элементов двигателя и его суммарная масса. Здесь же может быть сформирован и обобщенный параметр оптимизации, если модель предназначена для многокритериальной оптимизации. Сделать это можно по выражениям (3.8) или (3.9).

### 3.3.2. Расчет коэффициента рассеяния

#### 3.3.2.1. Аналитический расчет

В одном из основных выражений, на которых основан расчет магнитной системы – выражении (3.6) для определения высоты магнита необходимо знать предварительное значение коэффициента рассеяния магнитной системы двигателя  $K_\sigma$ . Точное решение этой задачи, полученное автором в главе 2, основанное на полномасштабном решении задачи расчета магнитного поля численными методами не может быть использовано при оптимизации из-за сложности и трудоемкости. Кроме того, численными методами можно определить значение  $K_\sigma$  лишь для определенной геометрической модели. Аналитический расчет, не-

смотря на более существенные допущения, позволяет решить эту задачу в общем виде. Поэтому на этапе оптимизационного расчета предлагается упрощенная методика определения коэффициента рассеяния, основанная на большем числе допущений, а детальный расчет поля проводится лишь при уточнении окончательного варианта и для выработки рекомендаций по инженерному проектированию.

При предварительном расчете полей рассеяния приняты следующие допущения:

- магнитная проницаемость стальных участков магнитопровода подавляюще больше магнитной проницаемости вакуума;
- материал постоянного магнита предполагается изотропным по магнитной проницаемости (это эквивалентно предположению о колениарности векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ ) и равномерно намагниченным по всему объему;
- боковые грани магнита перпендикулярны плоскости магнитопровода;
- торцевые грани магнита совпадают с торцом магнитопровода;
- потоком рассеяния между боковыми гранями смежных разноименных магнитов пренебрегаем.

На основании сделанных допущений можно весь поток рассеяния разделить на три: поток с боковых граней, поток с торцевых граней и поток рассеяния ребра магнита [74].

Рассмотрим поток рассеяния с боковой грани (рис. 3.3)

$$\Phi_{\sigma 1} = \int_S B dS, \text{ Вб}, \quad (3.19)$$

здесь  $B$  – индукция в элементе площади боковой грани  $dS$ .

$$dS = dh \cdot l_m, \text{ м}^2, \quad (3.20)$$

Текущее значение индукции можно определить через текущее значение Н.С.

$$F = F_m \frac{h}{h_m}, \text{ А}, \quad (3.21)$$

где  $F_m$  – максимальное значение Н.С. магнита на его верхней грани, А;

$h_m$  – высота магнита, м;

$h$  – текущее значение высоты магнита, м.

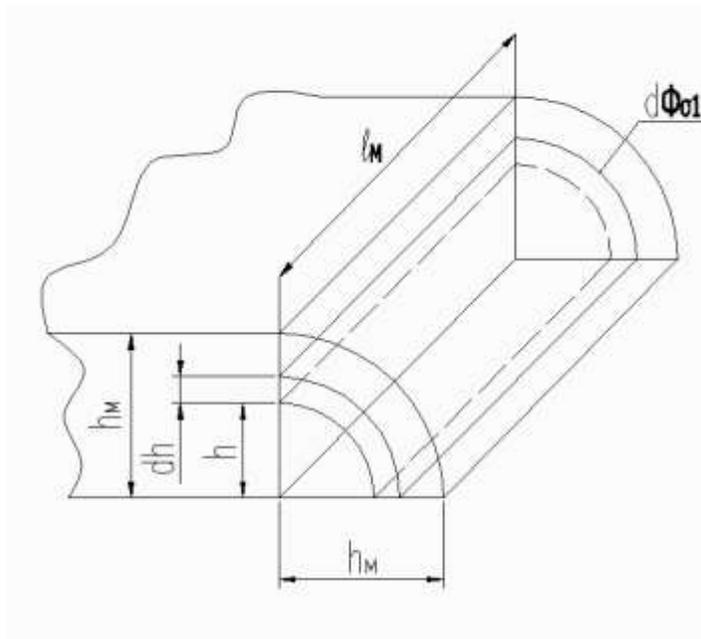


Рисунок 3.3 – Поток рассеяния боковой грани магнита.

$$B = \mu_0 \frac{F}{l}, \text{ Тл}, \quad (3.22)$$

здесь  $l$  – длина силовой линии

$$l = \frac{\pi h}{2}, \text{ м}, \quad (3.23)$$

С учетом 3.21 и 3.23 выражение 3.22 примет вид:

$$B = \frac{2\mu_0 F_M}{\pi h_M}, \text{ Тл.} \quad (3.24)$$

Магнитный поток с одной боковой грани будет равен

$$\Phi_{\sigma 1} = \int_0^{h_M} \frac{2\mu_0 F_M}{\pi h_m} l_m dh, \text{ Вб.} \quad (3.25)$$

После интегрирования получим значение потока с боковой грани магнита

$$\Phi_{\sigma 1} = \frac{2}{\pi} \mu_0 F_M l_M, \text{ Вб} \quad (3.26)$$

Поток с торцевой грани (рис. 3.4) можно определить аналогично, учитывая лишь то, что длина силовой линии будет вдвое больше и линейный размер грани  $-b_M$ .

Длина силовой линии

$$l = \pi h, \text{ м.} \quad (3.27)$$

Поток рассеяния с торца магнита

$$\Phi_{\sigma 2} = \int_0^{h_M} \frac{\mu_0 F_M}{\pi h_m} b_m dh, \text{ Вб.} \quad (3.28)$$

После интегрирования

$$\Phi_{\sigma 2} = \frac{1}{\pi} \mu_0 F_M b_m, \text{ Вб.} \quad (3.29)$$

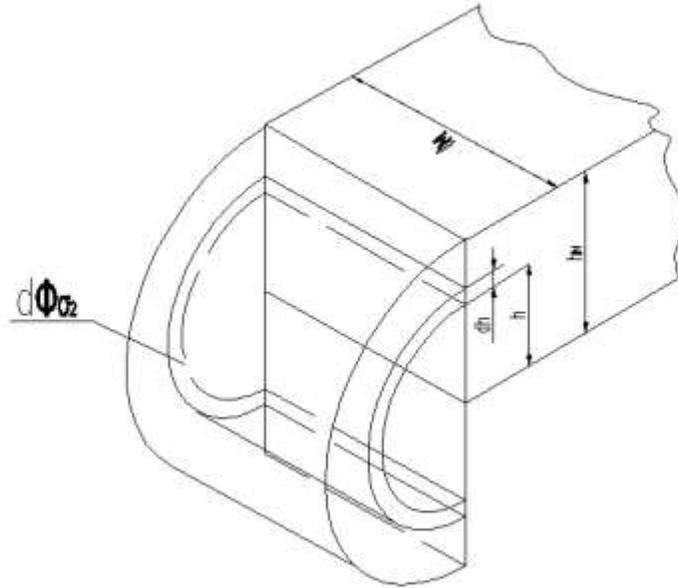


Рисунок 3.4 – Поток рассеяния торцевой грани магнита.

Для расчета потока с ребра магнита (рис. 3.5) нужно вычислить двойной интеграл

$$\Phi_{\sigma 3} = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \int_0^{\frac{h_y}{4}} B \cdot dh \cdot h \cdot d\theta, \text{ Вб}, \quad (3.30)$$

где индукция  $B$  определяется так же как для расчета потока с торцевой грани.

$$\Phi_{\sigma 3} = \frac{\mu_0}{8} F_m h_m, \text{ Вб} \quad (3.31)$$

Суммарный поток рассеяния машины на один полюс

$$\Phi_{\sigma} = 2 \Phi_{\sigma 1} + 2 \Phi_{\sigma 2} + 4 \Phi_{\sigma 3}, \text{ Вб}, \quad (3.32)$$

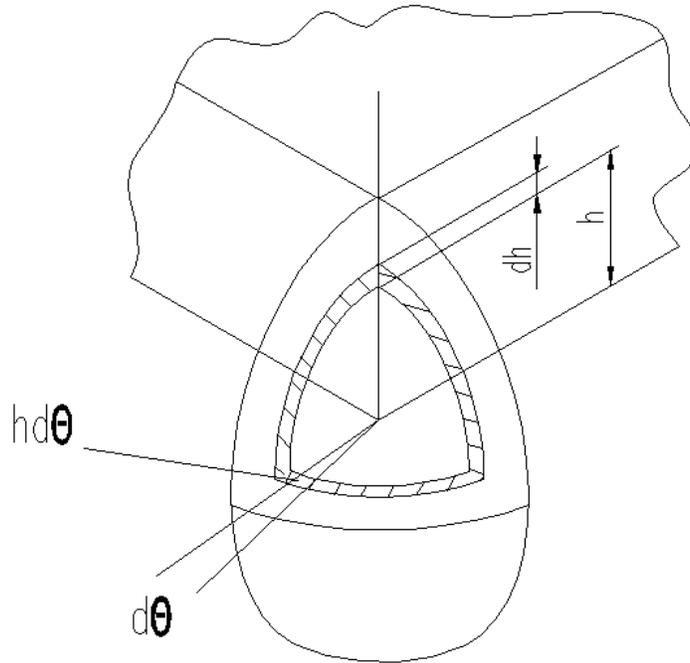


Рисунок 3.5 – Поток рассеяния с ребра магнита.

а коэффициент рассеяния  $K_\sigma$  можно определить по выражению

$$K_\sigma = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi}, \quad (3.33)$$

где  $\Phi$  – рабочий поток в зазоре на один полюс, Вб.

Пример расчета коэффициента рассеяния для одного варианта приведен в Приложении А.

### 3.3.2.2. Моделирование потоков рассеяния МКЭ

Поток рассеяния с боковой грани магнита легко определяется численным методом (МКЭ) на основе описанной выше геометрической модели МД. На рис. 3.6 в увеличенном масштабе приведена картина поля магнита в виде линий маг-

нитной индукции в межполюсном окне. Интегрирование по боковой грани дает значение магнитного потока на единицу длины магнита (1 м) величину

$$\Phi_{\sigma_1} = 1,50 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб.}$$

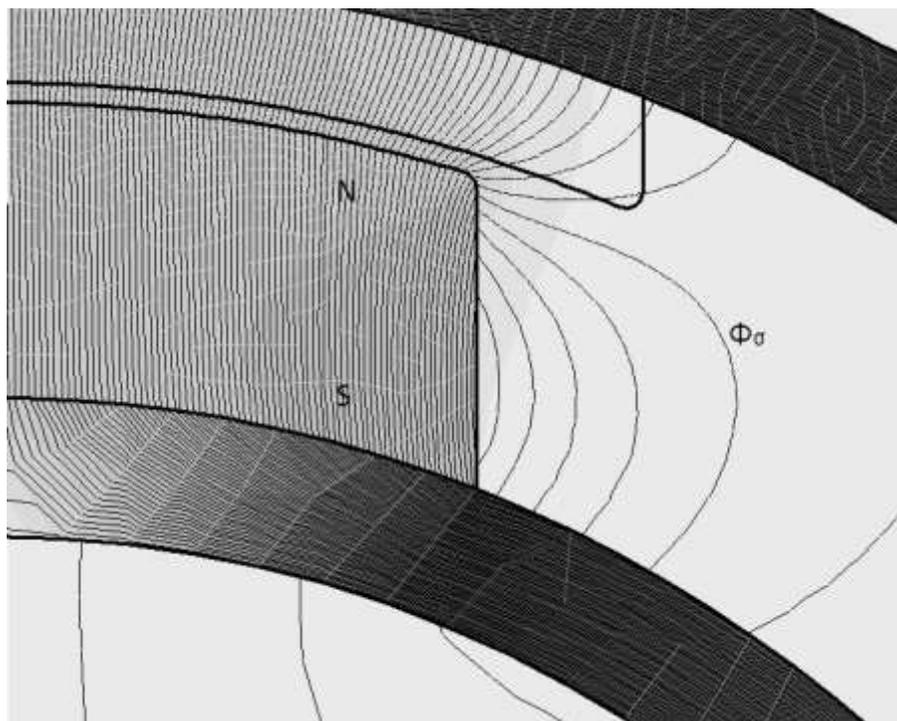


Рисунок 3.6 – Поток рассеяния с боковой грани магнита.

Аналогично были рассчитаны потоки рассеяния с торцов магнитов и их ребер, соответственно:

$$\Phi_{\sigma_2} = 0,97 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб};$$

$$\Phi_{\sigma_3} = 0,091 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб.}$$

Суммарный коэффициент рассеяния, определенный на основе расчета магнитного поля численным методом для данного примера составил

$$K'_\sigma = 1 + \frac{2\Phi_{\sigma_1} + 2\Phi_{\sigma_2} + 4\Phi_{\sigma_3}}{\Phi} = 1,193.$$

Расхождения со значением  $K_{\sigma}$ , полученным аналитическим методом составило 6,5% (см. Приложение А), что вполне приемлемо для оптимизационных расчетов.

### 3.3.3. Алгоритм расчетной математической модели

Расчетная математическая модель, связывающая выходные и входные параметры двигателя и предназначенная для машинного проектирования МД с ограниченным углом поворота ротора, позволяет численными методами с достаточной для проектировщика точностью, рассчитать вариант (варианты) машины с заранее заданными статическими и динамическими характеристиками.

Разработанная автором расчетная математическая модель представлена в виде последовательности блоков расчета, расположенных в определенном порядке, позволяющим при машинном проектировании гибко вводить различные исходные параметры и ограничения в зависимости от технических требований задания. Модель составляет основу алгоритма расчета МД, реализованного автором в программе «MODMD» (Приложение Б)

Алгоритм позволяет варьировать шестью независимыми переменными:  $p, B_{\delta}, b_m, l_m, P_1, n_{сл}$ . Функции ограничителя: перегрев статора, условия размещения дуги обмотки на полюсном делении, условие полного заполнения обмотки, ограничение высоты магнита по условию технологичности, ограничение индукции в зазоре величиной остаточной индукции магнита. Выходные параметры: масса магнитов и полная масса машины, геометрические размеры двигателя. При достаточном количестве вариантов расчета можно построить поверхности отклика, как для прямых зависимостей типа  $m_l = f(B_{\delta}, m_m)$ ,  $m_l = f(B_{\delta}, P_1)$  и т.п., так и для обратных, например,

$$P_1 = f(m_m, B_{\delta}), P_1 = f(m_m, n_{сл}) \text{ при } D_n = \text{const.}$$

Структура алгоритма расчетной математической модели состоит из следующих блоков (рис. 3.7):

1, 2 – ввод данных технического задания, констант, допустимых значений параметров - лимитеров;

3– ввод начальных и конечных значений варьируемых факторов, шага их изменений;

4– расчет предварительных значений параметров статора;

5, 6, 7 – проверка условий размещения обмотки и цикл уточнения длины дуги обмотки статора;

8, 9 – уточненный расчет параметров с обращением к одному из файлов стандартных размеров проводников;

10, 11 – расчет магнитной системы и высоты магнита с обращением к одному из файлов кривых размагничивания постоянных магнитов;

12 – уточнение геометрических размеров и параметров двигателя;

13, 14, 15 – тепловой расчет двигателя и проверка перегрева обмотки статора;

16, 18 – расчет массы элементов и суммарной массы двигателя, печать результатов;

17 – запись результатов в файл «mass1» для дальнейшей обработки и оптимизации.

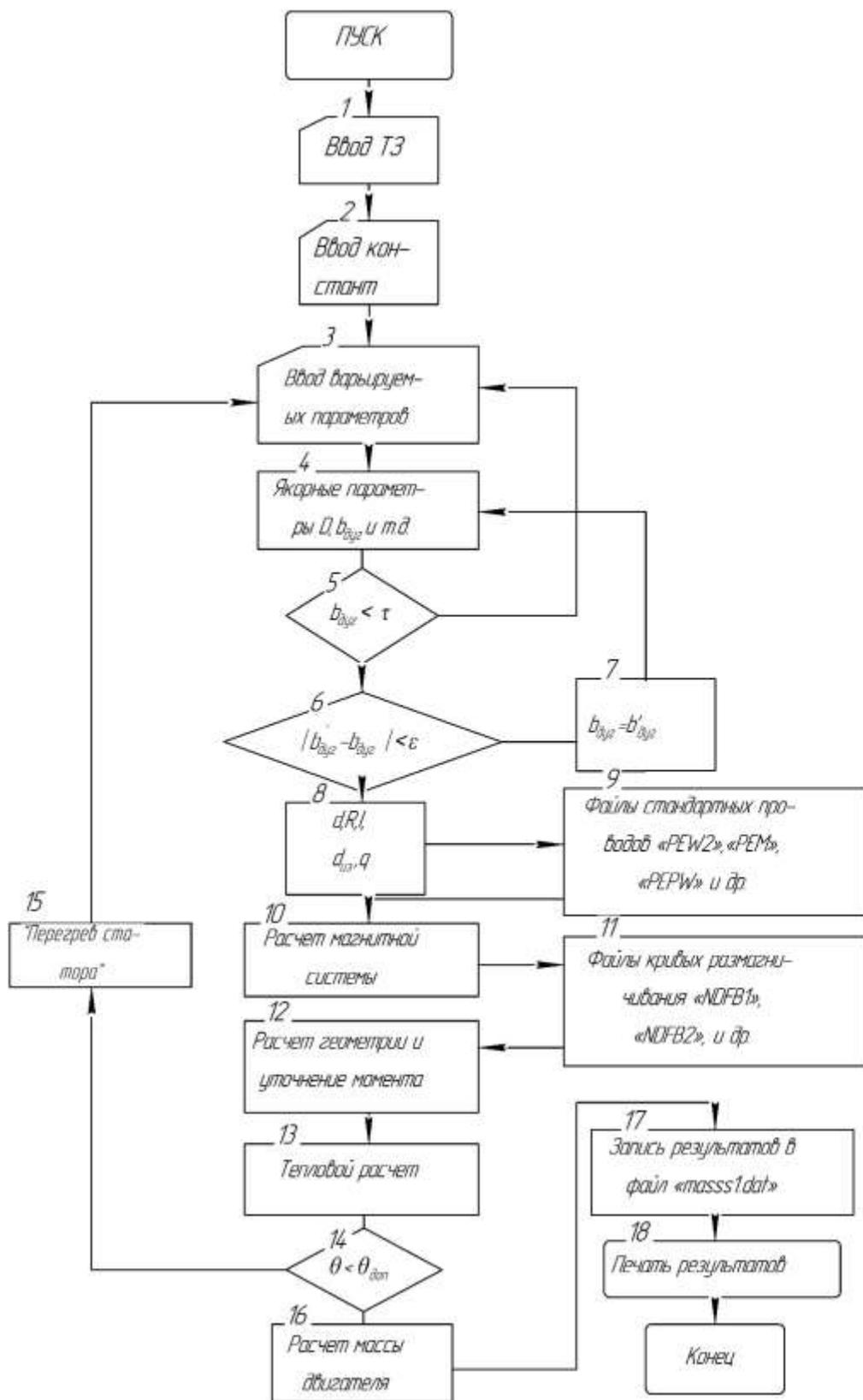


Рисунок 3.7 – Структурная схема расчетной модели МД. Программа «MODMD».

### 3.4. Поверхности отклика целевой функции

В предыдущей главе в качестве главных параметров оптимизации МД с ограниченным поворотом угла ротора было предложено выбрать массу двигателя или суммарную массу магнитов, определяющую в основном себестоимость двигателя. Независимыми переменными выступают при этом шесть величин:

- число пар полюсов,  $p$ ;
- число слоев обмотки,  $n_{сл}$ ;
- индукция в зазоре,  $B_{\delta}$ , Тл;
- потребляемая мощность,  $P_1$ , Вт;
- длина магнита,  $l_m$ , м;
- ширина магнита,  $b_m$ , м.

Следовательно, поверхностью отклика будет гиперповерхность шестого порядка, которую изобразить на плоскости невозможно. Для исследования рельефа этой поверхности и получения предварительных результатов был применен сетчатый метод упорядоченного перебора. Естественно, что этот метод не может претендовать на детальное исследование поверхности отклика и отыскания глобального оптимума, так как для этого потребовалось бы огромное число вариантов расчета, которое определяется произведением:

$$N = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_i \cdot \dots \cdot K_n ,$$

где  $K_i$  – количество уровней  $i$  – того фактора;

$n$  – количество факторов.

Так, например, для шести факторов, каждый из которых изменяется на 5 – ти уровнях

$$N = 5^6 = 15625$$

Для большинства факторов 5-ти уровней – явно недостаточно для полного исследования поверхности.

Однако, сетчатый метод дает возможность проследить основные тенденции зависимостей выходных параметров от входных и построить, хотя и грубо приближенно, поверхности отклика. Кроме того, можно определить примерное расположение границ функций – ограничителей.

На рисунках 3.8 и 3.9 показаны характерные кривые отклика для некоторых пар параметров. (Построить поверхности более высокого порядка невозможно).

