

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

кафедра Электрические машины и электротехника

«Допущен к защите»
Заведующий кафедрой _____
Намшова Н. М.
(Ф.И.О., ученая степень, звание)
_____ « _____ » 20__ г.
(подпись)

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Отрезок серии машин постоянного тока мощностью от 7,5 до 22 кВт

Выполнил (а) Кулаков Артур Сергеевич ЭАТК-15-07
(Фамилия и инициалы студента) группа

специальность Электроэнергетика 15В0718001

Научный руководитель Шидерова Т. М.
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Рос « _____ » 20__ г.
(подпись)

Рецензент: _____
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ « _____ » 20__ г.
(подпись)

_____ (Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ « _____ » 20__ г.
(подпись)

Консультанты:

по экономической части:
Жакунов А. А., доцент к.т.н., профессор.
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ « 31 » мая 20__ г.
(подпись)

по безопасности жизнедеятельности:
Саматова М. С., доцент, к.т.н.
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ « 28 » июля 20__ г.
(подпись)

Жарыкшибекова М. Б. стар. преп.
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ « 06 » 06 20__ г.
(подпись)

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Институт Электроэнергетики и электротехники
Специальность 5В071800 - Электроэнергетика
Кафедра Электрические машины и электромобили

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Студент Лукачев Артур Сергеевич
(фамилия, имя, отчество)

Тема работы Отпуск серии машин постоянного тока мощностью от 7,5 до 22 кВт.

утверждена приказом ректора № 124 от «26» 10 2018 г.

Срок сдачи законченной работы «25» мая 2019 г.

Исходные данные, требуемые параметры результатов и исходные данные

Для проведения расчетов и выбора данных в таблицу, спроектирована серия машин постоянного тока 2П, мощностью от 7,5 до 22 кВт. расчеты проведены в программе Matcad.

Перечень вопросов, подлежащих разработке в дипломной работе или краткое содержание:

1. Обзор стандарта о проектировании серии машин постоянного тока.
2. Проектирование серии машин.
3. Расчет элементов постоянного тока.
4. Методы измерения параметров серийных машин.
5. Безопасность конструкции.
6. Эксплуатационная часть.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. График зависимости з.т. $k_1 = f(k)$
2. Мет. главного пояса.
3. Схема развертки прямой вальмовой оболочки
4. Форма и конструк. размеры полуэллиптического двоякого паза якоря.
5. Эллипсой полуэллиптий паз якоря.
6. Шаблон для изготовления катушки пояса
7. Случай включения человека в цепь тока.

Рекомендуемая основная литература

1. Алексеев А. Е. Конструкция э. машин 1958г.
2. Кутяков И. П. Проектирование э. машин, 1980г.
3. Мидер О. Д., Турин Э. С., Шидерова И. С., Проектирование электромашин
4. Волыск А. А. Электромашин

Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Сроки	Подпись
ЭМД	Сематова Т. С.	10.02 - 28.05.19	<i>[Signature]</i>
Якорн. часть	Шакуров А. А.	11.02 - 31.05.19	<i>[Signature]</i>
Основная часть	Шидерова И. М.	05.02 - 06.06.19	<i>[Signature]</i>

Г Р А Ф И К
подготовки дипломной работы

№ п/п	Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
1.	Общие вопросы проектирования серий машин	20.01.19	выполнено
1.1	Основные вопросы проектирования серий машин	25.02.19	выполнено
2.	Проектирование двигателя постоянного тока	16.03.19	выполнено
3.	Расчет двигателя постоянного тока	28.03.19	выполнено
4	Технологии производства катушек статора и якоря	05.04.19	выполнено
4.2	Уточнение катушек статора и якоря постоянного тока	21.04.19	выполнено

Дата выдачи задания « 05 » февраля 2019 г.

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

Намиба Н. И.

(Фамилия и инициалы)

Руководитель _____

(подпись)

Шугрова Т. М.

(Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению _____

(подпись студента)

(Фамилия и инициалы)

Аннотация

Темой дипломной работы является “Отрезок серии машин постоянного тока мощностью от 7,5 до 22 кВт”.

В дипломной работе рассмотрены основные вопросы проектирования серий машин. Разработана программа расчета в MathCad в которой был выполнен расчет двигателя постоянного тока.