Расчеты проведены для МД со следующими номинальными параметрами:

- вращающийся момент  $M= 1$  Нм;
- напряжение питания  $U= 27$  В;
- режим работы – *SI* (продолжительный);
- материал постоянных магнитов - КС37А;
- рабочий угол поворота ротора  $\pm 5^\circ$
- максимальный перегрев обмотки якоря  $80^\circ$

В программе MODMD приняты следующие обозначения:

$P_I - P$  – потребляемая мощность, Вт;

$n_{сл} - nс$  - число слоев обмотки статора;

$B\delta - b$  - индукция в воздушном зазоре, Тл;

$l_M - l_m$  - длина магнита по оси двигателя, м;

$b_M - b_m$  – ширина магнита, м;

$mI$  – масса активных частей машины, кг;

$mm$  - масса магнитов суммарная, кг.

Из рисунков видно, что области допустимых значений достаточно узки из-за ограничений по перегреву, допустимому максимальному диаметру и индукции в зазоре. Минимальные значения как массы двигателя ( $mI$ ), так и массы магнитов ( $mm$ ) лежат на кривых, ограничивающих области определения параметров. Минимум массы двигателя для данной области лежит на границе допу-

стимого перегрева, а минимум суммарной массы магнитов – на границе максимального допустимого диаметра. Это согласуется и с физической точки зрения: минимум массы электрических машин достигается при их максимальном использовании по тепловым нагрузкам.

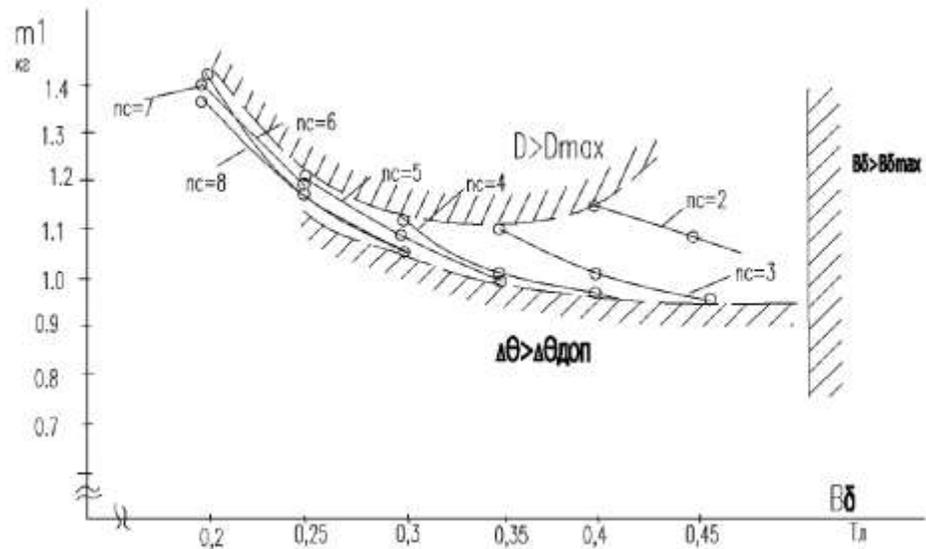


Рисунок 3.8 – Зависимость массы двигателя от индукции в зазоре  $B_\delta$  и числа слоев обмотки  $n_c$  при  $p=3$ ,  $P=45$  Вт,  $l_m=0,04$  м,  $b_m=0,16$  м.

Если ограничения оставить в виде жесткого условия, например, по температуре:

$$\Delta\theta \leq \Delta\theta_{доп} - \text{годен};$$

$$\Delta\theta > \Delta\theta_{доп} - \text{брак},$$

то использование направленных методов оптимизации (градиентных, симплекс-методов и т. д.) становится проблематичным. Как известно [22,100] эти методы неработоспособны, если экстремум находится на границе области, заданной ограничением типа «стена». В этом случае применимы методы упорядоченного перебора или случайного поиска, но и тот и другой при шести независимых факторах требует неоправданно большого количества вариантов расчета.

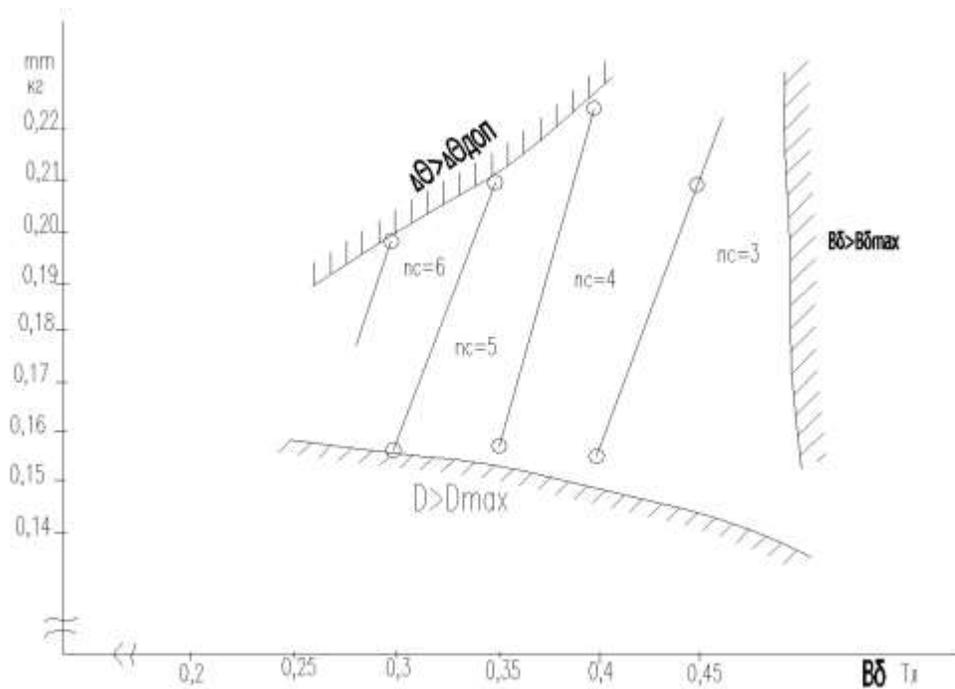


Рисунок 3.9 – Зависимость массы магнитов от  $B_\delta$  и  $n_c$  при  $p=3$ ,

$$P=45 \text{ Вт}, l_m=0,04 \text{ м}, b_m=0,16 \text{ м}$$

Для того, чтобы рациональнее исследовать поверхности отклика необходимо заменить «жесткие» ограничения, если это возможно, на компромиссные, например, используя метод штрафных функций.

### 3.4.1. Штрафные функции

Метод штрафных функций [22] применяется для трансформации факторного пространства с целью замены «жестких» границ компромиссными. При этом область допустимых значений факторов расширяется, а ограничения типа «стена» заменяются более или менее пологими склонами. Это делается для того, чтобы сделать работоспособными направленные методы оптимизации. Кроме того, применение штрафных функций иногда дает возможность получить конкурентоспособные варианты машины, которые остались бы за областью определения, если бы ограничения задавались жестко. Например, иногда превышение температуры выше допустимого всего на  $1 - 2^\circ$  дает заметный выигрыш по массе. Очевидно, что на срок службы такое нарушение ограничения существен-

но повлиять не может, а вариант будет забракован. Метод штрафных функций позволяет преодолеть это противоречие. Суть метода заключается в следующем: при нарушении некоторого ограничения, параметр оптимизации искусственно ухудшается, причем тем больше, чем больше было нарушено данное ограничение. Если были нарушены сразу несколько ограничений, то «штраф» складывается (перемножается). Существует несколько способов организации функций штрафа – линейный, квадратичный (степенной), показательный (экспоненциальный) и т. д. Наиболее жестким является экспоненциальный штраф, который резко ухудшает параметр оптимизации, если нарушено какое-либо ограничение. Автором был выбран именно этот метод для трех видов ограничений – по перегреву якоря, максимально допустимому диаметру и условию размещения дуг обмоточного слоя на полюсном делении. Ограничения по максимальной индукции в зазоре, которую может обеспечить магнит нельзя сделать компромиссным, так как при его нарушении вариант становится физически нереализуемым. Поэтому ограничение  $B\delta < B\delta_{max}$  остается «жестким».

Функции штрафа для первых трех ограничений были приняты в виде:

по перегреву:

$$STT = \exp((\Delta\theta - \Delta\theta_{доп}) K_t) \quad (3.34)$$

по допустимому диаметру:

$$STD = \exp((D_{max} - D) K_D) \quad (3.35)$$

по условию размещения обмотки:

$$STBDU = \exp((b_{du} - \tau - b) K_{bdu}) \quad (3.36)$$

В этих выражениях  $K_t, K_D, K_{bdu}$  – коэффициенты, определяющие крутизну штрафных функций.

В результате анализа функций отклика были выбраны следующие значения этих коэффициентов:

$$K_t = 0,1; K_D = 100; K_{bdu} = 100.$$

В качестве примера в таблице 3.1 приведены значения коэффициентов штрафа для некоторых величин.

Таблица 3.1 - Коэффициенты штрафа.

| $\Delta\theta - \Delta\theta_{доп}$ | град | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    |
|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $STT$                               | о.е. | 1,105 | 1,22  | 1,65  | 2,72  | 7,39  |
| $D_{max} - D$                       | м    | 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,010 | 0,020 |
| $STD$                               | о.е. | 1,105 | 1,22  | 1,65  | 2,72  | 7,39  |
| $bdu - \tau - b$                    | м    | 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,010 | 0,020 |
| $STBDU$                             | о.е. | 1,105 | 1,22  | 1,65  | 2,72  | 7,39  |

Очевидно, что при значениях перегрева больше допустимого на 10 градусов и выше, вариант будет уже неконкурентоспособен, так как параметр оптимизации будет ухудшен более чем в 2,7 раза.

Тоже самое произойдет и при превышении диаметра двигателя более чем на 0,01 метра над допустимым или дуги обмотки над свободным полюсным делением.

Общий коэффициент штрафа определялся в виде произведения:

$$ST = STT \cdot STD \cdot STBDU \quad (3.37)$$

Расчетные значения параметров:

$$m_l^* = ST \cdot m_l; \quad (3.38)$$

$$m_m^* = ST \cdot m_m; \quad (3.39)$$

$$Y^* = ST \cdot Y; \quad (3.40)$$

где  $m_l$  – масса машины, кг;

$m_m$  – суммарная масса магнитов, кг;

$Y$  – обобщенный параметр, о.е.

Естественно, что механизм штрафных функций включается только при нарушении ограничений. В остальных случаях коэффициент штрафа  $ST$  приравнивается к единице.

Для того, чтобы знать, что в данном варианте применялись штрафные функции в распечатке результатов расчета после значения параметра добавлялся значок, соответствующий виду ограничения, которое было нарушено. Например,

$$mI = 2,541 \text{ } ^\text{t} \text{ } ^\text{`},$$

означает, что перегрев в данном варианте выше допустимого, а

$$mm = 0,256 \text{ } ^\text{d} \text{ } ^\text{`},$$

что применялся штрафной коэффициент за превышение диаметра над допустимым значением.

#### 2.4.2. Рельеф поверхностей отклика с учетом штрафных функций.

Программа расчета моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора «MODMD» была дополнена механизмом штрафных функций, описанным в предыдущем разделе, и получила название «MODMD 2». С помощью ее сетчатый метод был исследован рельеф поверхностей отклика, который стал существенно отличаться на границах функций ограничителей, от представленного на рис. 3.8 и 3.9. На поверхностях отклика явно выделялись унимодальные впадины, ограниченные склонами с большей или меньшей крутизной (рис.3.10...3.14). Как и ожидалось, появились конкурентные точки, находящиеся за бывшими границами.

Представленные области не могут претендовать на полноту исследования всей поверхности целевой функции, так как 4 из 6 факторов принимались за постоянные. Однако, в результате расчета сетчатый метод получил несколько тысяч вариантов и некоторые из них имеют высокие значения выходных параметров. Эти варианты могут быть рекомендованы для дальнейших уточнен-

ных расчетов по инженерным методикам без классической оптимизации. Так как число вариантов расчета для «ручной» обработки результатов слишком велико, то автором была разработана вспомогательная подпрограмма для сортировки и упорядочения по возрастанию массивов результатов расчета (Приложение Е).

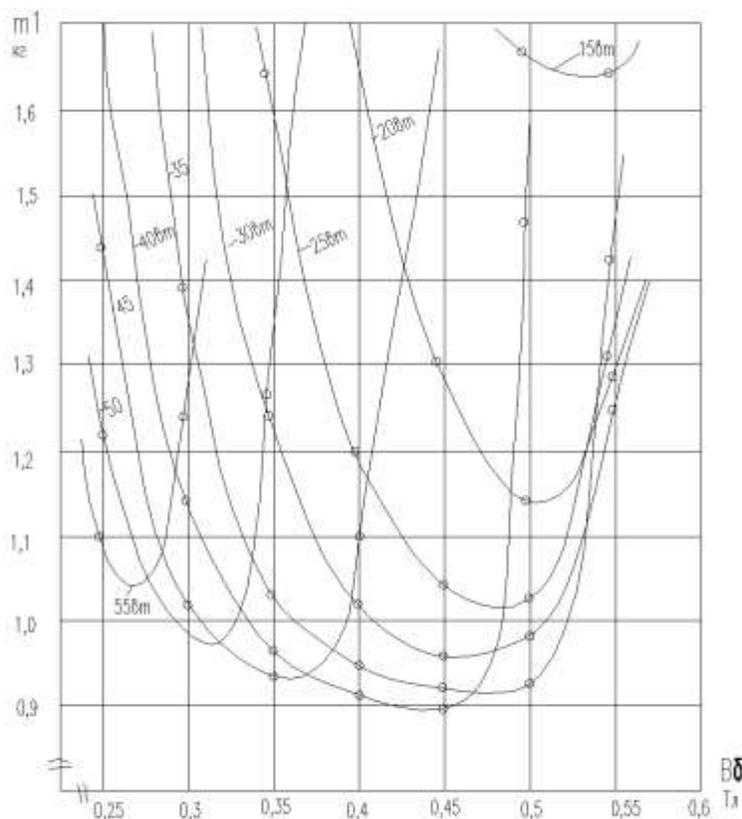


Рисунок 3.10 – Зависимость массы двигателя от индукции в зазоре и потребляемой мощности с учетом функций штрафа.  $M=1$  Нм,  $p=2$ ,  $l_m=0,04$  м,  $b_m=0,016$  м,  $n_{cl}=6$ .

При помощи этой программы были обработаны файлы результатов расчета «mass.dat» (Приложение В), содержащие по несколько тысяч элементов. В результате в упорядоченных массивах оставлялось, как правило, по 20 элементов с наилучшими результатами (см. Приложение Г). По ним можно судить о

перспективных направлениях поиска. В частности, вокруг «лучших» точек можно исследовать поверхность отклика более тщательно с мелким шагом.

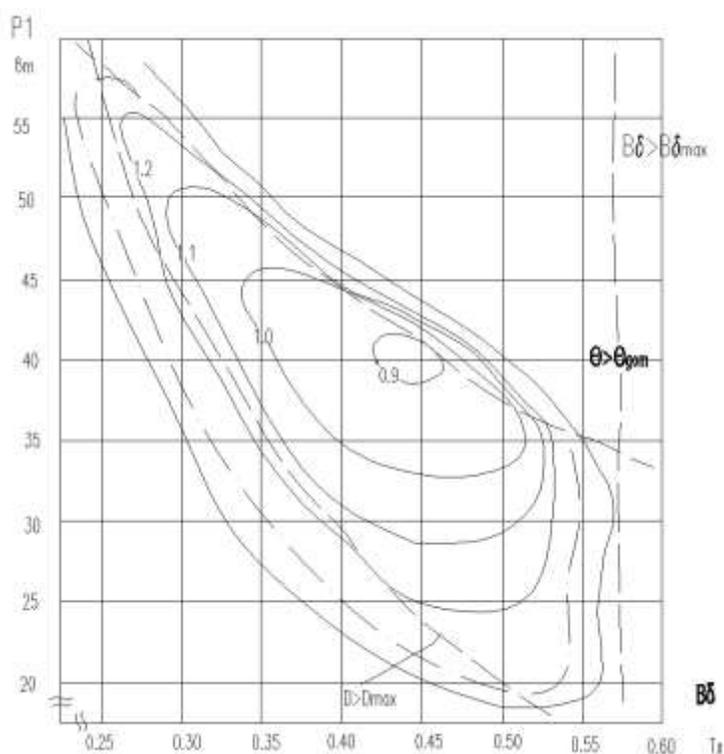


Рисунок 3.11 – Поверхность отклика  $m_l=f(B_\delta, P_l)$  с учетом функций штрафа.

$$M=1 \text{ Нм}, p=2, l_m=0,04 \text{ м}, b_m=0,016 \text{ м}, n_{cl}=6.$$

Естественно, нельзя утверждать, что верхняя строка упорядоченного массива является точкой глобального оптимума, так как шаг по параметрам слишком велик, но основные тенденции зависимости поверхности отклика от варьируемых переменных проследить удастся.

В основном, эти тенденции для рассматриваемого МД заключаются в следующем:

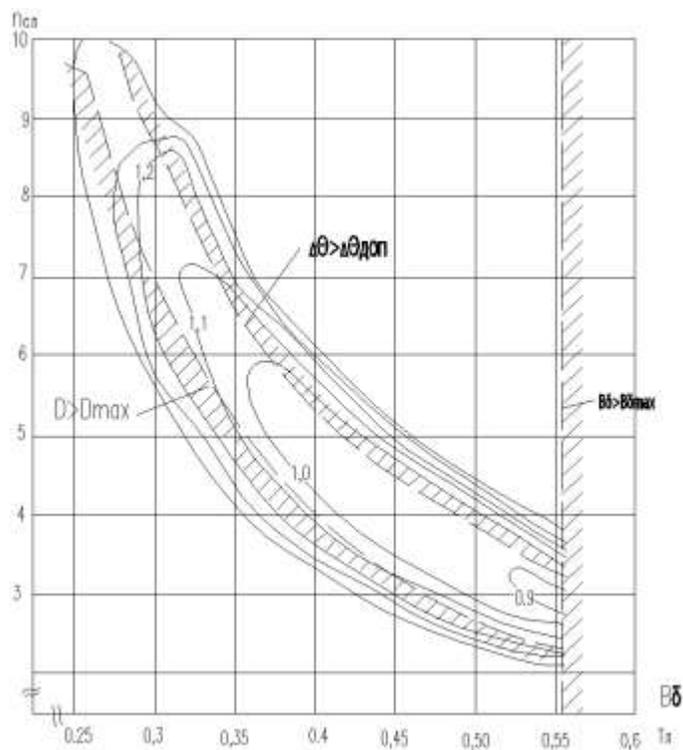


Рисунок 3.12 – Поверхность отклика  $m_l=f(B_\delta, n_{cl})$  с учетом ограничений.  $M=1$  Нм,  $p=2$ ,  $l_m=0,04$  м,  $b_m=0,016$  м,  $P_l=45$ Вт.

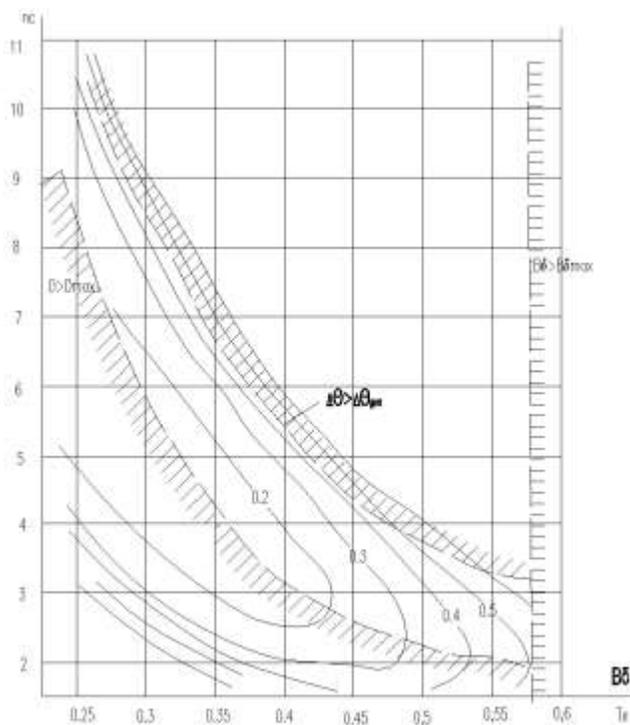


Рисунок 3.13 – Поверхность отклика  $m_m=f(B_\delta, n_{cl})$  с учетом ограничений.  $M=1$  Нм,  $p=2$ ,  $l_m=0,027$  м,  $b_m=0,016$  м,  $P_l=45$ Вт.

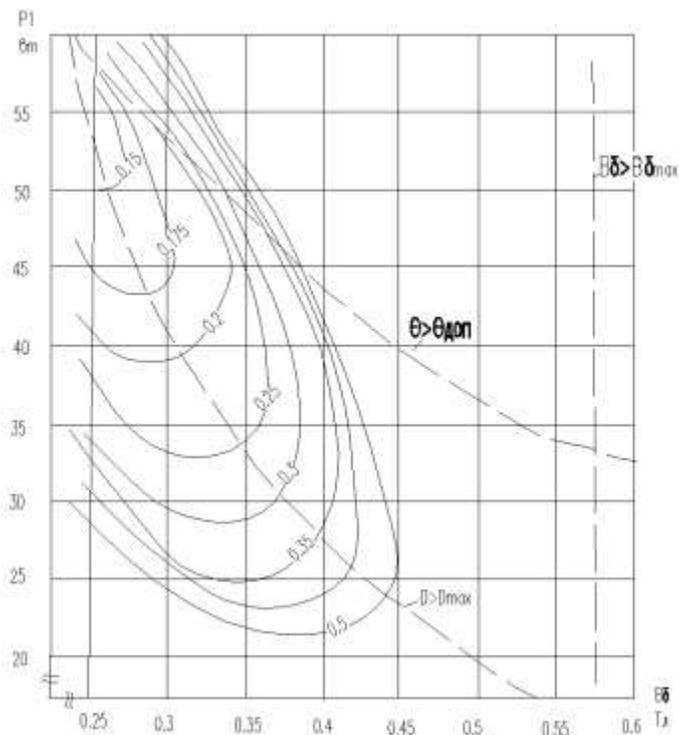


Рисунок 3.14 – Поверхность отклика  $m_m=f(B_\delta, P_1)$  с учетом функций штрафа.  $M=1$  Нм,  $p=2$ ,  $l_m=0,027$  м,  $b_m=0,016$  м,  $n_{cl}=6$ .

1.Четырехполюсные машины выигрывают по сравнению с шестипольсными и, тем более с восьмипольсными, и по массе машины и по суммарной массе магнитов.

2.Число слоев обмотки якоря при оптимизации и по массе машины и по суммарной массе магнитов имеет оптимальное значение в области {3...5} и лежит в первом случае на границе перегрева, а во втором случае - на ограничении по максимальному диаметру.

3.Область оптимума индукции при минимизации массы магнитов и массы двигателя не совпадает. В первом случае она предположительно лежит в интервале {0,25...0,3Тл}, а во втором - ее значения выше – {0,4...0,5Тл} и ограничивается возможностями используемых магнитов.

4.Оптимальное значение потребляемой мощности при минимизации массы магнитов ограничивается только перегревом якоря (если ограничение по по-

требляемой мощности не введено специальным требованием технического задания) и лежит на границе области определения {55...65 Вт}

5. Геометрические размеры магнитов (длина и ширина) имеют оптимальные значения в разных интервалах, в зависимости от уровней других параметров, и не могут быть однозначно рекомендованы. Эти значения можно определить лишь в процессе оптимизации.

Как видно, рекомендуемые границы варьируемых параметров довольно широки и варианты машины, полученные внутри них могут существенно отличаться.

Необходимо отметить, что все эти рекомендации относятся к МД с номинальными параметрами, приведенными в начале настоящего раздела.

Проведенные исследования поверхностей отклика показывают, что предположительно оптимальные точки лежат на границах области определения. Минимум массы двигателя – на границе допустимого перегрева обмотки якоря и границе максимальной индукции, которую могут обеспечить выбранные магниты, а минимум суммарной массы магнитов – на ограничении максимального диаметра двигателя. Как и ожидалось, области оптимумов не совпадают. Выход может быть найден при компромиссном решении с использованием обобщенного параметра оптимизации. Поверхности отклика, рассчитанные для параметра  $Y$ , образованного по выражению (3.8) существенно отличаются по рельефу от однопараметрических зависимостей. Так как параметр оптимизации настроен в виде произведения, то «склоны» поверхности отклика более крутые и изменилось положение областей оптимума и их рельеф. Минимальное значение параметра оптимизации получается из вариантов, как правило, близких к первой десятке лучших вариантов по частным откликам.

### 3.5 Выводы

1. Доказано, что при проектировании МД с ограниченным углом поворота ротора, в качестве критерия оптимальности целесообразно принимать экстремум обобщенного параметра, в который входят со своими весовыми коэффициентами относительные значения частных параметров машины – массы двигателя, массы магнитов, потребляемой мощности и т. д.

2. Получены основные функциональные связи параметров МД с беспазовой обмоткой и возбуждением от постоянных магнитов с учетом ограничений, накладываемых особенностями конструкции машины, позволяющие на основе варьирования шестью независимыми переменными получать расчетные варианты двигателя для дальнейшего анализа и оптимизации.

3. Разработана аналитическая методика расчета полей рассеяния для радиальной попеременнополюсной магнитной системы, применяемая для оптимизационного расчета и предварительного анализа вариантов, адекватность которой проверена численными методами моделирования магнитного поля.

4. На основе разработанной математической модели беспазового МД постоянного тока созданы алгоритм и программа расчета для ЭВМ, позволяющая быстро, эффективно и с достаточной для инженерных расчетов точностью, рассчитывать варианты двигателя. Программа может использоваться в качестве основного ядра в программе оптимизации МД.

5. Поверхности отклика, построенные сетчатым методом с учетом ограничений в виде штрафных функций, предположительно унимодальны и удобны для исследования методами направленного поиска (градиентными, методами наискорейшего спуска и т. д.)

6. Предварительный анализ поверхностей отклика позволяет рекомендовать для МД с номинальным моментом  $0,5 \dots 2,5$  Нм при использовании самарийкобальтовых магнитов четырехполюсное исполнение, уровень индукции в зазоре  $0,2 \dots 0,3$  Тл при минимизации массы магнитов и  $0,4 \dots 0,45$  Тл при мини-

мизации полной массы двигателя. И в том, и другом случае потребляемая мощность ограничивается лишь перегревом (если иное не оговорено техническим заданием).

## **4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Основной задачей проектирования любого электромеханического преобразователя, в том числе и моментного двигателя, является создание конкурентоспособного варианта машины, который имел бы наилучшие технические и экономические показатели. В предыдущей главе были проанализированы и определены главные параметры качества МД (параметры оптимизации) и описана математическая модель для их расчета. В настоящей главе приведены основные результаты проектирования, анализа и выбора наиболее приемлемых методов оптимизации целевой функции качества МД. Поиск экстремума функции отклика, как правило, начинается с исследования поверхностей отклика [7,8,99]. В зависимости от рельефа поверхности, видов функций ограничителей выбирается тот или иной метод оптимизации. Критериями выбора метода оптимизации являются его работоспособность в условиях заданного рельефа, экономичность (время поиска экстремума), вероятность отыскания глобального оптимума при возможном наличии локальных экстремумов и т.д. Два основных класса методов оптимизации – направленного и случайного поиска имеют свои достоинства и недостатки [31,99]. Выбор метода определяется конкретной задачей, стоящей перед проектировщиком, и от этого выбора во многом зависит не только количество машинного времени, затраченного на создание проекта, но и вероятность отыскания глобального экстремума поверхности отклика, а, следовательно, и качества проекта в целом.

### **4.1 Постановка задачи и выбор метода оптимизации**

Математически задача сводится к минимизации целевой функции

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{4.1}$$

при  $m$  ограничениях – равенствах

$$\varphi_i(x_i) = 0, \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (4.2)$$

и  $k$  ограничениях – неравенствах

$$\psi_j(x_j) \geq 0, (j=1,2,\dots,k). \quad (4.3)$$

Допустимое решение этой задачи есть упорядоченное множество чисел  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  удовлетворяющее ограничениям (4.2) и (4.3) – точка в  $n$  – мерном пространстве. Допустимое решение, минимизирующее целевую функцию (4.1), называется оптимальным решением (оптимальным планом).

Обычно оптимальное решение, если оно существует, единственно, однако возможны случаи, когда оптимальных решений бесчисленное множество. В задачах оптимизации электромеханических преобразователей такие случаи не встречаются. Чаще бывают случаи, когда множество  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  оказывается пустым. Это происходит тогда, когда ограничения (4.2) и (4.3) заданы неоправданно жестко. Практически это означает, что двигатель с заданными требованиями в рамках выбранной структуры невозможно технически реализовать. Выход может быть найден при переходе к другой конструкции, или даже к другому типу машины – то есть к структурному синтезу.

Предварительное исследование поверхностей отклика МД показывает, что множество допустимых решений не пустое, а сами поверхности нелинейные. Исследованные районы поверхности отклика (не претендующие на полностью) имеют по одной области оптимума и, предположительно, по одному экстремуму рис. 3.10 ... 3.14. На поверхностях имеются криволинейные впадины, ограниченные более или менее крутыми склонами, “овраги” соотнoсительно пологими краями. “хребтов” и “плоскогорий” обнаружено не было.

Рассмотрим основные методы поиска экстремума, которые возможно применить для поставленной задачи.

Первая группа методов – методы упорядоченного перебора или сетчатые методы. Достоинства и недостатки этих методов хорошо известны [1,59,89]. Основное достоинство – при достаточно мелком шаге по каждому из факторов

можно получить детальную картину поверхности отклика и с заданной точностью отыскать её оптимум. Но это возможно лишь при малом числе факторов и простой математической модели. При увеличении числа факторов и достаточно сложной модели сетчатый метод невозможно применить из-за физически нереализуемого количества испытаний. В применении к описываемой задаче с шестью варьируемыми переменными сетчатый метод оптимально использовать для предварительного исследования поверхностей отклика и для выяснения основных тенденций влияния факторов на параметр оптимизации, что и было проделано в разделе 3.4 настоящей работы. Для дальнейшей, более точной оптимизации МД, этот метод рекомендован быть не может.

Близки по объёму вычислений к сетчатым методам методы случайного поиска. Суть базового метода случайного поиска заключается в следующем. В области допустимых значений факторов выбирается некоторое количество случайных точек, и вычисляются для них значения выходного параметра. Затем варианты сортируются, и из них выбирается лучший. Критерии выбора числа испытаний и окончания поиска очень неопределенны, и говорить о достаточной вероятности отыскания оптимума можно лишь при количестве опытов, соизмеримом с количеством опытов сетчатого метода с мелким шагом для аналогичной задачи. Метод случайного поиска может быть модернизирован элементами направленного поиска, заключающегося в том, что задача разбивается на отдельные этапы. Вначале случайные точки “набрасываются” с достаточно крупным шагом, а затем подозрительные на экстремум области сужаются, и исследуются более тщательно. Это позволяет сократить число опытов, но метод теряет своё основное преимущество – большую вероятность отыскания глобального экстремума при наличии локальных при полимодальной поверхности. Для рассматриваемой задачи метод случайного поиска не даёт преимуществ ни перед сетчатыми методами, ни перед методами направленного поиска.

Основное отличие методов направленного поиска экстремума заключа-

ется в том, что движение по направлению к экстремуму подчиняется некоторому алгоритму и корректируется по мере необходимости.

К методам направленного поиска относят в первую очередь симплекс-метод, градиентные методы, различные разновидности метода наискорейшего спуска (подъёма).

Симплекс-метод [59] заключается в построении многогранника решений – симплекса. Число вершин многогранника равно  $n+1$ , где  $n$  – число факторов. Так для двух факторов симплекс – это треугольник, для трёх – тетраэдр и т.д. Применение симплекс-метода начинается с выбора какого-либо допустимого базисного решения: выбирается точка факторного пространства по априорным данным близкая к зоне оптимума и в окрестностях этой точки строится базисный симплекс. Анализируются результаты решения в его вершинах, и затем симплекс поворачивается вокруг ребра, противоположного вершине с максимальным (при поиске минимума) значением параметра оптимизации. Получившееся решение сравнивается с базисным и снова определяется вершина симплекса с наибольшим значением целевой функции. Симплекс поворачивается снова вокруг ребра, противоположного “худшей” вершине. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнут экстремум (идеальный случай), либо до тех пор, пока результаты не будут улучшаться из-за “зацикливания” решения, которое может произойти по нескольким причинам. Первая – размеры симплекса выбраны неоправданно большими, и он перекрывает зону оптимума, не попадая в его вершину. Вторая группа причин связана с характером рельефа. Симплекс не может работать на “плоскогорье”, а также на поверхностях с локальными экстремумами. Поэтому симплекс-метод в математике в основном применяется в решении задач линейного программирования. Для решения нелинейной задачи оптимизации МД этот метод малопригоден.

Градиентные методы поиска оптимальных решений обладают перед перечисленными выше, особенно перед методами ненаправленного поиска, глав-

ным преимуществом, заключающемся в резком сокращении количества вычислений для достижения экстремума. Суть градиентных методов заключается в вычислении градиента функции цели либо на каждом шаге движения к экстремуму, либо после серии шагов, определённых стратегией поиска.

$$\overrightarrow{grad}(y) = \vec{i} \frac{\partial y}{\partial x_1} + \vec{j} \frac{\partial y}{\partial x_2} + \dots + \vec{k} \frac{\partial y}{\partial x_n} \quad (4.4)$$

Градиент показывает направление наискорейшего подъёма, а антиградиент, соответственно, спуска по поверхности отклика.

В задачах численной оптимизации обычно невозможно определить значение частных производных в выражении (4.4), поэтому их заменяют разностными отношениями

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_1}; \quad \frac{\partial y}{\partial x_2} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_2}; \quad \dots; \quad \frac{\partial y}{\partial x_n} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_n} \quad (4.5)$$

Разностные отношения (4.5) можно получить, если поочерёдно изменять только одну переменную. Очевидно, что для определения оценки градиента (антиградиента) на каждый шаг требуется провести  $n$  испытаний. Для того, чтобы двигаться по линии наискорейшего спуска, (точнее по ломаной линии, аппроксимирующей её) необходимо вычислять оценку градиента после каждого шага. Причем в [59] рекомендуется уменьшать величину шага по мере приближения к минимуму согласно тейлоровскому разложению  $F(\lambda^{[j]})$ , где  $\lambda$ - величина шага.

$$\lambda^{[j]} = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\Delta y}{\Delta x_k}\right)^2}{\sum_{k=1}^n \sum_{h=1}^n \frac{\Delta^2 y}{\Delta x_k \Delta x_h} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x_k} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x_h}}, \quad (j=0, 1, 2, \dots) \quad (4.6)$$

где все разностные отношения вычисляются при  $x_i = x_i^{[j]}$ .

При достаточно большом числе независимых переменных объем вычислений становится значительным. Поэтому, обычно, ”чистый” градиентный метод используется для оптимизации редко.

Более быструю сходимость дает метод Гаусса-Зейделя, в котором после определения оценки градиента движение производится только вдоль одной из осей при фиксированных остальных параметрах до тех пор, пока спуск эффективен. Затем изменяется следующий параметр и т.д. Метод Гаусса-Зейделя хорошо работает при относительно простых поверхностях типа сфероид, эллипсоид, параболоид и т.п., но если рельеф имеет искривлённый “овраг” или “седло” метод становится неработоспособным. Как показали предварительные исследования, поверхности отклика МД могут иметь “овраги” (рис. 3.12, 3.13), следовательно, для них метод Гаусса – Зейделя использовать нельзя.

Для сокращения числа опытов по сравнению с “чисто” градиентным методом можно воспользоваться методом наискорейшего спуска, в котором после расчёта оценки градиента в направлении антиградиента движение продолжается до тех пор, пока спуск эффективен. Затем направление корректируется после вычисления нового значения градиента. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при оптимизации случайных процессов, где он получил название – метод Бокса – Уилсона [105]. При оптимизации МД задача, по сути, близка к задачам, для которых рекомендуется использовать этот метод [2]. Метод Бокса – Уилсона уверенно работает при существенно криволинейных поверхностях. Не работает этот метод только на границах определённых препятствием типа “вертикальная стена”. Но эту проблему мы решили введением функции штрафа (гл. 3). Кроме этого, у метода Бокса – Уилсона, как и у большинства методов направленного поиска, нет абсолютной достоверности результата при полимодальной поверхности. Но как показали исследования двумерных поверхностей целевых функций МД (гл. 3), локальных экстремумов обнаружено не было. Следовательно, метод Бокса – Уилсона может быть рекомендован для оптимизации МД в сочетании с предварительным зондированием сетчатым методом и заключительным подробным исследованием зоны оптимума.

## 4.2 Оптимизация МД методом Бокса – Уилсона

Как отмечалось выше, для осуществления метода наискорейшего спуска необходимо знать составляющие антиградиента функции (4.4). Когда это невозможно сделать, как в рассматриваемом случае, градиент заменяется его оценкой

$$\overrightarrow{grad}(y) \approx \hat{F}(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) \quad (4.7)$$

в точке  $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$ , которая называется точкой нулевого уровня и является исходной при движении по градиенту(антиградиенту). Приближение заключается в замене частных производных на конечные разностные отношения.

Метод Бокса – Уилсона состоит в повторении процедуры:

- построение факторного эксперимента в окрестности точки нулевого уровня;
- вычисление оценки градиента в этой точке по результатам эксперимента;
- крутое восхождение (спуск) в направлении оценки градиента (антиградиента);
- нахождение максимума (минимума) функции отклика по этому направлению.

В дальнейшем будем рассматривать только метод наискорейшего спуска (движение по антиградиенту) для нахождения глобального минимума функции цели, так как главные параметры МД – масса, масса магнитов и себестоимость – требуют минимизации.

### 4.2.1 Построение матрицы факторного эксперимента и вычисление оценки градиента

Наиболее удобным инструментом для вычисления оценки градиента (4.7) является хорошо разработанный и апробированный метод факторного эксперимента [2,8,32], заключающийся в том, что в окрестностях точки нулевого

уровня строится согласно матрице планирования эксперимента план, в вершинах которого рассчитывается значение функции цели. По этим значениям поверхность отклика в окрестностях нулевой точки заменяется аппроксимирующей плоскостью, коэффициенты наклона к осям которой дают оценку градиента в этой точке.

Рассмотрим решение этой задачи на примере оптимизации по массе МД с номинальными параметрами, приведёнными в разделе 3.4 настоящей работы.

Первый этап – этап выбора исходной точки начала оптимизации. Так как мы получили достаточно полную предварительную информацию о поверхности отклика, то выбор исходной точки не представляет затруднений. Обычно выбирается точка, близкая к предполагаемому экстремуму. Но для проверки работоспособности алгоритма и исследования поверхности на возможные локальные экстремумы, целесообразно провести несколько серий крутых спусков с различными исходными точками.

Для первого примера выберем исходную точку с координатами:

$$X_{10} = p = 2; \quad X_{20} = P_0 = 25 \text{ Вт}; \quad X_{30} = l_m = 0,027 \text{ м};$$

$$X_{40} = b_m = 0,022 \text{ м}; \quad X_{50} = n_{cl} = 3; \quad X_{60} = B_\delta = 0,45 \text{ Тл}.$$

Для интервалов варьирования примем следующие значения

$$\Delta X_1 = 0; \quad \Delta X_2 = 0,5 \text{ Вт}; \quad \Delta X_3 = 0,0005 \text{ м};$$

$$\Delta X_4 = 0,0002 \text{ м}; \quad \Delta X_5 = 0; \quad \Delta X_6 = 0,002 \text{ Тл}.$$

Значения интервалов  $\Delta X_1$  и  $\Delta X_5$  равные нулю приняты из-за того, что при крупнодискретном изменении варьируемого параметра возможны “качания” решения.

Вторым этапом оптимизации методом наискорейшего спуска является формирование матрицы планирования эксперимента.

Известно, что для полного факторного эксперимента (ПФЭ), когда реализуются все возможные сочетания уровней факторов, необходимо выполнить

$$K = 2^n \tag{4.8}$$

опытов. Для рассматриваемой задачи  $n=6$ ,  $K=64$ . Если учесть, что при движении к оптимуму придётся несколько раз корректировать направление, то количество расчётов становится внушительным.

Но для расчёта шести составляющих градиента 64 испытания излишни. Поэтому вместо ПФЭ проведём его четверть-реплику с шестнадцатью опытами. Для этого столбцы в матрице дробного факторного эксперимента  $K=2^{6-2}$  (ДФЭ), соответствующие факторам  $X_5$  и  $X_6$  организуем, используя генерирующие соотношения:

$$X_5 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (4.9)$$

$$X_6 = X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (4.10)$$

Генерирующие соотношения высокого порядка взяты потому, что эффект тройного и, тем более, четверного, взаимодействия всегда меньше, чем парное влияние [2]. В таблице 4.1 показана матрица ДФЭ  $K=2^{6-2}$ .

Знаки “+” соответствуют +1 в кодированных значениях, знаки “-” – (-1) (верхний и нижний уровень соответственно).

Каждая строка матрицы с соответствующим набором уровней факторов представляет собой один вариант расчёта параметра оптимизации.

Следующим этапом оптимизации является расчет разностных отношений, определяющих оценки градиента в точке нулевого уровня

$$b_j = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cdot k(i, j) \cdot \Delta x_j, \quad (4.11)$$

где  $n$  – число опытов (в примере  $n = 16$ );

$j$  – номер фактора;

$i$  – номер опыта;

$y_i$  –  $i$ -тое значение параметра оптимизации;

$k(i, j)$  – соответствующее кодированное значений фактора из матрицы ДФЭ; ( $k(i, j)$  принимает значения  $\pm 1$ );

$\Delta x_j$  – интервал варьирования  $j$ -того фактора.