В разделе «Безопасность жизнедеятельности» проведен анализ опасности поражения электрическим током, разработаны меры защиты от поражения электрическим током, произведен расчет зануления двигателя.

В экономической части приводится расчет экономической эффективности выбора целесообразной серии машин постоянного тока.

Асдатпа

Дипломдық жұмыстың тақырыбы "қуаты 7,5-тен 22 кВт болатын тұрақты ток машина сериясының кесіндісі" болып табылады.

Дипломдық жұмыста машиналар сериясын жобалаудың негізгі мјселелері қарастырылды. Тұрақты ток қозғалтқышының есебі орындалған MathCad есептеу бағдарламасы жіріленді.

"Тіртіршілік қауіпсіздігі" блімінде электр тогының зақымдану қаупіне талдау жіргізілді, электр тогының зақымдануынан қорғау шаралары жіріленді, қозғалтқыштың нәлденуі есептелді.

Экономикалық блімде тұрақты ток машиналарының мақсатқа сай сериясын тандаудың экономикалық тиімділігін есептеу келтірілген.

Annotation

The theme of the thesis is “Piece of a series of machines of a direct current with power from 7.5 to 22 kW.”

The thesis discusses the main issues of designing a series of machines. The program of calculation in MathCad in which the calculation of the DC motor was performed.

In the section "Safety of vital activity" the analysis of the danger of electric shock, the measures of protection against electric shock, the calculation of the vanishing of the engine.

In the economic part, the calculation of the economic efficiency of choosing an appropriate series of DC machines is given.

Содержание

Введение.....	9
1 Общие вопросы проектирования серий машин.....	11
1.1 Основные вопросы проектирования серий машин.....	11
1.2 Скорости вращения машин.....	12
1.3 Шкала мощностей.....	13
1.4 Напряжение.....	16
2 Проектирование двигателя постоянного тока	16
2.1 Общие требования, предъявляемые к двигателю постоянного тока...16	
2.2 Задание на проектирование.....	17
3 Расчет двигателя постоянного тока.....	17
3.1 Главные размеры.....	17
3.1.1 Сердечник якоря.....	22
3.1.2 Сердечник главных полюсов.....	23
3.1.3 Сердечники добавочных полюсов.....	25
3.1.4 Станина.....	26
3.2 Обмотка якоря.....	27
3.2.1 Количество витков обмотки, коллекторных пластин и пазо..28	
3.2.2 Обмотка якоря с овальными полузакрытыми пазами.....	31
3.3 Обмотка добавочных полюсов.....	36
3.4 Стабилизирующая последовательная обмотка главных полюсов.....	38
3.5 Характеристики намагничивания машины.....	39
3.6 Параллельная обмотка главных полюсов.....	43
3.7 Размещение обмоток главных и добавочных полюсов.....	46
3.7.1 Параллельная обмотка главных полюсов.....	46
3.7.2 Стабилизирующая последовательная обмотка.....	46
3.7.3 Обмотка добавочных полюсов.....	46
3.8 Щетки и коллектор.....	47
3.9 Коммутационные параметры.....	48
3.10 Номинальный режим.....	51
3.11 Рабочие характеристик двигателя постоянного тока.....	54
3.12 Регулирование частоты вращения.....	59
3.12.1 Регулирование частоты вращения вверх.....	59
3.12.2 Регулирование частоты вращения вниз.....	60
3.13 Тепловой расчет и вентиляционный расчет.....	61
3.13.1 Тепловой расчет машины постоянного тока.....	61
3.13.2 Потери в обмотках и контактах щеток.....	61
3.13.3 Обмотка якоря.....	62
3.13.4 Обмотка добавочных полюсов.....	65

3.13.5	Параллельная обмотка главных полюсов.....	66
3.13.6	Коллектор.....	66
3.13.7	Вентиляционный расчет.....	67
3.14	Масса и динамические показатели.....	68
4	Технология производства катушек основных полюсов.....	70
4.1	Технология изготовления катушек полюсов из круглого провода...	71
4.2	Изолировка катушек полюсов машин постоянного тока.....	73
5	Безопасность жизнедеятельности.....	73
5.1	Анализ опасности поражения электрическим током.....	73
5.2	Разработка мер защиты от поражения электрическим током.....	78
6	Экономическая часть.....	81
6.1	Расчет экономической эффективности.....	81
	Заключение.....	90
	Список литературы.....	91