Таблица 4.1. Матрица ДФЭ 2<sup>6-2</sup>

| $j \backslash i$ | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> | X <sub>6</sub> | Y               |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 1.               | -              | -              | -              | -              | +              | -              | Y <sub>1</sub>  |
| 2.               | +              | -              | -              | -              | -              | -              | Y <sub>2</sub>  |
| 3.               | -              | +              | -              | -              | -              | +              | Y <sub>3</sub>  |
| 4.               | +              | +              | -              | -              | +              | +              | Y <sub>4</sub>  |
| 5.               | -              | -              | +              | +              | +              | -              | Y <sub>5</sub>  |
| 6.               | +              | -              | +              | +              | -              | -              | Y <sub>6</sub>  |
| 7.               | -              | +              | +              | +              | -              | +              | Y <sub>7</sub>  |
| 8.               | +              | +              | +              | +              | +              | +              | Y <sub>8</sub>  |
| 9.               | -              | -              | -              | +              | -              | +              | Y <sub>9</sub>  |
| 10.              | +              | -              | -              | +              | +              | +              | Y <sub>10</sub> |
| 11.              | -              | +              | -              | +              | +              | -              | Y <sub>11</sub> |
| 12.              | +              | +              | -              | +              | -              | -              | Y <sub>12</sub> |
| 13.              | -              | -              | +              | -              | -              | +              | Y <sub>13</sub> |
| 14.              | +              | -              | +              | -              | +              | +              | Y <sub>14</sub> |
| 15.              | -              | +              | +              | -              | +              | -              | Y <sub>15</sub> |
| 16.              | +              | +              | +              | -              | -              | -              | Y <sub>16</sub> |

Знак «минус» перед выражением (4.11) поставлен, чтобы  $b_j$  определяло значения оценок составляющих антиградиента для поиска минимума целевой функции.

После расчета разностных отношений  $b_j$  (в теории планирования эксперимента они называются коэффициентами регрессии) можно определить предварительные направления поиска экстремума. Положительные значения  $b_j$  соответствуют обратной зависимости  $y$  от  $x_j$ , следовательно, данный фактор в ходе

минимизации у необходимо увеличивать, факторы у которых  $b_j$  отрицательный, нужно уменьшать.

#### 4.2.2 Движение по линии кратчайшего спуска

Для движения по линии наикратчайшего спуска требуется выбрать масштаб шагов спуска. Эта операция трудно поддается формализации, а от ее удачного решения во многом зависит эффективность движения по поверхности отклика. При неоправданно мелком шаге на результат накладывается соизмеримая ошибка округлений и резко возрастает число вычислений, а при крупном шаге возникает вероятность на очередном шаге «перескочить» зону оптимума. Вследствие этого в предлагаемой программе оптимизации выбор масштаба шагов движения по линии ската осуществляется самим проектировщиком в диалоговом режиме.

Шаги движения по антиградиенту определяются выражениями (4.12, 4.14). Для первого шага.

$$x_{j(1)} = x_{j(0)} + \lambda_0(-grad y) \quad (4.12)$$

$$\text{или } x_{j(1)} = x_{j(0)} + \lambda_0 \cdot b_j; \quad (4.13)$$

для  $m+1$  –го шага

$$x_{j(m+1)} = x_{jm} + \lambda_m b_j, \quad (4.14)$$

где  $\lambda_0$  – масштаб первого шага;

$\lambda_m$  – масштаб  $m$ –го шага;

$x_{j(0)}$  – нулевой уровень  $j$ -го фактора;

$x_{jm}$  – значение  $x_j$  фактора на шаге  $m$ .

В выражениях (4.13) и (4.14) масштаб шага  $\lambda$  в общем случае может быть не одинаковым, но для варианта диалогового режима рациональнее принять для каждой серии расчетов  $\lambda = const$ .

Движение по антиградиенту продолжается пошагово до тех пор, пока спуск эффективен, то есть значение  $Y$  уменьшается.

Как правило, область оптимума может быть достигнута после первой серии расчетов только при простейших, близких к линейным, рельефах поверхности отклика. В более сложных, подобных рассматриваемой задаче оптимизации МД, требуется обычно несколько серий спуска с регулярной проверкой и уточнением направления антиградиента.

Последовательность действий, при этом следующая:

1. При неэффективном  $m$ -ном шаге за лучшее значение принимается  $(m-1)$  – значение. Координаты этой точки считаются новым нулевым уровнем.
2. Строится матрица ДФЭ, и рассчитываются составляющие антиградиента.
3. Выбирается масштаб шагов спуска по поверхности отклика.
4. Пошагово рассчитывается значение параметра оптимизации до тех пор, пока спуск эффективен.
5. При неудовлетворительном результате пункты 1- 4 повторяются до тех пор, пока не будет достигнут оптимум.

На рис. 4.1. и 4.2. показаны в качестве иллюстрации пути движения по поверхности отклика для двух пар варьируемых параметров. Для проверки достоверности полученного результата исходные точки выбирались в разных областях поверхности отклика. Как показали расчеты, линии движения по антиградиенту сходятся в одну область оптимума, что подтверждает надежность метода.

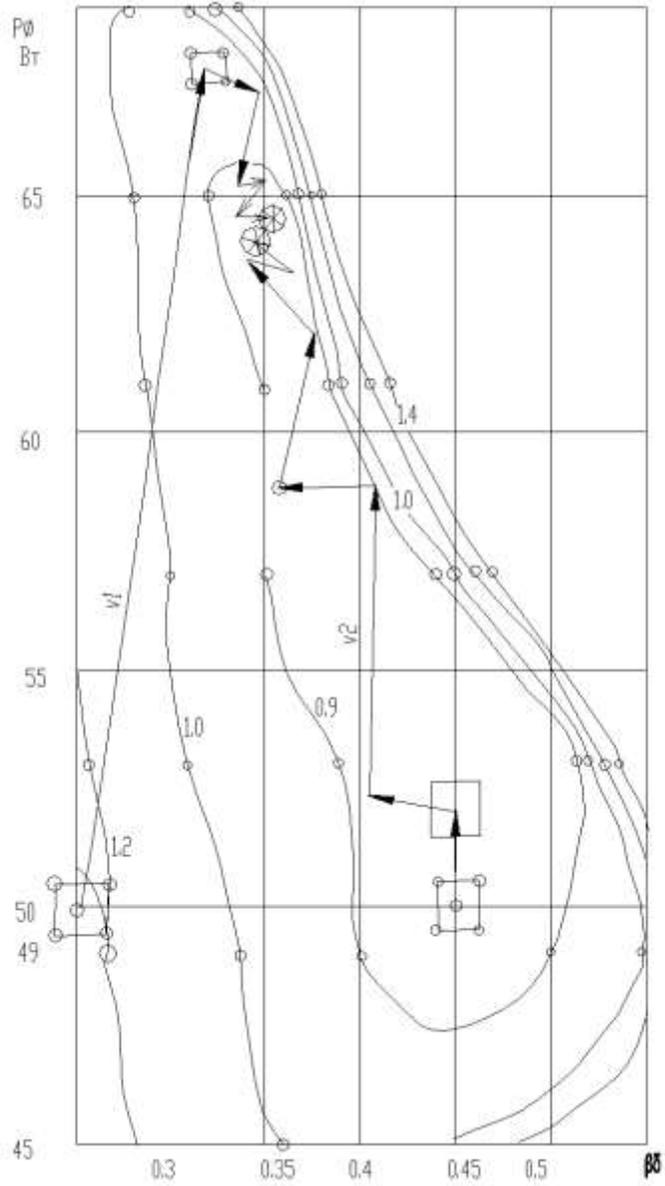


Рисунок 4.1 - Спуск по поверхности отклика  $m_1=f(B_\delta, P_0)$  из разных исходных точек.  $M=1$  Нм,  $p=2$ ,  $l_m=0,027$  м,  $b_m=0,022$  м,  $n_{cl}=3$ .

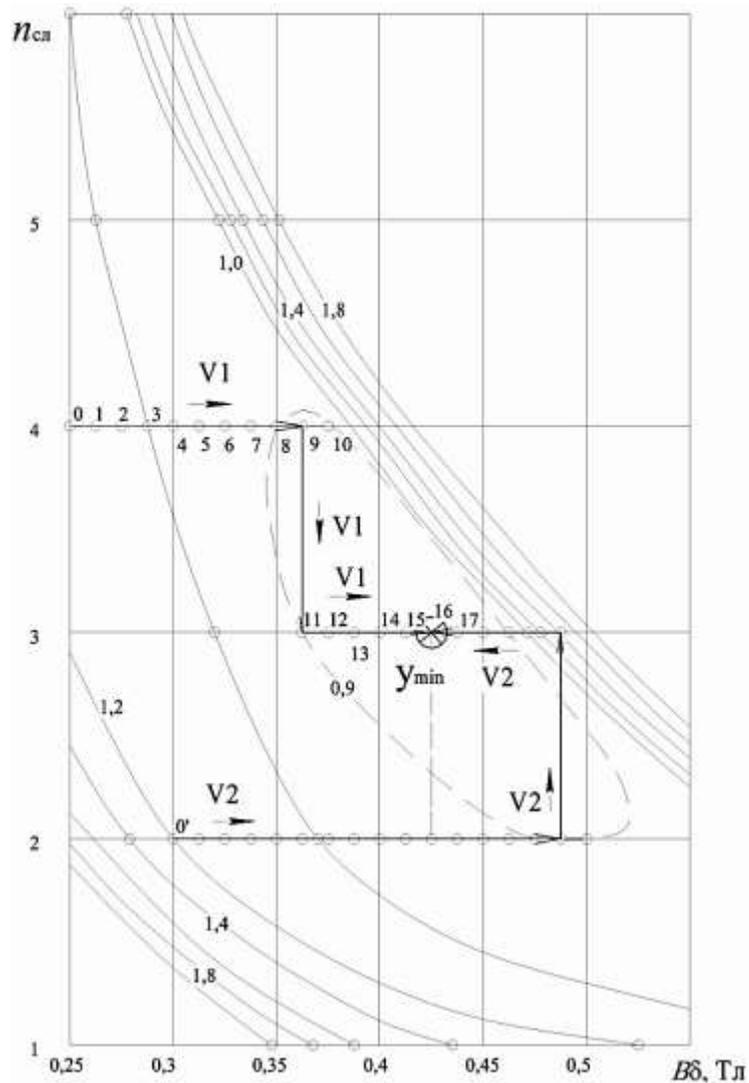


Рисунок 4.2 - Спуск по поверхности отклика при одном дискретном параметре  $m_l=f(B_\delta, n_{сл})$ .  
 $M=1$  Нм,  $p=2$ ,  $l_m=0,027$  м,  $b_m=0,022$  м,  $P_0=57$ Вт,  $2p=4$ .

### 4.3 Результаты оптимизационного проектирования двигателей МД-100-1 и МД – 6

Матрица ДФЭ для двигателя МД-100-1 (номинальные параметры которого приведены в предыдущем разделе) имеет вид, представленный в табл. 4.2. В последней графе приведены результаты расчета параметра оптимизации – полной массы машины.

По знаниям  $u_j$  рассчитывались согласно выражению (4.11) составляющие градиента  $b_j$ .

Таблица 4.2 -Исходная матрица ДФЭ для двигателя МД-100-1.

| $\begin{matrix} x_j \\ i \end{matrix}$ | $X_1$ | $X_2, \text{Вт.}$ | $X_3, \text{м.}$ | $X_4, \text{м.}$ | $X_5$ | $X_6, \text{Тл}$ | $Y, \text{кг.}$ |
|--|-------|-------------------|------------------|------------------|-------|------------------|-----------------|
| 1.                                     | 2     | 24,5              | 0,0265           | 0,0158           | 3     | 0,448            | 2,19            |
| 2.                                     | 2     | 24,5              | 0,0265           | 0,0158           | 3     | 0,448            | 2,04            |
| 3.                                     | 2     | 25,5              | 0,0265           | 0,0158           | 3     | 0,452            | 1,87            |
| 4.                                     | 2     | 25,5              | 0,0265           | 0,0158           | 3     | 0,452            | 1,93            |
| 5.                                     | 2     | 24,5              | 0,0275           | 0,0162           | 3     | 0,448            | 1,92            |
| 6.                                     | 2     | 24,5              | 0,0275           | 0,0162           | 3     | 0,448            | 2,03            |
| 7.                                     | 2     | 25,5              | 0,0275           | 0,0162           | 3     | 0,452            | 1,81            |
| 8.                                     | 2     | 25,5              | 0,0275           | 0,0162           | 3     | 0,452            | 1,75            |
| 9.                                     | 2     | 24,5              | 0,0265           | 0,0162           | 3     | 0,452            | 1,97            |
| 10.                                    | 2     | 24,5              | 0,0265           | 0,0162           | 3     | 0,452            | 1,88            |
| 11.                                    | 2     | 25,5              | 0,0265           | 0,0162           | 3     | 0,448            | 1,72            |
| 12.                                    | 2     | 25,5              | 0,0265           | 0,0162           | 3     | 0,448            | 1,79            |
| 13.                                    | 2     | 24,5              | 0,0275           | 0,0158           | 3     | 0,452            | 1,79            |
| 14.                                    | 2     | 24,5              | 0,0275           | 0,0158           | 3     | 0,452            | 1,84            |
| 15.                                    | 2     | 25,5              | 0,0275           | 0,0158           | 3     | 0,448            | 1,66            |
| 16.                                    | 2     | 25,5              | 0,0275           | 0,0158           | 3     | 0,448            | 1,62            |

Значения остальных коэффициентов и соответствующих им шагов крутого спуска даны в таблице 4.3. Там же представлены результаты первых двух этапов крутого спуска.

На первом этапе математическая модель линеаризована уравнением регрессии (4.16).

$$\hat{y} = -0,0474x_2 - 3,09 \cdot 10^{-5}x_3 - 1,58 \cdot 10^{-5}x_4 - 8,12 \cdot 10^{-5}x_6 \quad (4.16)$$

Как видно из результатов первого этапа – область оптимума не достигнута. Поэтому крутой спуск повторялся несколько раз с поэтапным уточнением направления градиента.

Таблица 4.3 - Первый этап крутого спуска по поверхности отклика.

| $x_j$         | $X_1$                               | $X_2$ , Вт.          | $X_3$ , м.           | $X_4$ , м.           | $X_5$  | $X_6$ , Тл           | $Y$ , кг |       |
|---------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|----------------------|----------|-------|
| $b_j$         | 0                                   | $4,74 \cdot 10^{-2}$ | $3,09 \cdot 10^{-5}$ | $1,58 \cdot 10^{-5}$ | 0      | $8,12 \cdot 10^{-5}$ | -        |       |
| $\lambda b_j$ | 0                                   | 2,37                 | $1,55 \cdot 10^{-3}$ | $0,79 \cdot 10^{-3}$ | 0      | $4,06 \cdot 10^{-3}$ | -        |       |
| № шага        | Крутой спуск по поверхности отклика |                      |                      |                      |        |                      |          |       |
| Первая серия  | 1.                                  | 2                    | 27,37                | 0,0285               | 0,0168 | 3                    | 0,454    | 1,858 |
|               | 2.                                  | 2                    | 29,74                | 0,0301               | 0,0176 | 3                    | 0,458    | 1,334 |
|               | 3.                                  | 2                    | 32,11                | 0,0316               | 0,0184 | 3                    | 0,462    | 1,240 |
|               | 4.                                  | 2                    | 34,48                | 0,0332               | 0,0192 | 3                    | 0,464    | 1,187 |
|               | 5.                                  | 2                    | 36,85                | 0,0347               | 0,0200 | 3                    | 0,470    | 1,138 |
|               | 6.                                  | 2                    | 39,22                | 0,0363               | 0,0208 | 3                    | 0,474    | 1,129 |
|               | 7.                                  | 2                    | 41,59                | 0,0378               | 0,0215 | 3                    | 0,478    | 1,112 |
|               | 8.                                  | 2                    | 42,22                | 0,0372               | 0,0215 | 3                    | 0,478    | 1,126 |
| Вторая серия  | 9.                                  | 2                    | 41,59                | 0,0378               | 0,0215 | 3                    | 0,478    | 1,112 |
|               | 10.                                 | 2                    | 43,48                | 0,0361               | 0,0214 | 3                    | 0,478    | 1,100 |
|               | 11.                                 | 2                    | 44,10                | 0,0356               | 0,0213 | 3                    | 0,477    | 1,086 |
|               | 12.                                 | 2                    | 44,73                | 0,0350               | 0,0213 | 3                    | 0,477    | 1,073 |
|               | 13.                                 | 2                    | 45,36                | 0,0344               | 0,0212 | 3                    | 0,477    | 1,060 |
|               | 14.                                 | 2                    | 45,99                | 0,339                | 0,0212 | 3                    | 0,476    | 1,051 |
|               | 15.                                 | 2                    | 46,62                | 0,0333               | 0,0211 | 3                    | 0,476    | 1,035 |
|               | 16.                                 | 2                    | 47,25                | 0,0328               | 0,0211 | 3                    | 0,476    | 1,023 |
|               | 17.                                 | 2                    | 47,88                | 0,0322               | 0,0211 | 3                    | 0,475    | 1,013 |
|               | 18.                                 | 2                    | 49,50                | 0,0317               | 0,0210 | 3                    | 0,475    | 1,001 |
|               | 19.                                 | 2                    | 49,13                | 0,0311               | 0,0210 | 3                    | 0,475    | 0,99  |
|               | 20.                                 | 2                    | 49,76                | 0,0305               | 0,0203 | 3                    | 0,474    | 0,98  |
|               | 21.                                 | 2                    | 50,39                | 0,0300               | 0,0209 | 3                    | 0,474    | 0,97  |
|               | 22.                                 | 2                    | 51,02                | 0,0294               | 0,0208 | 3                    | 0,474    | 0,94  |
|               | 23.                                 | 2                    | 51,65                | 0,0289               | 0,0208 | 3                    | 0,473    | 0,93  |

Результаты оптимизационного расчета были использованы при создании опытных партий моментных двигателей МД-100-1 с номинальным моментом 1 Нм, и двигателей МД-6 с номинальным моментом 6 Нм, изготовленных на опытном производстве ЦКБ «Фотон» г. Казань.

На иллюстрации (рис.4.3) приведены фотографии разработанных моментных двигателей с номинальными моментами 1 Нм (МД-100-1), 6 Нм (МД-6) и 10 Нм (МД-10 – макетный образец). Основные технические параметры двигателей представлены в сравнении с серийными двигателями ДБМ (Россия) и серии Т (США) в таблицах 4.4 и 4.5.

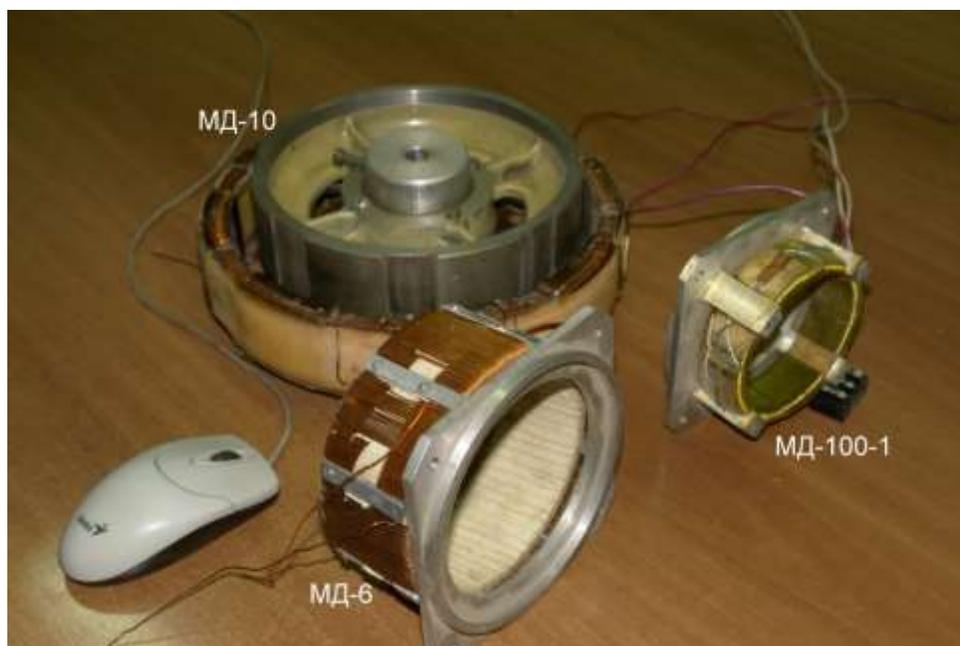


Рисунок 4.3 – Моментные двигатели с ограниченным углом поворота ротора и гладким статором.

На рисунке 4.4 представлены сравнительные габариты двигателя МД-100-1 и серийного аналога ДБМ-120-1. Отметим, что наружный диаметр статора в разработанном двигателе снижен до 100 мм, по сравнению со 120 мм у аналога.



Рисунок 4.4 – Сравнительные габариты двигателя ДБМ 120-1 и МД-100-1

Общий вид двигателя МД-100-1 приведен на фото (рис.4.5). Техническим заданием было определено дополнительное требование к моментной характеристике двигателя: кроме обеспечения стабильного момента в пределах рабочего угла поворота ротора  $\alpha = \pm 5^\circ$ , двигатель должен обеспечивать при пониженном моменте 0,2 Нм поворот ротора на  $45^\circ$ . Для этого в МД-100-1 применена дополнительная обмотка, обозначенная позицией 2 на рис.4.5.

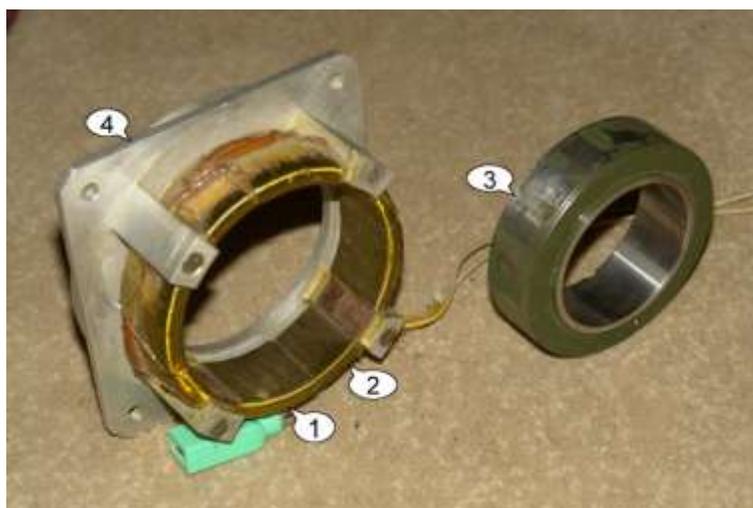


Рисунок 4.5 – Общий вид двигателя МД-100-1.

1- рабочая обмотка, 2 – дополнительная обмотка, 3 – ротор, 4 – корпус.

Таблица 4.4 - Основные параметры разрабатываемых двигателей МД-100-1 и их серийных аналогов.

| №  | Тип<br>Параметр  | ДБМ 120-1-0,8<br>ОАО «Машиноаппарат», Россия | ДБМ 105-0,6-1<br>ОАО «Машиноаппарат», Россия | T-2955,<br>Inland Motor,<br>США | T-130-0,85,<br>Magnetic Technology,<br>США | МД100-1,<br>ЦКБ «Фотон»,<br>СамГТУ,<br>Россия |
|----|--|--|--|---------------------------------|--|---|
| 1  | Тип статора  | Пазовый                                      | Беспазовый                                   | Пазовый                         | Беспазовый                                 | Беспазовый                                    |
| 2  | Рабочий угол поворота ротора   | Не ограничен                                 | Не ограничен                                 | Не ограничен                    | Не ограничен                               | ±5°   |
| 3  | Дополнительный угол поворота ротора  | -  | -  | -                               | -  | 45°   |
| 4  | Номинальный момент, Нм   | 1,0  | 0,6  | 1,15                            | 0,85                                       | 1,0   |
| 5  | Потребляемая мощность, Вт  | 108  | 112  | 77                              | 105  | 47,1  |
| 6  | Масса двигателя, кг  | 1,3  | 1,32   | 0,68                            | 0,66                                       | 0,9   |
| 7  | Нестабильность вращающего момента, в % от номинального   | 10   | 5  | 5                               | 5  | 2,34  |
| 8  | Нелинейность зависимости статического момента от тока, %   | 7,5  | 5  | нет данных                      | нет данных                                 | 2,5   |
| 9  | Время работы в пусковом режиме до достижения максимального допустимого перегрева обмотки без дополнительного теплоотвода, мин. | 30   | 12   | 10                              | 10   | не ограничено                                 |
| 10 | Масса магнитов, кг   | 0,20   | 0,32   | нет данных                      | нет данных                                 | 0,15  |
| 11 | Электромагнитная постоянная, мс  | 0,6  | 0,17   | 1,6                             | 0,3  | 0,135   |

Таблица 4.5 - Основные параметры разрабатываемого двигателя МД-6 и их серийных аналогов.

| №  | Тип<br>Параметр  | ДБМ 185-6-0,2-2<br>ОАО «Машиноаппарат», Россия | T-5003,<br>Inland Motor,<br>США | МД-6,<br>ЦКБ «Фотон»,<br>СамГТУ, Россия |
|----|--|--|---------------------------------|---|
| 1  | Тип статора  | Пазовый  | Пазовый                         | Беспазовый                              |
| 2  | Рабочий угол поворота ротора   | Не ограничен                                   | Не ограничен                    | $\pm 5^\circ$                           |
| 3  | Дополнительный угол поворота ротора  | -  | -                               | -                                       |
| 4  | Номинальный момент, Нм   | 6,0  | 8,2                             | 6,0                                     |
| 5  | Потребляемая мощность, Вт  | 280  | 450                             | 160                                     |
| 6  | Масса двигателя, кг  | 5,4  | 2,57                            | 1,8                                     |
| 7  | Нестабильность вращающего момента, в % от номинального   | 10   | 7                               | 5                                       |
| 8  | Нелинейность зависимости статического момента от тока, %   | 7,5  | нет данных                      | 3,0                                     |
| 9  | Время работы в пусковом режиме до достижения максимального допустимого перегрева обмотки без дополнительного теплоотвода, мин. | 15   | нет данных                      | не ограничено                           |
| 10 | Масса магнитов, кг   | 0,8  | нет данных                      | 0,62                                    |
| 11 | Электромагнитная постоянная  | 2,0  | 0,83                            | 1,2                                     |

В таблицах приведены параметры двигателей МД, спроектированных в результате детального уточненного расчета, включая расчет магнитных полей, изложенный в главе 2 настоящей работы, и основные параметры аналогов –

ближайших по номинальному моменту двигателей отечественной серии ДБМ и двигателей производства компаний Inland Motor и Magnetic Technology (США).

#### 4.4 Экспериментальные исследования статических и динамических характеристик двигателей МД

Для экспериментального исследования параметров МД был создан специальный стенд, принципиальная схема которого представлена на рисунке 4.6

На схеме обозначены:

- 1 статор МД;
- 2 ротор МД;
- 3 рычаг;
- 4 противовес;
- 5 шкала для измерения угла поворота;
- 6 тензометрический датчик;
- 7 стабилизированный источник питания;
- 8 преобразователь;
- 9 регистрирующий прибор;
- 10 источник тока для МД.

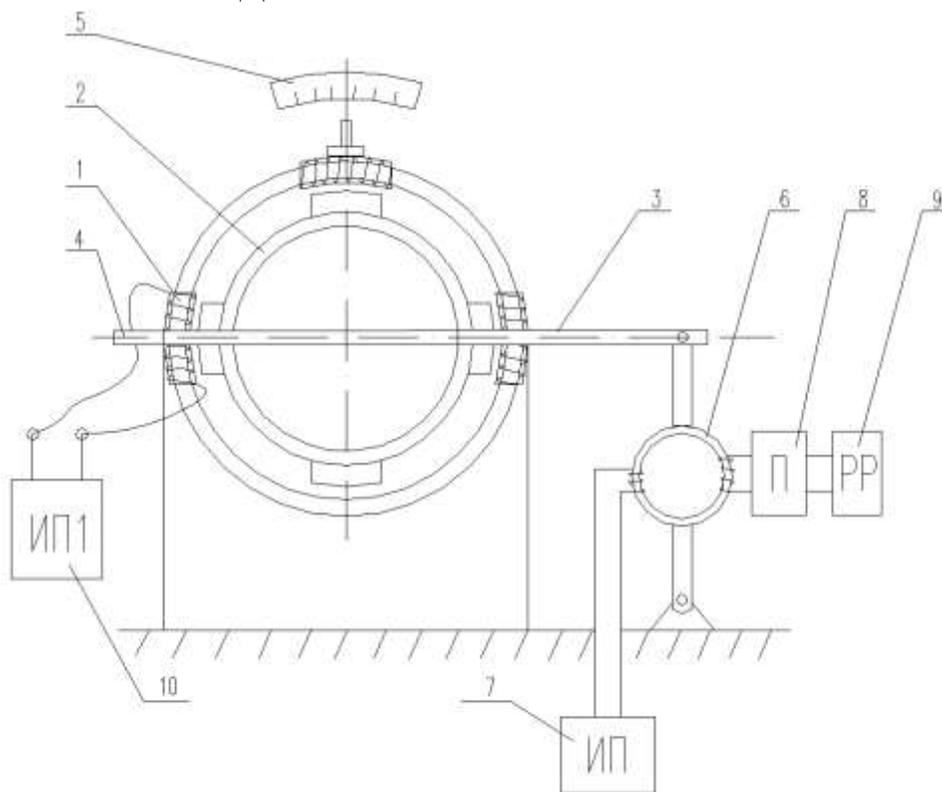


Рисунок 4.6 – Установка для исследования характеристик МД.

Установка работает следующим образом:

Статор МД имеет возможность поворачиваться на заданный угол и фиксироваться. Ротор заторможен рычагом 3, шарнирно соединенным с тензометрическим стальным кольцом 6, на котором закреплены датчики деформаций. Угол между рычагом и штоком датчика постоянно равен  $90^\circ$ . Питание датчиков осуществляется от стабилизированного источника тока. Сигнал с датчиков пропорционален деформациям стального кольца (весьма малым), а, следовательно, усилию  $F$  и моменту двигателя.  $M = F \cdot d$ , Нм, где  $d$  – плечо рычага.

Сигнал с датчиков усиливается преобразователем 8 и регистрируется прибором 9, отградуированным в Нм. Класс точности установки и по углу, и по моменту – 0,2. Установка реверсивная.

На рисунке 4.7 представлены экспериментальные графики зависимости момента от угла поворота при разных уровнях тока обмотки статора. Для того чтобы исключить погрешность момента от изменения сопротивления обмотки от теплового фактора, питание МД осуществлялось от стабилизированного источника постоянного тока ИП 1.

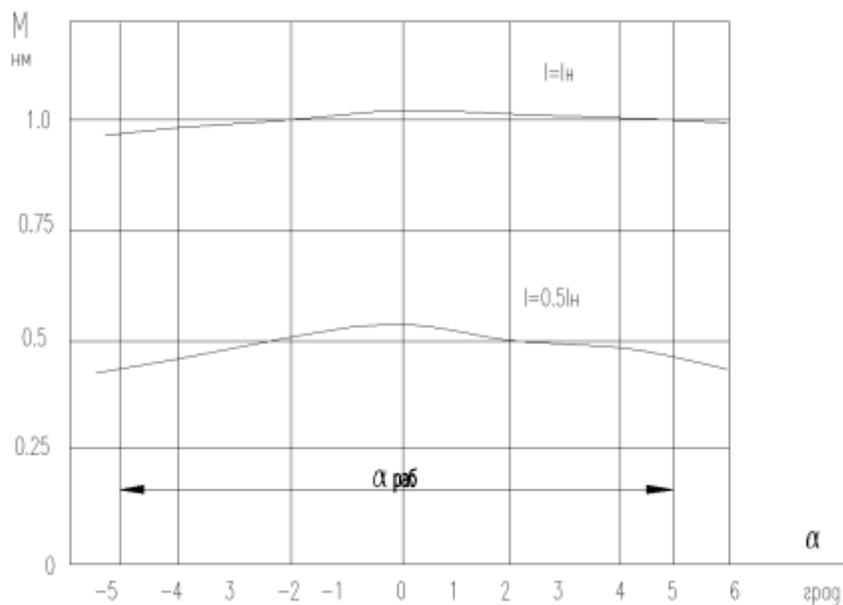


Рисунок 4.7 – Зависимость момента от угла поворота (эксперимент) МД-100-1.

Отклонение момента от номинального в ту и другую сторону не превысили 1%. Суммарная нестабильность момента в рабочем диапазоне  $\pm 5^\circ$  не превысила 2%. По этому показателю представленный двигатель превосходит двигатели ДБМ с пазовой конструкцией более чем в 5 раз, а с беспазовой – в 2,5 раза (рис. 4.8).

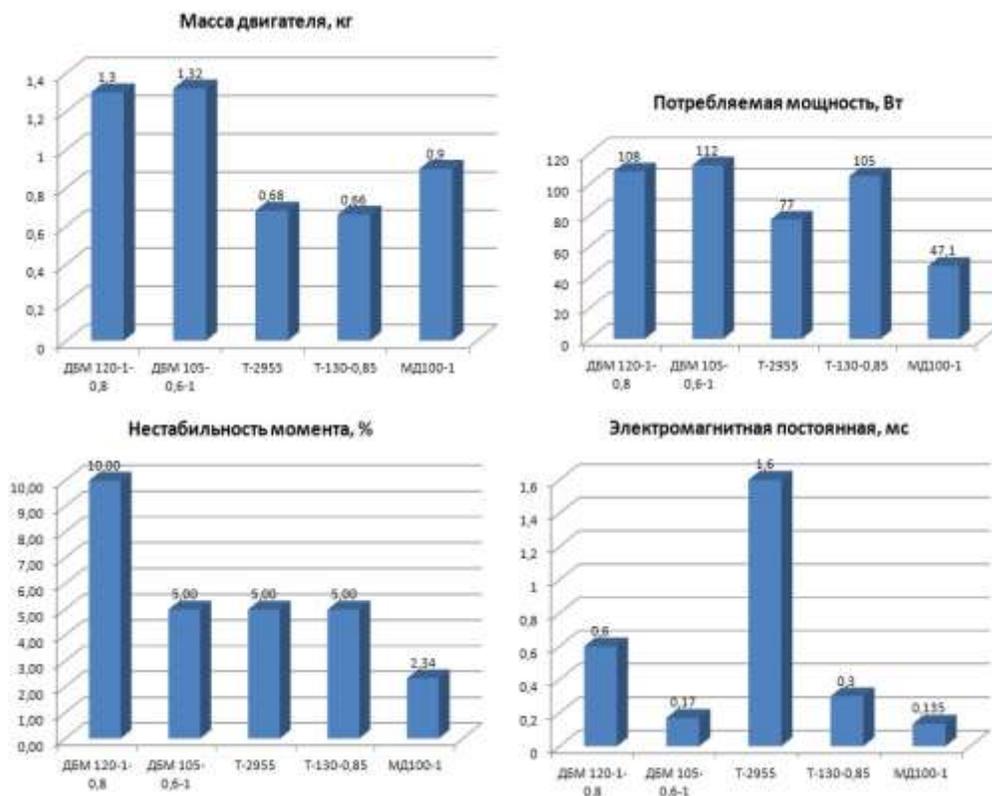


Рисунок 4.8 – Сравнительные диаграммы параметров двигателя МД-100-1 и ближайших аналогов.

Токовая характеристика момента имеет нелинейность не более 2,5% (рис. 4.9), что также значительно лучший показатель, чем у аналогов. Ток трогания  $I_{tr}=0,06...0,1$  А обусловлен не столько гистерезисным моментом двигателя, сколько трением в подшипниках установки. Так как у двигателя нет собственных подшипников, то на реальном объекте он также будет определяться в основном моментом трения в подшипниковом узле.

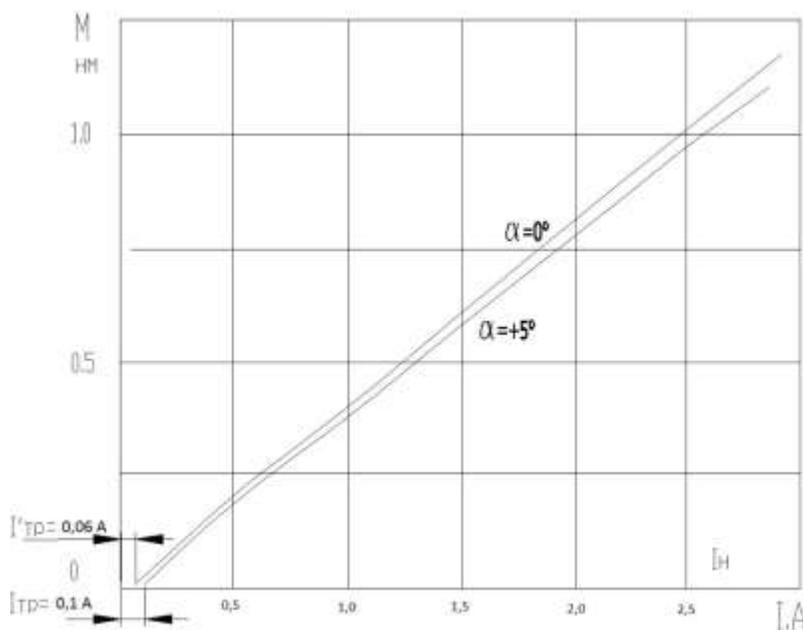


Рисунок 4.9 – Зависимость момента от тока в обмотке статора МД-100-1 (эксперимент).

Для двигателей МД с возбуждением от самарий-кобальтовых магнитов единственным ограничением по перегрузочной способности является тепловой фактор. Поэтому были рассчитаны, и определены экспериментально кривые нагрева и охлаждения двигателя, приведенные на рис. 4.10.

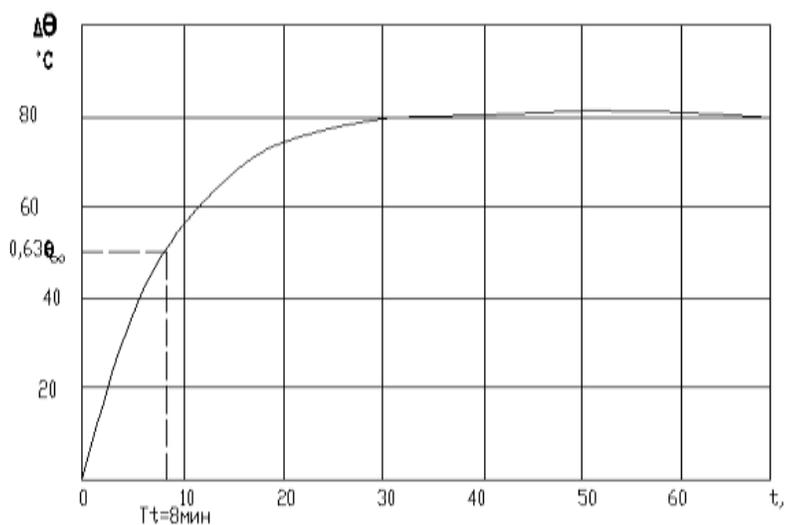


Рисунок 4.10 –Кривая нагрева двигателя МД-100-1 при  $M=1$  Нм,  $U=U_n$ . (Без обдува).

По этим кривым были определены тепловые постоянные времени для режима отдачи тепла в неподвижный воздух (режим без обдува). Температура обмотки определялась интегрально методом сопротивлений.

Из динамических характеристик экспериментально [85] двумя способами определялась электромагнитная постоянная времени  $T_{эм}$ . В первом случае при частотах 0,4...1,0 кГц измерялось индуктивное сопротивление обмотки и рассчитывалась электромагнитная постоянная

$$T_{эм} = \frac{X_L}{\omega R}; \text{ мс,}$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление обмотки, Ом;

$\omega$  – угловая частота, рад/с.

Во втором способе – осциллографировался процесс нарастания тока в обмотке МД при заторможенном роторе.

Значения электромагнитной постоянной, полученные расчетом и экспериментально приведены в табл. 4.6

Таблица 4.6 - Электромагнитная постоянная.

| Тип двигателя | Расчет   | Метод индуктивности | Осциллографирование |
|---------------|----------|---------------------|---------------------|
| МД 100-1      | 0,135 мс | 0,15 мс             | 0,12 мс             |
| МД-6          | 0,35 мс  | 0,4 мс              | 0,4 мс              |

Сравнение основных параметров двигателя МД-100-1 и ближайших аналогов приведены в виде диаграмм на рис.4.8.

## 4.5. Выводы

1. Исходя из требований, предъявляемых к МД с ограниченным углом поворота ротора и анализируя рельеф поверхностей отклика по различным параметрам можно утверждать, что для оптимизации МД целесообразно использовать методы направленного поиска, в частности, метод наискорейшего спуска

Бокса-Уилсона дополненный штрафными экспоненциальными функциями в зонах ограничений. В качестве инструмента для определения оценок градиента автором предлагается использовать методику факторного эксперимента (дробные четверть-реплики).

2. Область оптимума достигается за несколько итерационных циклов, независимо от выбора исходной точки, что говорит о высокой вероятности достижения глобального экстремума. Метод работоспособен при дискретном изменении числа слоев обмотки и числа пар полюсов.