Введение

Машины постоянного тока находят широкое применение промышленности и на транспорте, несмотря на то, что стоимость их выше, чем машин переменного тока, это объясняется тем, что они обладают лучшими эксплуатационными характеристиками в отношении регулирования скорости вращения, пуска, реверса и допускают более высокие перегрузки по сравнению

с машинами переменного тока. Эти преимущества машин постоянного тока настолько существенны, что первоначальные повышенные затраты на их установку очень быстро окупаются в эксплуатации. В ряде случаев требования

к регулированию скорости вращения электропривода и автоматизации его работы не могут быть осуществлены без машин постоянного тока.

Во всех случаях, когда требуются плавное регулирование скорости вращения в широких пределах (практически с нуля), частые реверсы и пуски, большие пусковые и перегрузочные моменты, применяют приводы постоянного тока либо в виде системы «генератор-двигатель», либо в виде двигателей постоянного тока с регулированием скорости вращения изменением

возбуждения. Попытки использования в этих случаях машин переменного тока в виде коллекторных двигателей или каскадных соединений на практике не оправдали себя.

Машины постоянного тока используются в бумажной, резиновой, текстильной промышленности, для привода шахтных подъемников и лифтов и для измерения вращающих моментов. Специальной областью применения машин постоянного тока является тяга (трамвай, троллейбус, автобус и тепловоз). Опыт эксплуатации в самых тяжелых условиях работы (частые перегрузки, реверсы, сотрясения) показал, что правильно спроектированная и качественно изготовленная машина постоянного тока, несмотря на её относительную сложность, является не менее надежной, чем более простые по конструкции машины переменного тока.

Основная номенклатура электрических машин охвачена в настоящее время сериями. Наличие серий машин с заранее установленной конструкцией и размерами основных деталей дает возможность заводам разработать при необходимости новую машину с использованием либо серийного типоразмера целиком, либо основных деталей и узлов серийных машин. Бывают, конечно, и заводской практике случаи, когда использование серийной конструкции невозможно и требуется создание машины на новой базе, однако такие случаи редки.

В настоящее время широкое применение находят так называемые «единые» серии машин. Раньше отдельные электромашиностроительные предприятия разрабатывали серии машин без координации между собой

принципов, заложенных в основу конструкции этих машин. Монтажные размеры машин разных серий одинаковой или близкой мощности значительно различались между собой. Размеры деталей, а также размеры и сортамент применяемых материалов, том числе подлежащих замене при ремонте (обмоточные провода, изоляционные материалы, подшипники и т. п.), также были различны.

В области машин постоянного тока номенклатура машин разделяется на три участка, охватываемых едиными сериями: машины мощностью от 0,3 до 200 кВт, машины мощностью сверх 200 до 1400 кВт; машины мощностью сверх 1400 кВт.

В данном дипломном проекте рассматриваются особенности проектирования серий машин постоянного тока, имеющих более широкий выпуск, - машин мощностью от 0,3 до 200 кВт.

Удельный вес двигателей постоянного тока в общем, выпуске электрических машин составляет в среднем 4-5 % и не имеет тенденции к снижению вследствие расширяющегося внедрения автоматизированных технологических процессов, а также успехов в развитии тиристорного питания двигателей постоянного тока.

1. Общие вопросы проектирования серий машин

1.1 Основные вопросы проектирования серий машин

Проектирование отдельных машин и серий существенно различается. Прежде всего, следует установить, что такое «серия» машин. Серия представляет собой ряд машин со строго нарастающими основными параметрами - мощностью, геометрическими размерами. Машины, входящие в серию, характеризуются общностью назначения и условий работы и имеют принципиальную общность конструкции по всей серии или на ее отдельных участках.

Машины, входящие в серию, проектируют в направлении унификации деталей и узлов с тем, чтобы в возможных и рациональных пределах сократить количество производственной оснастки, необходимой для изготовления серийных машин. Эти машины имеют одинаковые технические данные и размеры, основные детали и узлы машин - взаимозаменяемы.