3. В результате оптимизации получены варианты расчета, на основе которых были спроектированы двигатели МД–100–1 и МД-6, имеющие характеристики по основным параметрам, превосходящие ближайшие аналоги. В частности – по массе, массе магнитов и потребляемой мощности двигателя МД имеют лучшие показатели, чем серийные ДБМ.

4. Экспериментальная проверка характеристик опытной партии двигателей доказала корректность принятых допущений и адекватность математической модели в целом. Испытания подтвердили высокую стабильность момента в пределах рабочего угла поворота ротора ( $\varepsilon_\alpha < 2,0\%$ ,  $\varepsilon_i < 2,5\%$ ) и высокое быстродействие ( $T_{эм} = 0,135$  мс).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача улучшения энергетических, массогабаритных и точностных показателей моментных электродвигателей с постоянными магнитами и ограниченным углом поворота ротора для автономных объектов на основе разработки их математических моделей и выработки рекомендаций по определению конструктивных параметров.

В ходе решения поставленной задачи в диссертационной работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Проведенный анализ современного состояния моментных двигателей в составе систем силовых электроприводов и перспектив их развития показал, что явнополюсная конструкция с радиальными магнитами и кольцевой беспазовой обмоткой статора для использования в двигателях с ограниченным углом поворота ротора является наиболее перспективной с точки зрения получения стабильной моментной характеристики, высоких значений быстродействия и массогабаритных показателей.
2. Разработаны математические модели моментных электродвигателей с ограниченным углом поворота ротора, кольцевой обмоткой статора и магнитоэлектрическим возбуждением, отличающиеся тем, что в них за счет совмещения численного моделирования электромагнитного поля и расчетов нелинейных цепей с сосредоточенными параметрами, уточнено влияние потоков рассеяния магнитов, насыщение магнитопровода и угла поворота ротора в процессе работы на характеристики двигателей.
3. Впервые разработан комплексный метод расчета полей рассеяния постоянных магнитов моментных двигателей, основанный на аналитических зависимостях и дополненный проверкой численными методами моделирования магнитного поля.
4. Разработаны алгоритм и программа оптимизационного расчета моментных двигателей, основанные на методе Бокса-Уилсона

усовершенствованном аппаратом штрафных функций, учитывающие многокритериальность задачи, нелинейность и дискретность параметров для заданных ограничений и критериев оптимизации.

5. Спроектированные на основе разработанной автором методики оптимизационного расчета и изготовленные на опытном производстве ЦКБ «Фотон» двигатели МД-100-1 и МД-6 имеют по ряду показателей лучшие значения, чем двигатели-аналоги отечественного и зарубежного производства. Так двигатель МД-100-1 имеет массу на 30,1% ниже, чем серийный ДБМ-120-1, при этом его потребляемая мощность снижена на 56%, а электромагнитная постоянная ( $T_{эм}=0,135$  мс) находится на одном уровне с другим аналогом – беспазовым ДБМ-105-0,6 ( $T_{эм}=0,17$  мс), лучшим по быстродействию в этой серии машин.
6. Испытания созданных образцов моментных двигателей подтвердили справедливость теоретических положений расчета и адекватность предложенных математических моделей.

Новизна технических решений защищена авторским свидетельством на изобретение № 1810962 – Моментный двигатель постоянного тока с ограниченным углом поворота и патентом РФ на изобретение RU №22451943 С2.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аветисян Д.А. Соколов В.С., Хан В.Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. – М.: Энергия, 1976. – 208с.
2. Адлер Ю.П. Маркова Е.В. Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279с.
3. Азов А.К., Угаров С.В., Щербаков В.Н. Управление бесконтактными моментными двигателями постоянного тока в следящих системах и пути миниатюризации усилителей коммутаторов. JL: ЦНИИ "Румб", 1982. - 84с.
4. Андреев А.Н., Лемешкин П.М., Макаричев Ю.А., Овсянников В.Н. Особенности технологии обмоточных структур беспазовых электрических машин. Тезисы докладов V111 Всесоюзной научно-технической конференции «Новые технологические процессы и оборудование для производства электрических машин малой мощности». –Тбилиси, 1987 г. С. 39-40.
5. Андреев А.Н., Овсянников В.Н., Лютахин Ю.И. Математическая модель моментного электродвигателя с постоянными магнитами. Тезисы докладов Первой Всесоюзной школы-конференции «Математическое моделирование в машиностроении», 6-15 октября 1990 г., -г. Куйбышев, 1990 г. С. 2-3.
6. Андриенко П.Д., Жуловян В.В. Электроприводы с двигателями с электромагнитной редукцией. // Электротехника. 1991. №11. с.23-25.
7. Аоки М. Введение в методы оптимизации: пер. с англ. / под ред. Б.Т. Поляка. – М: Наука,1971.
8. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. –248с.
9. Афанасьев А.Ю, Комлев Ю.Ю. Расчет магнитного поля в моментном двигателе с использованием сплайн-функций // Электрооборудование летательных аппаратов. Казань, Изд-во КАИ, 1983. С. 33-37.
10. Афанасьев А.Ю, Сурай В.И. Расчет магнитного поля в моментном двига-

теле с постоянными магнитами методом эквивалентных зарядов // Электрооборудование летательных аппаратов. Казань, Изд-во КАИ, 1980. С. 8-12.

11. Афанасьев А.Ю. Столов Л.И. О свойствах моментных двигателей в системах автоматического управления летательных аппаратов. Казань, изд-во КАИ, 1980. С. 3-7.

12. Афанасьев А.Ю., Новиков В.А. Проектирование серий оптимальных моментных двигателей постоянного тока // Изв. Вузов. Электромеханика. 1979. №2. С. 119-125.

13. Афонин А. А., Гребеников В. В. Инновационные технологии электрических машин с постоянными магнитами и двухсторонним возбуждением магнитного поля. // Доповіді Академії Наук України – 2008 №4 ст. 87-93

14. Афонин А. А., Гребеников В. В. Исследование беспазовых электрических машин с постоянными магнитами. // Доповіді Академії Наук України – 2009 № 5 ст.99-104.

15. Байрамкулов К.Н., Астахов В.И. Расчет магнитного поля в среде с неоднородными анизотропными свойствами на основе электрической цепи Кирхгофа / Изв. Вузов Электромеханика, № 1, 2010, - С. 3 – 11.

16. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лезенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами М.: Энергия, 1975.

17. Бахвалов Ю.А., Мессуак А.С. Математическое моделирование магнитного поля беспазовой синхронной машины с постоянными магнитами / Изв. Вузов Электромеханика, № 5, 2011, - С. 20 – 25.

18. Беленький Ю.М. Зеленков Г.С. Микеров А.Г. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов, Л.: Энергия. 1983. – 26с.

19. Беленький Ю.М. и др. Состояние и проблемы внедрения бесконтактных моментных приводов на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами. В сб: Автоматизированный электропривод / Под ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова, - М.: Энергоатомиздат, 1986. – с.236-330.

20. Беленький Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г. Бесконтактный моментный привод (Технико-экономическая информация). " - Л.: ЛДНТП, Общество "Знание", 1990. -28 с.
21. Беленький Ю.М., Хоменко О.В., Шишкина Т.В. Исследование моментных двигателей с многополюсной магнитной системой ротора с тангенциально-радиальным намагничиванием // Электротехника. 1989. №10. - С.6-9.
22. Беллман Р. Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования: Пер. с англ./ под. Ред. А.А. Первозванского. – М.: наука 1965.
23. Бертинов А.И. Электрические машины авиационной автоматики. М.: Оборонгиз, 1961.
24. Беседин И.М., Грузков С.А., Михеев А.В. Определение факторов, повышающих точность моментного двигателя // Межвузовский сборник трудов. М.: Изд-во МЭИ, 1983, №9, с.64-69.
25. Бесконтактные моментные электродвигатели ДБМ. Справочник. Москва, ПП «Чертановская типография» Мосгорпечать, 1992.
26. Беспалов В.Я. Электрические машины малой мощности, применяемые в схемах автоматики и управления (Обзор по каталожным данным США). М.: Информстандартэлектро, 1970.
27. Богданов Б.В., Балясникова А.Н., Синицин В.А. Усилительно – преобразовательное устройство для управления моментным двигателем постоянного тока. Рук. Деп. В Информэлектро, 101. ЭТ-85. Деп. 1985.
28. Богданов Б.В., Балясникова А.Н., Томасов В.С. Влияние формы моментной характеристики на динамические возможности моментных двигателей с ограниченным углом поворота. Л.: Рук. Дел. ГАСНТИ 45.29.38 №41 ЭТ – 84 Деп. 1984
29. Богданов Б.В., Балясникова А.Н., Томасов В.С. Характеристики моментных двигателей, управляемых от источника тока. Рук. Деп. В информэлектро Р.Г. 45.29.29. Деп. 1983.

30. Богданов В.В., Балясникова А.Н., Томасов В.С. Анализ динамических возможностей моментных двигателей с ограниченным углом поворота. Л.: Рук деп. ГАСНТИ 35.29.38. №40 ЭТ – 84 Деп. 1984.
31. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления, М.: Наука, 1976.
32. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. – М.: Наука, 1976.
33. Булыжёв Е.М., Меньшов Е.Н. Математическое моделирование поля постоянного магнита / Электричество, № 9, 2010, - с. 65 – 69.
34. Веников В.А. Теория подобия и моделирование. М.: Высшая школа, 1976.
35. Воронин С.Г., Курносков Д.А., Шабуров П.О. Обеспечение стабильности электромагнитного момента вентильного двигателя на основе синхронной машины с постоянными магнитами / Электричество, №6, 2013, - с. 46 – 50.
36. Гомельский Ю.С. Электрические элементы гидравлических устройств М.: Энергия, 1968.
37. Горячев О.В., Минчук С.В. Математическая модель тепловых процессов в моментных двигателях. / Электронный Журнал «Труды МАИ». Выпуск № 62. – 2012.
38. Гребеников В. В. Магнитные системы управляемых электрических машин с постоянными магнитами //Технічна Електродінаміка. Тем. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. –2006. – Ч. 2. – С. 57-60.
39. Гребеников В.В., Прыймак М. В. Моделирование магнитных полей в электромеханических преобразователях энергии с постоянными магнитами // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. - №3 (56). - Ч 2. - С. 70-73.
40. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами // Електротехніка та електроенергетика № 2, 2009. С. 57-60.

41. Гребенников В. В., Прыймак М. В. Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами и зубцово-пазовым статором. // Праці ІЕД НАНУ: Зб. наук. пр., 2010. – Вип. 27. – С. 52-58.
42. Гречихин В.В. Математическое моделирование плоскомеридианных магнитных полей в системах с постоянными магнитами. / Изв. Вузов Электромеханика, № 3, 2009, - С. 8 – 12.
43. Грузков С.А. Разработка и исследование моментного электродвигателя на базе микромашины постоянного тока. Автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1982.
44. Демагин А.В. Электрические машины для непосредственного привода приборных систем. Л.: НПО "Азимут". 1991. - 80 с.
45. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
46. Епифанов О.К. Современный ряд высокомоментных двигателей для безредукторных следящих систем: результаты разработки и производства. //Электротехника. - 2005.-№2- С.36-48.
47. Епифанов О.К., Оськин А.Б. Определение теплового состояния бесконтактного моментного двигателя. / Сб. материалов 3-го международного-> симпозиума "Аэрокосмические приборные технологии". СПб.: - 2004. 1. С.159-163.
48. Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В. Анализ и расчет магнитной проводимости воздушного зазора в бесконтактных моментных двигателях модульного типа с электромагнитной редукцией частоты вращения. // Электрофорум. 2003. - №6 . - С.8-14.
49. Епифанов О.К., Смоликова М.В. Бесконтактный моментный двигатель постоянного тока модульного типа с электромагнитной редукцией частоты вращения для безредукторных систем // Гироскопия и навигация. 1997. - №1(16).-с. 34-41.
50. Ермохин Н.П. Расчет коллекторных машин малой мощности. – Л.: Энер-

гия, 1973 – 216с.

51. Жуков В.П. Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5ДБМ. / Жуков В.П., Нестерин В.А. // Электротехника. – 2000. - № 6. С. 19-21.

52. Захаренко А.Б. Создание высокомоментных электрических машин с постоянными магнитами. Автореф. дис. канд. техн. наук. М., 2008.

53. Зыков Б.Н. Магнитоэлектрический моментный двигатель с большим углом поворота ротора // Проектирование устройств электропитания и электропривода. М.: Энергия, 1973. С. 90-95.

54. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины.: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

55. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование.: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1969. – 304 с.

56. Каасик П.Ю. Магнитное поле и параметры электрических машин./ Учебное пособие. ЛЭТИ, 1981. - 68 с.

57. Калужский Д.Л. Электрические машины с дискретно-распределенными обмотками для низкоскоростных электроприводов // Электротехника. 1997. №9. С.10-13.

58. Копылов И.П., Клоков Б.К, Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин.: Уч.для вузов/ И.П. Копылов и др. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2002,-757

59. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. 1978. 832с.

60. Красовский А.Б., Бычков М.Г. Исследование пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе // Электричество. 2001. - №10. -С.33-43.

61. Лопухина Е.М., Семенчиков Г.А., Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. – М.: Высшая школа, 1980 – 208с.

62. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитов.

М.: Энергия, 1974.

63. Макаричев Ю.А., Андреев А.Н., Ю.А., Овсянников В.Н. Моментный двигатель с повышенными механическими характеристиками Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов», ч.2, -Каунас, 1988 г. С. 171

64. Макаричев Ю.А., Овсянников В.Н., Лемешкин П.М. Расчетно-экспериментальный метод определения деформаций обмоточного слоя гладкого якоря Сб. научных трудов «Электрические машины специального назначения». –Куйбышев, 1985 г. С. 126-133.

65. Михалев А.С., Миловзоров В.П. Следящие системы с бесконтактными двигателями постоянного тока. М.: Энергия, 1979. - 158 с.

66. Моментный двигатель постоянного тока с ограниченным углом поворота / Андреев А.Н., Лемешкин П.М., Макаричев Ю.А., Овсянников В.Н. А.с. 1810962 СССР МКИ Н 02 К 26/00. 10.10.1992. Бюл. № 15, 1993.

67. Николаев Р.П., Фадеев А.А., Маханько А.В. Выбор варианта и экспериментальные исследования прецизионного привода светового пучка // Электрооборудование летательных аппаратов. Казань, Изд-во КАИ, 1980. С.51-60.

68. Новиков В.А., Афанасьев А.Ю. Об оптимальном проектировании моментных двигателей постоянного тока / Электрооборудование летательных аппаратов. Казань. Изд-во КАИ, 1978.с. 12-15.

69. Овсянников В.Н. Выбор типа возбуждения моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора. Труды Всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: состояние, проблемы, перспективы", ФГБОУ ВПО «ОГТУ». - Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2012.с.254 – 258.

70. Овсянников В.Н. Оптимизация моментного электродвигателя для систем стабилизации подвижных транспортных объектов. Вестник транспорта Поволжья. №6 (42) – 2013. –СамГУПС. С.20-25

71. Овсянников В.Н. Параметры математической модели моментного двига-

- теля с постоянными магнитами «Состояние и перспективы развития электро-технологии» (XV11 Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции. 3 том Электротехника. Иваново, 2013 г. с. 96-99
72. Овсянников В.Н., Андреев А.Н., Лемешкин П.М. Математическая модель моментного двигателя с высококоэрцитивными постоянными магнитами Тезисы докладов 2-й научно-технической конференции «Устройства и системы автоматизации автономных объектов», 30 мая-1 июня 1990 г.,-Красноярск. С. 25.
73. Овсянников В.Н., Лемешкин П.М., Андреев А.Н. Исполнительный моментный электродвигатель Тезисы докладов краевой научно-технической конференции «Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления» 4-5 октября 1988 г., -Красноярск, 1988 г. С.93.
74. Овсянников В.Н., Макаричев Ю.А. Метод расчета коэффициента рассеяния беспазового моментного двигателя с постоянными магнитами Изв. Вузов Электромеханика, № 6, 2007, - С. 38-41
75. Овсянников В.Н., Макаричев Ю.А., Анисимов В.М. Особенности проектирования моментных двигателей систем энергосбережения трубопроводного транспорта Изв. Вузов Электромеханика, № 3, 2011, - С. 54-56
76. Овсянников В.Н., Мифтахов М.Т., Минеев С.М. Математическое моделирование магнитного поля в беспазовом моментном двигателе с высококоэрцитивными постоянными магнитами Труды двенадцатой межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи», 29-31 мая 2002 г., Самара, 2002. – Часть 2. С. – 104 - 107
77. Овсянников В.Н., Обоснование выбора типа обмотки моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора "Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии». IV Международная научно-техническая конференция. Сб. трудов в 2 частях: Тольятти. ТГУ - 2012. Часть 1. с. 103-107. ISBN 978-5-8259-0666-9
78. ОСТВ 16.0.513.053 – 86 Датчики положения ротора серии ВТ.

79. ОСТВ 16.0.515.076 – 85 Моментные двигатели серии ДМБ – 40.
80. ОСТВ 16.0.515.083 – 86 Моментные двигатели серии ДМБ 120 – 185.
81. Оськин А.Б. Разработка методик расчета моментного двигателя с постоянными магнитами и электромагнитной редукицией. Автореф. дис. канд. техн. наук. С. Пб., 2005.
82. Патент RU № 2074486 С1, МПК H02K26/00. Оpubл. 27.02.1997. Поляризованный моментный электродвигатель / Лотоцкий В.Л., Лотоцкий С.В.
83. Патент RU № 2285322 С1, МПК H02K21/00. Оpubл. 10.10.2006. Бесконтактный моментный электродвигатель / Епифанов О.К.
84. Патент RU № 2378755 С1, МПК H02K26/00. Оpubл. 10.01.2010. Моментный двигатель / Мартемьянов В.М., Плотников И.А., Горячок Е.А., Квадьева А.В.
85. Патент на изобретение RU № 2451943 С2, МПК G01R 31/06. Оpubл. 27.05.2012. Бюл. № 15 Способ диагностирования электрических цепей, содержащих активное сопротивление и индуктивность / Абакумов А.М., Овсянников В.Н., Петин О.В., Харымова Е.Ю.
86. Пашковский А.В., Ткачев А.Н. Блочный численно-аналитический метод вспомогательных функций для расчета магнитного поля в нелинейных средах / Изв. Вузов Электромеханика, № 3, 2013, - С. 3 – 7.
87. Приступ А.Г., Топорков Д.М. Исследование способов уменьшения пульсаций момента в магнитоэлектрических синхронных машинах с дробными зубовыми обмотками / Изв. Вузов Электромеханика, № 6, 2013, - С. 14 – 17.
88. Проектирование электрических машин. Под ред. Гольдберга О.Д., 2-е изд. М.: Высш. шк., 2001, -430
89. Соболев И.М. Стадишев Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 108с.
90. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 224с.

91. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю., Новиков В.А. Оптимальное проектирование электрических машин с использованием аналитических моделей // Электрооборудование летательных аппаратов. Казань, Изд-во КАИ, 1979. С. 3-7.
92. Столов Л.И., Зыков Б.Н. Моментные двигатели с постоянными магнитами – М.: Энергия, 1977 – 112с.
93. Столов Л.И., Зыков Б.Н., Афанасьев А.Ю., Галеев Ш.С. Авиационные моментные двигатели. М.: Машиностроение, 1979.
94. Тамм И.Е. Основы электричества: учеб. пособие для вузов. 10-е изд., - М. // Наука. 1989. – 504 с.
95. Терзян А.А. Алгоритмы принятия решений в электромеханике. / Изв. Вузов Электромеханика, № 2, 2009, - С. 18 – 27.
96. Терзян А.А., Сукиасян Г.С. Численные методы решения задач электромагнитного поля / Изв. Вузов Электромеханика, № 6, 2010, - С. 3 – 14.
97. Токарев Б.Ф., Волков Б.С. Расчет основных размеров тихоходных моментных электродвигателей постоянного тока встраиваемой конструкции с магнитоэлектрическим возбуждением / Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. 1982., Вып. 4 (134).
98. Толмачев В.А., Демидова Г.Л. Математические модели и динамические характеристики электромеханических преобразователей с ограниченным углом поворота. / Известия Вузов Приборостроение. 2008. - № 6 (51). – с. 18-23.
99. Уайлд Д.Дж. Методы поиска экстремума: Пер. с англ. / Под ред. А.А. Фельбаума. – М.: Наука, 1967.
100. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: наука, 1971.
101. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. - С.Пб.: БХВ – Петербург, 2005. – 416 с.
102. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. Пер. с нем. - Л.: Энергия. 1968, - 732 с.
103. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. – М.:

Высшая школа, 1976. – 416 с.

104. Aeroflex Laboratories Inc. Torque motors // Electromechanical Design. 1967. Vol. 11, № 10. P. 40.

105. Box G. Problems in the analysis of growth. N-Y, - 1936, p.376

106. Direct Drive Torque motors // Electromechanical Design. 1970. Vol. 14, № 7. P. 16-17.

107. ELCUT. Комплект программ моделирования двухмерных полей методом конечных элементов. Версия 4.2 /Руководство пользователя. СПб.: НПКт "Тор".- 2000. 130 с.