Обычно на электромашиностроительном заводе проектируется серия мощности, объединенных общностью машин - ряд машин возрастающей конструкции и технологии производства и предназначенных для серийного изготовления.

Проектирование серии машин представляет перед собой сложную и ответственную задачу, так как при этом приходится считаться со многими требованиями, часто противоречащими друг другу. Требуется, чтобы на как можно меньше материалов, чтобы их изготовление машин пошло изготовление было простым и дешевым, и в то же время необходимо, чтобы машины были надежны в работе и обладали характеристиками, не худшими, чем предписанные ГОСТ.

Удовлетворить всем требованиям можно лишь частично, отступая несколько от оптимальных размерных соотношений, например, с точки зрения расхода материалов.

При проектировании серии машин и большое значение имеют вопросы экономики и рациональной организации производства и его технология, с которыми тесно связаны вопросы унификации деталей и конструктивных узлов, нормализации деталей и т. п. Именно эти вопросы заставляют для асинхронных и синхронных машин выбирать внешние диаметры статора таким образом, чтобы получить несколько машин на различные мощности и скорости вращения при изменении только внутреннего диаметра и сохранении или небольшом изменении их длины (вместе с вылетами лобовых частей обмоток).

Для машин постоянного тока выбирают одинаковый диаметр якоря для нескольких мощностей и скоростей вращения, изменяя при этом только длину якоря.

В результате для ряда машин значительно сокращается количество штамповки листов статора, ротора или полюсов, уменьшается количество моделей для отливки станин, подшипниковых щитов, сохраняются одни и те же диаметры валов, подшипники, коллекторы, обмоткодержатели, значительно сокращается количество мерительного инструмента, технологической оснастки и т. п.

При выборе внешнего диаметра якоря машины постоянного тока следует руководствоваться нормами. Они разработаны с учетом наиболее рационального раскроя листов электротехнической стали, имеющих стандартные размеры. Приведенные нормализованные диаметры якорей, в дипломном проекте, выбраны для современных серий электрических машин.

В серии машин постоянного тока каждому внешнему диаметру якоря соответствует один внутренний; при этом станина и штамп для полюса остаются одним и тем для нескольких мощностей и скоростей, но число пазов якоря размеры могут изменяться с изменением длины якоря и напряжения, что связано наличием коллектора, ограничивающего выбор числа пазов.

При выборе основных размерных соотношений следует руководствоваться рекомендуемыми значениями λ , выбирая их и соответствии с принятой системой вентиляции и, считаясь с необходимостью получить приемлемые значения λ для смежных типов, которые имеют одинаковый диаметр якоря.

1.2 Скорости вращения машин

Шкала скоростей вращения может быть твердой или скользящей. Твердые значения скоростей вращения более удобны для потребителей, облегчают выбор двигателей. Однако для осуществления твердой скоростей требуется увеличение количества исполнений по обмоточным данным.

Современные серии машин постоянного тока имеют, как правило, твердые шкалы скоростей вращения, причем в некоторых из них применяются скорости синхронных машин (соответствующие частоте 50 Гц), в других асинхронных двигателей. Если необходимость взаимозаменяемости двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей будет относительно редкой, то применение асинхронных значений скоростей вращения нецелесообразно, таком случае применяют синхронные скорости вращения, обычно в пределах 500 - 3000 об/мин, т. е. 500, 600, 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин. Учитывая большой разрыв между 1 500 и 3000 об/мин, между ними можно ввести промежуточное значение скорости вращения - 2000 или 2200 об/мин.

Генераторы постоянного тока мощностью до 200 кВт обычно приводятся во вращение асинхронными двигателями, поэтому генераторы целесообразно рассчитывать на скорости вращения асинхронных двигателей. Следует применять более высокие значения асинхронных скоростей вращения, так как при этом уменьшаются габариты и вес агрегата (генератор-

двигателя), однако выбранные скорости не должны превосходить пределов, при которых обеспечивается надежная работа генератора.

Охватываемый каждым значением скорости вращения диапазон мощностей двигателей зависит, с одной стороны, от потребностей народного хозяйства, а с другой стороны - ограничивается (при больших мощностях) допустимой окружной скоростью на якоре и на коллекторе.