108. Harrington E.C. Industry. Quality Control, 1965, 21№ 10.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

**Пример расчета коэффициента рассеяния на основе аналитического метода.**

Исходные данные:

Размеры магнита:

Длина  $l_m = 27 \cdot 10^{-3}$  м;

Ширина  $b_m = 24 \cdot 10^{-3}$  м;

Высота  $h_m = 8 \cdot 10^{-3}$  м.

Число полюсов  $2p = 4$

Индукция в зазоре  $B_\delta = 0,425$  Тл

Длина немагнитного зазора  $\delta = 3,3 \cdot 10^{-3}$  м

Магнитный поток одного полюса двигателя  $\Phi_\delta = 2,75 \cdot 10^{-4}$  Вб

Н.С. магнита

$$F_m = 0,8 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot 10^6, \text{ А}$$

$$F_m = 0,8 \cdot 0,425 \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 1122 \text{ А}$$

Поток рассеяния с одной боковой грани одного магнита

$$\Phi_{\sigma 1} = \frac{2}{\pi} \mu_0 F_m l_m$$

$$\Phi_{\sigma 1} = \frac{2}{\pi} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1122 \cdot 27 \cdot 10^{-3} = 2,42 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб}$$

Поток рассеяния с одной торцевой грани одного магнита

$$\Phi_{\sigma 2} = \frac{1}{\pi} \mu_0 F_m b_m$$

$$\Phi_{\sigma 2} = \frac{1}{\pi} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1122 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 1,08 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб}$$

Поток рассеяния с одного ребра магнита

$$\Phi_{\sigma 2} = \frac{\mu_0}{8} F_m h_m$$

$$\Phi_{\sigma 3} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{8} \cdot 1122 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 1,41 \cdot 10^{-6}, \text{ Вб}$$

Суммарный поток рассеяния

$$\Phi_{\sigma} = 2\Phi_{\sigma 1} + 2\Phi_{\sigma 2} + 4\Phi_{\sigma 3}$$

$$\Phi_{\sigma} = 2 \cdot 2,42 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 1,08 \cdot 10^{-5} + 4 \cdot 1,41 \cdot 10^{-6} = 0,7564 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$$

Коэффициент рассеяния

$$K_{\sigma} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_{\delta}}$$

$$K_{\sigma} = 1 + \frac{0,756 \cdot 10^{-4}}{2,75 \cdot 10^{-4}} = 1,275$$

Значения коэффициентов рассеяния, полученных для этого варианта численным методом расчета магнитного поля (см. главу 2 и раздел 3.3.2.2.) составили соответственно для боковых граней, торцов и ребер магнитов:

$$\Phi_{\sigma 1} = 1,50 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб};$$

$$\Phi_{\sigma 2} = 0,97 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб};$$

$$\Phi_{\sigma 3} = 0,091 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб}.$$

Суммарный коэффициент рассеяния

$$K'_{\sigma} = 1 + \frac{(2\Phi_{\sigma 1} + 2\Phi_{\sigma 2} + 4\Phi_{\sigma 3})}{\Phi_{\delta}} = 1,193$$

Расхождение со значением, полученным аналитическим методом составило 6,5%.



```

ii = ii + 1
IF ii > 50 THEN PRINT ii: GOTO 9999
'
  w = INT(w + .5)
  ws = 2 * p * w
  d = m * bdu / p / b / bm / lm / i / w
  alf = aal + alfs
  bdug = bm + alf * d * pi / 180
  tau = pi * d / 2 / p
  IF bdug > (tau - .005) THEN 999
  IF ABS(bdug - bdu) > e THEN bdu = bdug: GOTO 2
  IF d > dmax1 THEN mm = 333: m1 = 333: GOTO 999
  d1 = bdug * nc / w / k1
  IF d1 < .00015 THEN PRINT "d1<.15": GOTO 999
  IF d1 > .0025 THEN PRINT "d1>2.5": GOTO 999
  e3 = 1
  WHILE d1 > v(e3)
    e3 = e3 + 1
  WEND
  c8 = ABS(d1 - v(e3))
  c9 = ABS(d1 - v(e3 - 1))
  IF c8 >= c9 THEN d1 = v(e3 - 1): d11 = v1(e3 - 1) ELSE d1 =
v(e3): d11 = v1(e3)
  q = pi / 4 * d1 ^ 2
  r = r0 * lw * w * 2 * p / q / a ^ 2
  bdug = d1 * w * k1 / nc
  i = m * bdug / p / w / bm / lm / b / d
  u = i * r
  hoc = nc * (d1 + d1i)
  del = hoc + db
  ks = 1
3 :   hm = 800000 * br * b * del * km / hcb / (br - b * ks)
      fd = 800000 * b * del
      f1 = 2 / pi * m0 * fd * lm
      f2 = 1 / pi * m0 * fd * bm
      f3 = m0 / 8 * fd * hm
      f4 = 4 * p * (f1 + f2 + f3)
      ks1 = 1 + f4 / f
      IF ABS(ks - ks1) > e1 THEN ks = ks1: GOTO 3
      j = i / q
      p01 = u * i
      a1 = w * q * j / bdug
      m = p * a1 * f * d
' PACЧЕТ ПАЗМЕРОВ
  dcv = d + 2 * del
  dcn = dcv + 2 * hc
  dmax = dcn + 2 * hoc
'
  IF dmax > dmax1 THEN mm = 111: m1 = 111: GOTO 999
  hcr = b * bm / 2 / bc
  drn = d - hm * 2
  'drn=(bm^2+4*d^2-14.4*d*hm+12.96*hm^2)/(4*d-7.2*hm)
  drv = drn - hcr
  l1 = lm + 2 * hoc
' PACЧЕТ МАССЫ ЭЛЕМЕНТОВ
  mr = pi * (drn + drv) / 2 * hcr * lm * gc
  mc = pi * (dcn + dcv) / 2 * hc * lm * gc * kzs
  mm = 2 * p * bm * lm * hm * gm
  mcu = 2 * p * w * lw * q * gcu * kep

```

```

      m1 = mr + mc + mm + mcu
'ИНДУКТИВНОСТЬ ОБМОТКИ И ТЭМ
      l = m0 * ws ^ 2 * lm * bdug / 12 / p / d / LOG(dcv / d)
      te = l / r
'ПОВЕРХНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ И ПЕРЕГРЕВ
      so = lw * bdug * 2 * p
      ss = (tau - bdug) * 4 * p * (lm + hc)
      s = so + ss
      dt = p0 / s / al
      IF dt > dtm THEN mm = 222: m1 = 222: GOTO 999
      IF c = 1 THEN 5
      PRINT : PRINT n: PRINT
      PRINT "b="; b, "p0="; p0, "p="; p
      PRINT "bm="; bm, "lm="; lm, "nc="; nc
      PRINT
      PRINT "hc="; hc, "lw="; lw, "f="; f, "i="; i
      PRINT "bdug="; bdug, "w="; w, "ws="; ws, "d="; d
      PRINT "alf="; alf, "tau="; tau, "d1="; d1, "d11="; d11
      PRINT "q="; q, "r="; r, "u="; u, "hoc="; hoc
      PRINT "del="; del, "hm="; hm, "fd="; fd, "f1="; f1
      PRINT "f2="; f2, "f3="; f3, "f4="; f4, "ks1="; ks1
      PRINT "j="; j, "p01="; p01, "a1="; a1, "m="; m
      PRINT "dcv="; dcv, "dcn="; dcn, "dmax="; dmax, "hcr="; hcr
      PRINT "drn="; drn, "drv="; drv, "mr="; mr, "mc="; mc
      PRINT "mm="; mm, "mku="; mku, "m1="; m1, "l="; l
      PRINT "te="; te, "so="; so, "ss="; ss, "s="; s, "dt="; dt
      PRINT : PRINT
      INPUT " ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ НАЖМИТЕ <CR>"; c$
5 :
      PRINT #2, n; p; p0; lm; bm; nc; b; m1; mm
'c=0 - ОТЛАДКА
      IF c = 0 THEN 999
      IF c1 = 0 THEN PRINT "МАССА МАШИНЫ ПРИ p="; p, "p0="; p0,
"lm="; lm, "bm="; bm: PRINT : PRINT
      IF c1 = 0 THEN PRINT "nc \ b      "; : FOR b1 = bmin TO bmax STEP
dbb: PRINT USING "#.##  "; b1; : NEXT b1: PRINT
      c1 = 1
      IF c2 = 0 THEN PRINT USING "##      "; nc;
      c2 = 1
      PRINT USING "##.##  "; m1;
999 :
      NEXT b
      PRINT
      IF c <> 0 THEN PRINT USING "##      "; nc;
      NEXT nc
      PRINT
      c1 = 0: c2 = 0
'      INPUT "ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ НАЖМИТЕ <CR>"; c$
6 :
      NEXT bm
      NEXT lm
      NEXT p0
      NEXT p
      CLOSE #2
9999 :
      END

```

**Массив результатов расчета массы двигателя  $m_1$  и суммарной массы магнитов  $m_m$  сетчатым методом**

**p** – число пар полюсов;  
**P0** – потребляемая мощность;  
**lm, bm** – длина и ширина магнита;  
**nc** – число слоев обмотки статора;  
**bd** – индукция в зазоре.

Коды обозначений:

111, 222 – недопустимый диаметр провода обмотки статора;  
 333 – недопустимое превышение наружного диаметра двигателя;  
 444 – недопустимое значение индукции, которое не может обеспечить магнит выбранной марки;  
 555 – нарушено условие размещения дуги обмотки статора;  
 777 – превышение допустимого перегрева обмотки статора.

| №  | p | P0   | lm    | bm    | nc | bd  | m1     | mm      |
|----|---|------|-------|-------|----|-----|--------|---------|
| 1  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4  | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 2  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4  | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 3  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4  | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 4  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4  | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 5  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4  | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 6  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4  | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 7  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4  | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 8  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4  | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 9  | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4  | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 10 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4  | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 11 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4  | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 12 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4  | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 13 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4  | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 14 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4  | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 15 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4  | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 16 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4  | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 17 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4  | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 18 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4  | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 19 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4  | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 20 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4  | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 21 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4  | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 22 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4  | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 23 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4  | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 24 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4  | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 25 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4  | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 26 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4  | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 27 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4  | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 28 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4  | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 29 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4  | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 30 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4  | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 31 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4  | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 32 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4  | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 33 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4  | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 34 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4  | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 35 | 1 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4  | ,45 | 444,00 | 444,000 |

|    |   |      |       |       |   |     |        |         |
|----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 36 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 37 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 38 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 39 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 40 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 41 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 42 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 43 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 44 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 45 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 46 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 47 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 48 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 49 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 50 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 51 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 52 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 53 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 54 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 55 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 56 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 57 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 58 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 59 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 60 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 61 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 62 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 63 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 64 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 65 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 66 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 67 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 444,00 | 444,000 |
| 68 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 69 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 70 | 1 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 71 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 72 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 73 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 74 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 75 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 76 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 77 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 78 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 79 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 80 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 81 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 82 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 83 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 84 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 85 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 86 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 87 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 88 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 89 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 90 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 91 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 92 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 93  | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 94  | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 95  | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 96  | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 97  | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 444,00 | 444,000 |
| 98  | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 99  | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 100 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 101 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 102 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 444,00 | 444,000 |
| 103 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 104 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 105 | 1 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 106 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 107 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 108 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 109 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 121 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 122 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 123 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 124 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 125 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 126 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 127 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 128 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 129 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 130 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 131 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 132 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 444,00 | 444,000 |
| 133 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 444,00 | 444,000 |
| 134 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 444,00 | 444,000 |
| 135 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 444,00 | 444,000 |
| 136 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 1,83   | 0,046   |
| 137 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 1,49   | 0,061   |
| 138 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 1,28   | 0,082   |
| 139 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 140 | 1 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 141 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 142 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 143 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 144 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 145 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 146 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 147 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 148 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 149 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 150 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 151 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 152 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 153 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 154 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 155 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 1,71   | 0,094   |
| 156 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 157 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 158 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 159 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 1,56   | 0,075   |
| 160 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 1,38   | 0,107   |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 161 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 162 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 1,83   | 0,048   |
| 163 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 1,52   | 0,064   |
| 164 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 165 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 166 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 167 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 1,58   | 0,056   |
| 168 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 169 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 170 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 171 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 1,71   | 0,046   |
| 172 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 1,42   | 0,063   |
| 173 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 174 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 175 | 1 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 176 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 177 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 178 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 179 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 180 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 181 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 182 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 183 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 184 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 185 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 186 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 187 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 188 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 189 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 190 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 1,60   | 0,094   |
| 191 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 192 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 193 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 1,72   | 0,056   |
| 194 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 1,47   | 0,076   |
| 195 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 196 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 197 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 1,71   | 0,048   |
| 198 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 199 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 200 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 201 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 1,84   | 0,042   |
| 202 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 1,49   | 0,056   |
| 203 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 204 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 205 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 206 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 1,63   | 0,048   |
| 207 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 208 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 209 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 210 | 1 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 211 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 212 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 213 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 214 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 215 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 216 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 217 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 218 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 230 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 231 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 232 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 1,64   | 0,050   |
| 233 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 234 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 235 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 236 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 1,73   | 0,042   |
| 237 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 238 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 239 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 240 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 241 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 242 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 243 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 244 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 245 | 1 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 246 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 247 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 248 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 249 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 250 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 251 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 252 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 253 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 254 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 255 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 256 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 257 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 258 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 259 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 1,64   | 0,067   |
| 260 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 261 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 262 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 263 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 264 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 265 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 266 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 267 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 268 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 269 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 270 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 271 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 272 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 273 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 274 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 275 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 276 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 277 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 278 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 279 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 280 | 1 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 281 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 282 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 283 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 284 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 285 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 286 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 287 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 288 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 289 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 290 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 291 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 292 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 293 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 294 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 1,80   | 0,139   |
| 295 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 1,60   | 0,200   |
| 296 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 297 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 1,97   | 0,085   |
| 298 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 1,69   | 0,117   |
| 299 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 1,47   | 0,158   |
| 300 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 1,36   | 0,227   |
| 301 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 2,07   | 0,075   |
| 302 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 1,69   | 0,100   |
| 303 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 1,44   | 0,132   |
| 304 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 1,30   | 0,181   |
| 305 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 1,20   | 0,247   |
| 306 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 1,83   | 0,087   |
| 307 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 1,51   | 0,115   |
| 308 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 1,31   | 0,151   |
| 309 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 1,21   | 0,206   |
| 310 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 311 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 1,62   | 0,095   |
| 312 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 1,40   | 0,130   |
| 313 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 1,23   | 0,170   |
| 314 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 315 | 2 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 316 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 317 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 318 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 319 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 320 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 321 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 322 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 323 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 324 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 325 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 1,93   | 0,186   |
| 326 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 327 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 333,00 | 0,137   |
| 339 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 340 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 341 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 1,68   | 0,087   |
| 342 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 1,39   | 0,115   |
| 343 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 344 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 345 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 346 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 1,53   | 0,099   |
| 347 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 1,29   | 0,130   |
| 348 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 349 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 350 | 2 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 351 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 352 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 353 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 354 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 355 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 356 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 357 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 358 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 359 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 360 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 1,76   | 0,186   |
| 361 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 362 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 363 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 1,76   | 0,102   |
| 364 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 1,52   | 0,141   |
| 365 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 1,35   | 0,197   |
| 366 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 367 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 1,69   | 0,088   |
| 368 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 1,43   | 0,118   |
| 369 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 370 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 371 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 1,75   | 0,075   |
| 372 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 1,48   | 0,104   |
| 373 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 374 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 375 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 376 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 1,56   | 0,087   |
| 377 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 378 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 379 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 380 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 381 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 1,43   | 0,099   |
| 382 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 383 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 384 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 385 | 2 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 386 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 387 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 388 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 389 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 390 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 391 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 392 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 393 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 394 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 1,87   | 0,124   |
| 395 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 1,67   | 0,198   |
| 396 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 397 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 1,96   | 0,076   |
| 398 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 1,63   | 0,103   |
| 399 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 1,41   | 0,139   |
| 400 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 401 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 1,94   | 0,066   |
| 402 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 1,58   | 0,089   |
| 403 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 404 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 405 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 406 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 1,67   | 0,078   |
| 407 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 408 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 409 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 410 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 411 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 1,49   | 0,091   |
| 412 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 413 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 414 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 415 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 416 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 417 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 418 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 419 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 420 | 2 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 421 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 422 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 423 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 424 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 425 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 426 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 427 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 428 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 429 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 1,74   | 0,124   |
| 430 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 1,56   | 0,198   |
| 431 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 432 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 1,83   | 0,076   |
| 433 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 1,53   | 0,103   |
| 434 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 435 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 436 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 448 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 449 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 450 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 451 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 452 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 453 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 454 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 455 | 2 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 456 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 457 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 458 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 459 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 460 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 461 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 462 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 463 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 1,93   | 0,088   |
| 464 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 1,67   | 0,131   |
| 465 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 466 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 467 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 1,71   | 0,076   |
| 468 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 469 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 470 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 471 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 1,70   | 0,066   |
| 472 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 473 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 474 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 475 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 476 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 477 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 478 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 479 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 480 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 481 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 482 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 483 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 484 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 485 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 486 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 487 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 488 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 489 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 490 | 2 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 491 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 492 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 493 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 494 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 495 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 496 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 497 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 498 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 1,85   | 0,093   |
| 499 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 500 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 501 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 2,02   | 0,057   |
| 502 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 503 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 504 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 505 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 506 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 507 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 508 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 509 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 510 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 511 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 512 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 513 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 514 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 515 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 516 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 517 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 518 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 519 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 520 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 521 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 522 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 523 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 524 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 525 | 2 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 526 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 527 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 528 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 529 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 530 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 2,06   | 0,312   |
| 531 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 532 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 533 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 534 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 535 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 536 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 1,91   | 0,057   |
| 537 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 538 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 539 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 540 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 541 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 542 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 543 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 544 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 545 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 557 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 558 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 559 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 560 | 2 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 561 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 562 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 563 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 564 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 565 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 566 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 567 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 568 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 569 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 1,95   | 0,186   |
| 570 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 1,80   | 0,298   |
| 571 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 572 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 2,04   | 0,114   |
| 573 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 1,72   | 0,155   |
| 574 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 1,57   | 0,222   |
| 575 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 1,42   | 0,309   |
| 576 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 2,03   | 0,099   |
| 577 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 1,67   | 0,133   |
| 578 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 1,48   | 0,184   |
| 579 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 580 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 581 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 1,78   | 0,117   |
| 582 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 583 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 584 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 585 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 586 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 587 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 588 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 589 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 590 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 591 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 592 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 593 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 594 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 595 | 3 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 596 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 597 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 598 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 599 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 600 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 333,00 | 333,000 |
| 601 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 602 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 603 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 2,06   | 0,132   |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 604 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 1,83   | 0,196   |
| 605 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 1,65   | 0,298   |
| 606 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 607 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 1,86   | 0,114   |
| 608 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 1,58   | 0,155   |
| 609 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 1,44   | 0,222   |
| 610 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 611 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 1,93   | 0,104   |
| 612 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 1,59   | 0,138   |
| 613 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 614 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 615 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 616 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 1,63   | 0,117   |
| 617 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 618 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 619 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 620 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 621 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 622 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 623 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 624 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 625 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 626 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 627 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 628 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 629 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 630 | 3 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 631 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 632 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 633 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 634 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 635 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 2,40   | 0,467   |
| 636 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 637 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 638 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 1,97   | 0,140   |
| 639 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 1,69   | 0,196   |
| 640 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 1,53   | 0,298   |
| 641 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 2,13   | 0,086   |
| 642 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 1,79   | 0,120   |
| 643 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 1,51   | 0,160   |
| 644 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 645 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 646 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 1,79   | 0,104   |
| 647 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 1,46   | 0,138   |
| 648 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 649 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 650 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 651 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 652 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 653 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 654 | 3 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,4  | 555,00 | 555,000 |
| 666 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 667 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 668 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 669 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 670 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 2,23   | 0,467   |
| 671 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 672 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 2,20   | 0,101   |
| 673 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 1,83   | 0,140   |
| 674 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 1,57   | 0,196   |
| 675 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 676 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 2,04   | 0,089   |
| 677 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 1,67   | 0,121   |
| 678 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 679 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 680 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 681 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 1,67   | 0,104   |
| 682 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 683 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 684 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 685 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 686 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 687 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 688 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 689 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 690 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 691 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 692 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 693 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 694 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 695 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 696 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 697 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 698 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 699 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 700 | 3 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 701 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 702 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 703 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 704 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 2,28   | 0,218   |
| 705 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 2,08   | 0,467   |
| 706 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 707 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 2,03   | 0,101   |
| 708 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 1,71   | 0,140   |
| 709 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 710 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 711 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 1,90   | 0,089   |
| 712 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 713 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 714 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 715 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 716 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 717 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 718 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 719 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 720 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 721 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 722 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 723 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 724 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 725 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 726 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 727 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 728 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 729 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 730 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 731 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 732 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 733 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 734 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 735 | 3 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 736 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 737 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 738 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 739 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 2,14   | 0,218   |
| 740 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 1,94   | 0,467   |
| 741 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 742 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 1,90   | 0,101   |
| 743 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 744 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 745 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 746 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 747 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 748 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 749 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 750 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 751 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 752 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 753 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 754 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 755 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 756 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 757 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 758 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 759 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 760 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 761 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 762 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 763 | 3 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 2,01   | 0,218   |
| 775 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 776 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 2,24   | 0,073   |
| 777 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 778 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 779 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 780 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 781 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 782 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 783 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 784 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 785 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 786 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 787 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 788 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 789 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 790 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 791 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 792 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 793 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 794 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 795 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 796 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 797 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 798 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 799 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 800 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 801 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 802 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 803 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 804 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 805 | 3 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 806 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 807 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 808 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 2,23   | 0,134   |
| 809 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 810 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 811 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 2,14   | 0,073   |
| 812 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 813 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 814 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 815 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 777,00 | 777,000 |
| 816 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 777,00 | 777,000 |
| 817 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 777,00 | 777,000 |
| 818 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 819 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 820 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 821 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 822 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 823 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 824 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 825 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 826 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 827 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 828 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 829 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 830 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 831 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 832 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 833 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 834 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 835 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 836 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 837 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 838 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 839 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 840 | 3 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 841 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 842 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 843 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 844 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 333,00 | 333,000 |
| 845 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 2,61   | 0,623   |
| 846 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 847 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 2,49   | 0,134   |
| 848 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 2,08   | 0,187   |
| 849 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 850 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 851 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 852 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 853 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 854 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 855 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 856 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 857 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 858 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 859 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 860 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 861 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 862 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 863 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 864 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 865 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 866 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 867 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 868 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 869 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 870 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 871 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 872 | 4 | 40,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 884 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 885 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 886 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 887 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 888 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 889 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 890 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 891 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 892 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 893 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 894 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 895 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 896 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 897 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 898 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 899 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 900 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 901 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 902 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 903 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 904 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 905 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 906 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 907 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 908 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 909 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 910 | 4 | 45,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 911 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 912 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 913 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 333,00 | 333,000 |
| 914 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 2,34   | 0,291   |
| 915 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 2,22   | 0,623   |
| 916 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 917 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 2,07   | 0,134   |
| 918 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 919 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 920 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 921 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |

|     |   |      |       |       |   |     |        |         |
|-----|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 922 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 923 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 924 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 925 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 926 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 927 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 928 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 929 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 930 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 931 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 932 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 933 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 934 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 935 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 936 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 937 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 938 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 939 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 940 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 941 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 942 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 943 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 944 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 945 | 4 | 50,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 946 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 947 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 948 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 2,52   | 0,178   |
| 949 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 2,16   | 0,291   |
| 950 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 2,17   | 0,716   |
| 951 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 2,40   | 0,098   |
| 952 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 953 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 954 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 955 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 956 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 957 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 958 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 959 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 960 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 961 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 962 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 963 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 964 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 965 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 966 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 967 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 968 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 969 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 970 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 971 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 972 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 973 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 974 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 975 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 976 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 977 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 978 | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |

|      |   |      |       |       |   |     |        |         |
|------|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 979  | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 980  | 4 | 55,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 981  | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 993  | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 994  | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 995  | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 996  | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 997  | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 998  | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 999  | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1000 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1001 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1002 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1003 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1004 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1005 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1006 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1007 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1008 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1009 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1010 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1011 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1012 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1013 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1014 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1015 | 4 | 60,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1016 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 1017 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 333,00 | 333,000 |
| 1018 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 2,19   | 0,178   |
| 1019 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 1020 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1021 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 2,17   | 0,103   |
| 1022 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1023 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1024 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1025 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1026 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1027 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1028 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1029 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1030 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1031 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1032 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1033 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1034 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1035 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1036 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1037 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1038 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1039 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1040 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1041 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1042 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1043 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1044 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1045 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1046 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |

|      |   |      |       |       |   |     |        |         |
|------|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 1047 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1048 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1049 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1050 | 4 | 65,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1051 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 1052 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 2,59   | 0,126   |
| 1053 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 1054 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 777,00 | 777,000 |
| 1055 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1056 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1057 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1058 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1059 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1060 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,012 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1061 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1062 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1063 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1064 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1065 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,016 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1066 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1067 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1068 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1069 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1070 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1071 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1072 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1073 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1074 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1075 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1076 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1077 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1078 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1079 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1080 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1081 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1082 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1083 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1084 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1085 | 4 | 70,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1086 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,25 | 333,00 | 333,000 |
| 1087 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,30 | 2,44   | 0,126   |
| 1088 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,35 | 777,00 | 777,000 |
| 1089 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,008 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1090 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1102 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1103 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1104 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1105 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,020 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1106 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1107 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1108 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1109 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1110 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,024 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1111 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1112 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1113 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1114 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |

|      |   |      |       |       |   |     |        |         |
|------|---|------|-------|-------|---|-----|--------|---------|
| 1115 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,028 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |
| 1116 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,25 | 555,00 | 555,000 |
| 1117 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,30 | 555,00 | 555,000 |
| 1118 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,35 | 555,00 | 555,000 |
| 1119 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,40 | 555,00 | 555,000 |
| 1120 | 4 | 75,0 | 0,040 | 0,032 | 4 | ,45 | 555,00 | 555,000 |

**Упорядоченный массив результатов расчета массы двигателя  $m_1$  и суммарной массы магнитов  $m_m$  при расчете сетчатым методом**

**p** - число пар полюсов;  
**P0** - потребляемая мощность;  
**lm, bm** - длина и ширина магнита;  
**nc** - число слоев обмотки статора;  
**bd** - индукция в зазоре.

| <b>№</b> | <b>p</b> | <b>P0</b> | <b>lm</b> | <b>bm</b> | <b>nc</b> | <b>bd</b> | <b>m1</b> | <b>mm</b> |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1        | 2        | 40        | .04       | .024      | 4         | .45       | 1.2       | .247      |
| 2        | 2        | 40        | .04       | .028      | 4         | .4        | 1.21      | .206      |
| 3        | 2        | 40        | .04       | .032      | 4         | .35       | 1.23      | .17       |
| 4        | 2        | 45        | .04       | .02       | 4         | .45       | 1.25      | .224      |
| 5        | 1        | 55        | .04       | .032      | 4         | .35       | 1.28      | .082      |
| 6        | 2        | 45        | .04       | .032      | 4         | .3        | 1.29      | .13       |
| 7        | 2        | 40        | .04       | .024      | 4         | .4        | 1.3       | .181      |
| 8        | 2        | 40        | .04       | .028      | 4         | .35       | 1.31      | .151      |
| 9        | 2        | 45        | .04       | .024      | 4         | .35       | 1.35      | .137      |
| 10       | 2        | 50        | .04       | .016      | 4         | .45       | 1.35      | .197      |
| 11       | 2        | 40        | .04       | .02       | 4         | .45       | 1.36      | .227      |
| 12       | 2        | 45        | .04       | .02       | 4         | .4        | 1.36      | .157      |
| 13       | 1        | 60        | .04       | .02       | 4         | .45       | 1.38      | .107      |
| 14       | 2        | 45        | .04       | .028      | 4         | .3        | 1.39      | .115      |
| 15       | 2        | 40        | .04       | .032      | 4         | .3        | 1.4       | .13       |
| 16       | 2        | 55        | .04       | .016      | 4         | .4        | 1.41      | .139      |
| 17       | 1        | 60        | .04       | .032      | 4         | .3        | 1.42      | .063      |
| 18       | 3        | 40        | .04       | .016      | 4         | .45       | 1.42      | .309      |
| 19       | 2        | 50        | .04       | .02       | 4         | .35       | 1.43      | .118      |
| 20       | 2        | 50        | .04       | .032      | 4         | .25       | 1.43      | .099      |



```

        i = p0 / u
        bdu = bm * 1.05
    jj = 0
    2 : w = (pi * (u * bdu * a * nc / kl) ^ 2 / 8 / p0 / r0 /
/lw / p) ^ (1 / 3)
    jj = jj + 1
    IF jj > 50 THEN PRINT "jj="; jj: GOTO 9999
        w = INT(w + .5)
        ws = 2 * p * w
        d = m * bdu / p / b / bm / lm / i / w
    `Проверка допустимого диаметра проводника
        IF d > dmax1 THEN mm = 333: m1 = 333: GOTO 999
        alf = aal + alfs
        bdug = bm + alf * d * pi / 180
        tau = pi * d / 2 / p
    `Проверка условия размещения на полюсной дуге
        IF bdug > (tau - .005) THEN mm = 555: m1 = 555: GOTO 999
    `Проверка сходимости по условию размещения целого числа слоев
        IF ABS(bdug - bdu) > e THEN bdu = bdug: GOTO 2
        d1 = bdug * nc / w / kl
        IF d1 < .00015 THEN mm = 111: m1 = 111: GOTO 999
        IF d1 > .0025 THEN mm = 222: m1 = 222: GOTO 999
        e3 = 1
        WHILE d1 > v(e3)
            e3 = e3 + 1
        WEND
        c8 = ABS(d1 - v(e3))
        c9 = ABS(d1 - v(e3 - 1))
        IF c8 >= c9 THEN
            d1 = v(e3 - 1): d11 = v1(e3 - 1)
        ELSE d1 = v(e3): d11 = v1(e3)
        END IF
        q = pi / 4 * d1 ^ 2
        r = r0 * lw * w * 2 * p / q / a ^ 2
        bdug = d1 * w * kl / nc
        i = m * bdug / p / w / bm / lm / b / d
        u1 = i * r
        hoc = nc * (d1 + d11)
        del = hoc + db

    ii = 0
    3 : hm = 800000 * br * b * del * km / hcb / (br - b * ks)
    `Проверка возможности обеспечения необходимой индукции
        IF hm < 0 THEN mm = 444: m1 = 444: GOTO 999
    ii = ii + 1
    IF ii > 50 THEN PRINT "ii="; ii: GOTO 9999
        fd = 800000 * br * b * del
        f1 = 2 / pi * m0 * fd * lm
        f2 = 1 / pi * m0 * fd * bm
        f3 = m0 / 8 * fd * .008
        f4 = 4 * p * (f1 + f2 + f3)
        ks1 = 1 + f4 / f
    `Цикл уточнения значения коэффициента рассеяния
        IF ABS(ks - ks1) > e1 THEN ks = ks1: GOTO 3
        j = i / q
        p01 = u1 * i
        a1 = w * q * j / bdug
        m11 = p * i * w * d * bm * b * lm / bdug

```

```

'РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ
  dcv = d + 2 * del
  dcn = dcv + 2 * hc
  dmax = dcn + 2 * hoc
  '
    IF dmax > dmax1 THEN mm = 111: m1 = 111: GOTO 999
  hcr = b * bm / 2 / bc
  IF hcr < .004 THEN hcr = .004
  drn = d - hm * 2
  'drn=(bm^2+4*d^2-14.4*d*hm+12.96*hm^2)/(4*d-7.2*hm)
  drv = drn
  s = so + ss
  dt = p0 / s / a1
'ПОДПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ
  'Подпрограмма штрафа по допустимому диаметру
  SUBROUTEN "STD"
RETURN "STBDU"
  'Подпрограмма штрафа по условию размещения обмотки
  SUBROUTEN "STBDU"
RETURN "STBDU"

IF dt > dtm THEN mm = 777: m1 = 777: GOTO 999
'Подпрограмма штрафа по перегреву
  SUBROUTEN "STT"
RETURN "STT"
  IF c = 1 THEN 999
  PRINT : PRINT n: PRINT
  PRINT "b="; b, "p0="; p0, "p="; p
  PRINT "bm="; bm, "lm="; lm, "nc="; nc
  PRINT
  PRINT "hc="; hc, "lw="; lw, "f="; f, "i="; i
  PRINT "bdug="; bdug, "w="; w, "ws="; ws, "d="; d
  PRINT "alf="; alf, "tau="; tau, "dl="; dl, "d11="; d11
  PRINT "q="; q, "r="; r, "u="; u, "hoc="; hoc
  PRINT "del="; del, "hm="; hm, "fd="; fd, "f1="; f1
  PRINT "f2="; f2, "f3="; f3, "f4="; f4, "ks1="; ks1
  PRINT "j="; j, "p01="; p01, "a1="; a1, "m="; m, "m11="; m11
  PRINT "dcv="; dcv, "dcn="; dcn, "dmax="; dmax, "hcr="; hcr
  PRINT "drn="; drn, "drv="; drv, "mr="; mr, "mc="; mc
  PRINT "mm="; mm, "mcu="; mcu, "m1="; m1, "l="; l
  PRINT "te="; te, "so="; so, "ss="; ss, "s="; s, "dt="; dt
  PRINT : PRINT
  INPUT " ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ НАЖМИТЕ <CR>"; c$
999 :
'PRINT n,
  PRINT #2, USING "##### # ##.# #.###"; n; p; p0; lm;
  PRINT #2, USING " #.### ## .## ###.## ###.###"; bm; nc; b; m1;
mm
'c=0 - ОТЛАДКА
  IF c = 0 THEN 990
  IF c1 = 0 THEN
    PRINT "МАССА МАШИНЫ ПРИ p="; p, "p0="; p0, "lm="; lm, "bm=";
bm
    PRINT
  END IF
  IF c1 = 0 THEN
    PRINT "nc \ b ";
    FOR b1 = bmin TO bmax STEP dbb: PRINT USING " #.## "; b1;

```

```

        NEXT b1: PRINT : PRINT
    END IF
    c1 = 1
    IF c2 = 0 THEN PRINT USING "##          "; nc;
    c2 = 1
    PRINT USING "###.### "; m1;
990 :
    NEXT b
    PRINT
    IF c <> 0 THEN PRINT USING "##          "; nc + dncl;
    NEXT nc
    PRINT
    c1 = 0: c2 = 0
    '      INPUT "ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ НАЖМИТЕ <CR>"; c$
'ОТЛАДКА ПРИ C=0
6 :
    NEXT bm
    NEXT lm
    NEXT p0
NEXT p
CLOSE #1
CLOSE #2
9999 :
END

```



```

3 :
    NEXT i
NEXT j
k = 0
PRINT : PRINT " i   p   p0   lm   bm   nc   b   m1   mm"
PRINT
PRINT
"=====
PRINT
'FOR I = 1 TO NN
FOR i = NN TO NN - kk STEP -1
    k = k + 1
    PRINT #2, i; p(i); p0(i); lm(i); bm(i); nc(i); b(i); m1(i); mm(i)
    PRINT #3, i; p1(i); p01(i); lm1(i); bm1(i); nc1(i); b1(i); m11(i);
mm1(i)
    PRINT #4, i; p2(i); p02(i); lm(i); b1(i); m11(i); mm1(i)
    IF k > 20 THEN k = 0: INPUT "ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ НАЖМИТЕ <CR>"; Q$
NEXT i
END

```

## Приложение Ж

Упорядоченный массив результатов расчета по обобщенному параметру оптимизации **Y**.

**p** - число пар полюсов;  
**P0** - потребляемая мощность;  
**lm, bm** - длина и ширина магнита;  
**nc** - число слоев обмотки статора;  
**bd** - индукция в зазоре;  
**m1** - масса двигателя;  
**mm** - масса магнитов.

| №  | p | P0 | lm  | bm   | nc | bd  | m1   | mm   | Y            |
|----|---|----|-----|------|----|-----|------|------|--------------|
| 1  | 1 | 70 | .04 | .028 | 4  | .25 | 1.73 | .042 | .07266       |
| 2  | 1 | 65 | .04 | .028 | 4  | .25 | 1.84 | .042 | .07728       |
| 3  | 1 | 65 | .04 | .032 | 4  | .25 | 1.63 | .048 | .07824       |
| 4  | 1 | 60 | .04 | .032 | 4  | .25 | 1.71 | .046 | .07866       |
| 5  | 1 | 70 | .04 | .024 | 4  | .30 | 1.64 | .050 | .082         |
| 6  | 1 | 65 | .04 | .024 | 4  | .30 | 1.71 | .048 | .08208       |
| 7  | 1 | 65 | .04 | .028 | 4  | .30 | 1.49 | .056 | 8.344001E-02 |
| 8  | 1 | 55 | .04 | .032 | 4  | .25 | 1.83 | .046 | .08418       |
| 9  | 1 | 60 | .04 | .024 | 4  | .30 | 1.83 | .048 | 8.784001E-02 |
| 10 | 1 | 60 | .04 | .028 | 4  | .30 | 1.58 | .056 | .08848       |
| 11 | 1 | 60 | .04 | .032 | 4  | .30 | 1.42 | .063 | .08946       |
| 12 | 1 | 70 | .04 | .020 | 4  | .35 | 1.62 | .056 | 9.072001E-02 |
| 13 | 1 | 55 | .04 | .032 | 4  | .30 | 1.49 | .061 | 9.089001E-02 |
| 14 | 1 | 65 | .04 | .020 | 4  | .35 | 1.72 | .056 | .09632       |
| 15 | 1 | 60 | .04 | .024 | 4  | .35 | 1.52 | .064 | .09728       |
| 16 | 1 | 55 | .04 | .032 | 4  | .35 | 1.28 | .082 | .10496       |
| 17 | 2 | 75 | .04 | .016 | 4  | .25 | 1.91 | .057 | .10887       |
| 18 | 1 | 75 | .04 | .016 | 4  | .40 | 1.64 | .067 | .10988       |
| 19 | 1 | 65 | .04 | .020 | 4  | .40 | 1.47 | .076 | .11172       |
| 20 | 2 | 65 | .04 | .020 | 4  | .25 | 1.7  | .066 | .1122        |



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ЦЕНТРАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ФОТОН»

420075, Республика Татарстан, Казань, ул.Липатова, 37  
тел. (843) 234-14-91, факс 234-33-81  
E-mail: [kancelyariya@ckb-photon.ru](mailto:kancelyariya@ckb-photon.ru), [photon@tnpko.ru](mailto:photon@tnpko.ru) <http://www.ckb-photon.ru>  
ОГРН 1101690036843 ИНН/КПП 1660141553/166001001

30.01 2014 г. № Дн - 470

На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Овсянникову Владимиру Николаевичу

E-mail: [ovsyannikov0512@mail.ru](mailto:ovsyannikov0512@mail.ru)

СПРАВКА

об использовании материалов кандидатской диссертации  
В.Н. Овсянникова

Материалы кандидатской диссертации В.Н. Овсянникова «Моментный двигатель с ограниченным углом поворота ротора» использовались при выполнении совместной НИОКР ЦКБ «Фотон» и Самарского государственного технического университета по созданию механизмов стабилизации и ориентации бортовой платформы оптико-механической системы специального назначения.

Автором предложена, и теоретически обоснована конструктивная схема моментного двигателя МД-100-1 с ограниченным углом поворота ротора, разработана методика его проектирования и проведена параметрическая оптимизация, в результате которой была снижена масса изделия и его потребляемая мощность.

Теоретические положения и практические рекомендации, разработанные автором, позволили по сравнению с типовыми электродвигателями обеспечить повышение точности позиционирования изделия при меньших энергозатратах.

С уважением,  
И.о генерального директора

В.А. Малыгин  
м.п.





**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**федеральное государственное**  
**бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего**  
**профессионального образования**  
**«Самарский государственный**  
**технический университет»**  
**(ФГБОУ ВПО «СамГТУ»)**

ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус  
 Самара, 443100  
 Тел. (846) 2784-3111 Факс (846) 2784-400  
 E-mail: [rector@samgtu.ru](mailto:rector@samgtu.ru)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе СамГТУ

д.т.н., профессор

Я.М. Клебанов

« 17 » 02 2014

**Акт**

использования диссертационной работы Овсянникова В.Н.  
 «Моментный двигатель с ограниченным углом поворота ротора»

Мы, нижеподписавшиеся, и.о. декана электротехнического факультета Л.М. Инаходова, заведующий кафедрой ЭПА П.К. Кузнецов и заведующий кафедрой ЭМАЭ А.М. Абакумов составили настоящий акт о том, что:

программы расчета и оптимизации моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора «MODMD» и «OPTIM 1» старшего преподавателя Овсянникова В.Н. используются в курсовом и дипломном проектировании студентов направления подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника»;

макетный образец моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора МД-100-1 (авторы разработки старший преподаватель Овсянников В.Н. и доцент Макаричев Ю.А.) используется в лабораторных работах по курсу «Электрические машины».

Названные программы и макетный образец, способствуют более полному усвоению передовых технологий в области электромашиностроения студентами старших курсов электротехнического факультета.

И.О. декана ЭТФ

к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой ЭМАЭ

д.т.н., профессор

Заведующий кафедрой ЭПА

д.т.н., профессор

Л.М. Инаходова

А.М. Абакумов

П.К. Кузнецов