Современный электропривод имеет тенденцию к повышению скоростей вращения двигателей, так как оно в известных пределах сопровождается уменьшением габаритов и веса электрических машин, а в некоторых случаях также приводимых механизмов.

Однако повышение скорости вращения электрические машин влечет за собой необходимость увеличения механической прочности отдельных деталей и узлов, в первую очередь - коллектора. Вместе с тем повышение скорости вращения затрудняет спокойную работу машины и отражается на коммутации.

1.3 Шкала мощностей

Для каждой мощности может быть построена электрическая машина, которая будет оптимальной как по использованию, так и по затратам труда. Однако строить серии, исходя из очень большого количества исполнений по мощности, нецелесообразно по условиям производства. Обычно в серии машин принимается для установленной скорости вращения определенная шкала мощностей, которая является компромиссом между интересами привода и требованиями производства.

Шкала мощностей характеризуется коэффициентом нарастания мощности, т. е. отношением мощностей двух соседних машин.

Коэффициент нарастания мощности:

$$X = \frac{P_n}{P_{n-1}}. \quad (1.1)$$

При отсутствии в каталоге машины необходимой мощности выбирают машину ближайшей большей мощности. Чем больше значение коэффициента нарастания мощности, тем больше будет несоответствие между потребной мощностью привода и мощностью ближайшей машины, а, следовательно, будут больше переустановленная мощность, первоначальные затраты и эксплуатационные расходы в сравнении с таковыми у двигателя потребной мощности.

Считая, что потребная мощность в среднем будет:

$$(1.2) \quad P_m = \frac{P_{n-1} + P_n}{2},$$

где P_m - потребная для привода мощность;
 P_n - ближайшая большая номинальная мощность машины;
 P_{n-1} - ближайшая меньшая номинальная мощность машины.

Коэффициент переустановленной мощности:

$$y = \frac{P_n}{P_m} = \frac{2 \cdot P_n}{\frac{P_n}{x} + P_n} = \frac{2 \cdot x}{1 + x}. \quad (1.3)$$

Коэффициент нарастания мощности может быть либо одинаковым во всем диапазоне серии, либо меняться в ее различных частях. Средний коэффициент нарастания мощности машин серии:

$$X_{cp} = \sqrt[n-1]{\frac{P_{max}}{P_{min}}}, \quad (1.4)$$

где P_{max} - мощность наибольшего типоразмера в серии;
 P_{min} - мощность наименьшего типоразмера в серии.

Тогда коэффициент переустановленной мощности по всей серии выразится (1.3) с подстановкой вместо коэффициента нарастания мощности двух соседних машин (x) среднего коэффициента нарастания мощности по серии (x_{cp}) из (1.4)

$$(1.5) \quad y_{cp} = \frac{2 \cdot x_{cp}}{1 + x_{cp}}.$$

Чем больше количество ступеней в заданном диапазоне мощности, тем меньше переустановленная мощность, однако с увеличением количества ступеней увеличиваются трудности производства, а также несколько усложняются условия эксплуатации из-за увеличения числа разных типоразмеров номенклатуры запасных частей.

Метод определения коэффициента переустановленной мощности может быть использован для сравнения разных серий из разных шкал мощностей. На каком же коэффициенте нарастания мощности или на каком количестве типоразмеров следует остановиться? В этом вопросе лучшим способом

является изучение требований потребителей, анализирование существующих серий, а также оценка производственных возможностей. В настоящее время выпускаются машины серий, имеющих так называемые «твердые» и «скользящие» шкалы мощностей.

Существо твердой шкалы мощностей серии машин в отличие от обычной

скользящей шкалы заключается в том, что в серии для разных скоростей вращения имеются двигатели одной и той же мощности. Например, в единой серии П машин постоянного тока для скоростей вращения 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин имеются двигатели с фиксированной мощностью 1,0; 1,5; 2,2; 3,2; 4,5 кВт. В обычной скользящей шкале значения мощностей для разных скоростей могут отличаться.

Твердая шкала мощностей представляет несомненные удобства для потребителей, облегчает выбор машин, способствует стандартизации приводимых механизмов, содействует установлению большего порядка на заводах-изготовителях электрических машин, которые при отсутствии установленной твердой шкалы нередко меняют технические данные (включая мощность) выпускаемых машин в зависимости от изменения технологического процесса или каких-либо других обстоятельств.

Однако при применении твердой шкалы мощностей возникает недоиспользование машин по нагреву при разных скоростях вращения. Например, если в твердой шкале (табл. 1) указана мощность 0,7 кВт при 1500 об/мин, а при 1000 об/мин необходимо получить в этом же типоразмере без изменения длины сердечника 0,3 кВт, то машина окажется недогруженной при 1500 или перегруженной при 1000 об/мин.

Для того чтобы тепловая нагрузка машины серии была примерно на одном уровне, требуется обеспечение двух условий:

1) одинаковые значения $\frac{P_2}{n}$ в шкале мощностей для всех скоростей вращения каждого типоразмера;

2) отсутствие обычно наблюдаемого снижения допустимого значения $\frac{P_2}{n}$

понижении скорости вращения. Значения $\frac{P_2}{n}$ могли быть одинаковыми, если

бы шкалы мощностей скоростей вращения были построены с применением постоянного значения коэффициента нарастания, совпадающего для обеих шкал. Так, например, при скоростях вращения 500, 1000, 2000 и 4000 об/мин и мощностях 1, 2, 4, 8, 16, 32 кВт (коэффициент нарастания мощности и коэффициент нарастания скорости вращения равны 2) могут быть

осуществлены одинаковые значения $\frac{P_2}{n}$ для каждого из типоразмеров при всех скоростях вращения.

При скоростях вращения, обычно применяемых в сериях двигателей общего применения (600, 750, 1000, 1500 об/мин и т. д.), обеспечить первое условие невозможно.

Неизбежно также уменьшение допустимого значения $\frac{P_2}{n}$ при понижении скорости вращения, так как для одного типоразмера при разных скоростях вращения обычно применяется один и тот же вентилятор; следовательно, с понижением скорости вращения ухудшается эффект вентиляции. Вместе с тем ухудшается также использование обмоточного пространства, так как понижением скорости вращения уменьшается сечение провода и увеличивается количество витков в обмотке (особенно в машинах небольшой мощности).

Одинаковая нагрузка отдельных машин при твердой шкале мощностей может быть достигнута увеличением количества длин сердечников применительно к каждому значению $\frac{P_2}{n}$ что вызовет затруднения в производстве.

1.4 Напряжение

Наибольшее распространение в машинах общего применения рассматриваемого диапазона мощностей находят напряжения 220 (для двигателей) и 230 В (для генераторов), в связи с чем в серии может быть причина всех типоразмеров на эти напряжения.

Исполнение на ПО (для двигателей) и 115 в (для генераторов) больших типоразмеров серии требует в связи с увеличенными токами применения удлиненных коллекторов, а, следовательно, усложнения конструкции серийных машин. Поэтому исполнение на указанные напряжения обычно охватывает диапазон от самых малых типоразмеров до соответствующей мощности 50-70 кВт.

Машины на 440 и 460 В могут охватывать весь диапазон серии, однако при этом следует иметь в виду, что мощность малых типоразмеров серии может снизиться в сравнении с мощностью, допустимой при других напряжениях, из-за значительного уменьшения сечения провода связанного с этим ухудшения заполнения медью обмоточного пространства.

2 Проектирование двигателя постоянного тока

2.1 Общие требования, предъявляемые к двигателю постоянного тока

При разработке проекта машины должны быть выполнены следующие основные требования:

1) надежность работы машины при всех требованиях, указанных технических условиях (ТУ) на ее изготовление (мощность, скорость вращения, напряжение, перегрузки, условия установки и т. д.);

2) удобство обслуживания машины в эксплуатации;

3) экономичность машины по расходу материалов габаритно-установочным размерам при высоком значении коэффициента полезного действия (к.п.д.) сравнительно низкой трудоемкости, требующейся для ее изготовления.

Надежная машина должна удовлетворять таким требованиям:

а) все детали машины должны быть прочными;

б) вкладыши подшипников скольжения и подшипники качения не должны перегреваться сверх допустимых температур; смазка из подшипников не должна просачиваться по валу;

в) изоляция обмоток должна быть электрически прочной и не терять своих качеств в процессе длительной эксплуатации машины

г) температура частей машины не должна достигать значений, которые могли бы вызывать порчу изоляции и смазки подшипников эта температура также не должна быть опасна для обслуживающей персонала;

д) коммутация машины не должна сопровождаться недопустимым искрением на коллекторе, при этом недопустимым следует считать такое искрение, интенсивность которого со временем растет вследствие вызванных им нагаров на щетках и коллекторных пластинах;

е) максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами не должно быть выше проверенных практикой значений во избежание частых перекрытий по коллектору, т. е. Возникновения кругового огня на коллекторе.

2.2 Задание на проектирование

При проектировании электрической машины рассчитываются размеры статора и ротора, выбираются типы обмоток, обмоточные провода, изоляция, материалы активных и конструктивных частей машины. Отдельные части машины должны быть так сконструированы и рассчитаны, чтобы при изготовлении машины трудоемкость и расход материалов были наименьшими, а при эксплуатации машина обладала наилучшими энергетическими показателями. При этом электрическая машина должна соответствовать условиям применения ее в электроприводе.

Исходные данные:

Мощность $P_n = 7,5$ кВт

Номинальное напряжение сети $U_n = 220$ В

Номинальная частота вращения $n = 1500$ об/мин

Высота оси вращения $h = 180 \cdot 10^{-3}$ м

Диаметр якоря $D_n = 180 \cdot 10^{-3}$ м

Возбуждение параллельное без стабилизирующей обмотки.

Исполнение: по степени защиты - IP22, по способу охлаждения - самовентиляция

Изоляция по классу нагревостойкости В

Двигатель постоянного тока рассчитывается на базе разработанной программы "MathCad.

3 Расчет двигателя постоянного тока

3.1 Главные размеры

К главным размерам машин постоянного тока относят наружный диаметр якоря $D_{я2}$ и длину сердечника якоря l_2 , поскольку они определяют габариты, массу и технико-экономические показатели этого типа электрических машин.

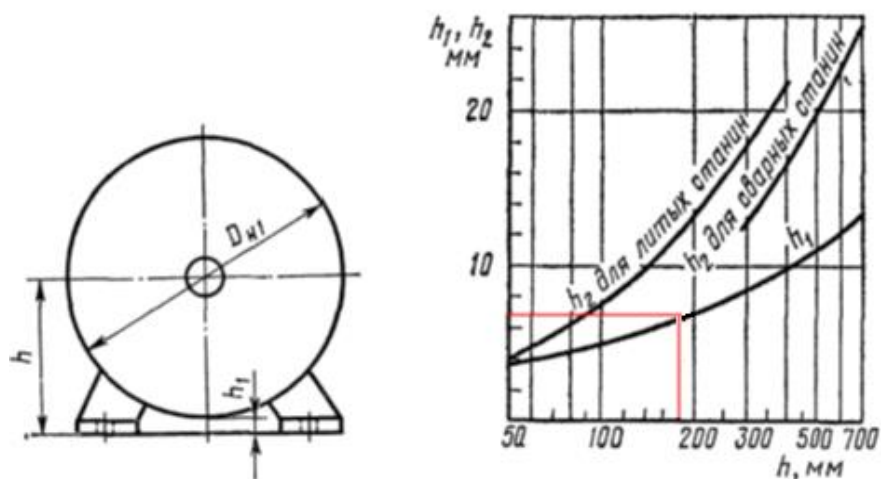


Рисунок 3.1 - График зависимости $h_1 = f(h)$

По имеющемуся значению механической мощности на валу определяем высоту оси вращения:

$$h = 180 \text{ мм.}$$

Максимально допустимый наружный диаметр корпуса:

$$D_{\text{корп}} = 2(h - h_1) = 2(180 - 7,5) = 345 \text{ мм,} \quad (3.1)$$

где $h_1 = 7,5$ мм, минимально допустимое расстояние от нижней части корпуса машины до опорной плоскости лап.

Для машин постоянного тока с монолитной станиной, являющейся частью магнитопровода, максимальный допустимый наружный диаметр корпуса равен максимально допустимому наружному диаметру.

Максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора:

$$D_{H1} = D_{\text{корп}} = 345 \text{ мм.}$$

Наружный диаметр сердечника якоря:

$$D_{H2} = 180 \text{ мм.}$$

Значение коэффициента k_H :

$$k_H = 0,93.$$

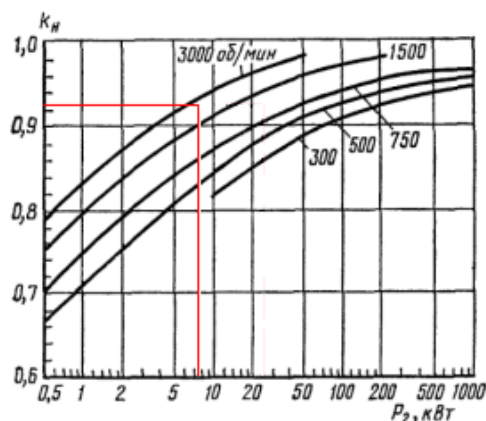


Рисунок 3.2 - График зависимости $k_H = f(P_2)$

Значение коэффициента k_T :

$$k_T = 0,97.$$

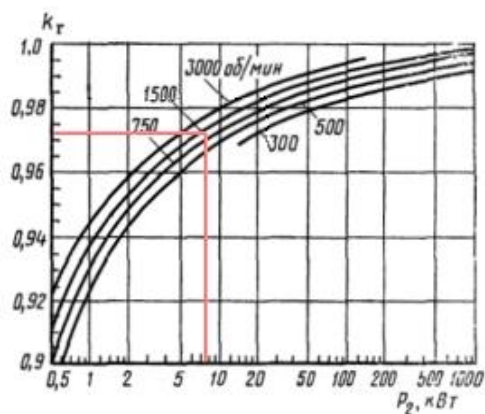


Рисунок 3.3 - График зависимости $k_T = f(P_2)$

Предварительное значение КПД принимаем на уровне энергетических показателей выпускаемых машин:

$$\eta = 0,86.$$

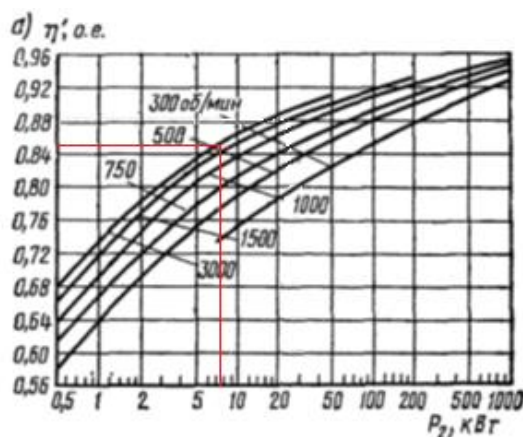


Рисунок 3.4 - График зависимости $\eta' = f(P_2)$

Расчётная мощность для двигателя постоянного тока:

$$P' = E_2 I_2 = k_H U k_T \frac{P_2}{\eta} = \frac{0,93 \cdot 0,97 \cdot 7500}{0,86} = 7867,15 \text{ Вт.} \quad (3.2)$$

Принимаем изоляцию класса нагревостойкости F.

Предварительное значение электромагнитной нагрузки:

$$A_2' = 175 \text{ А/см.}$$

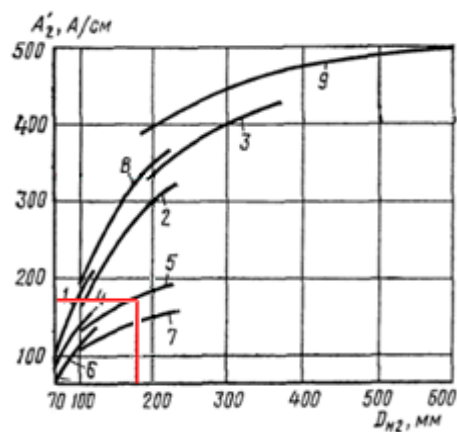


Рисунок 3.5 - График зависимости $A'_2 = f(D_{H2})$ при классе нагревостойкости изоляции F

Предварительное значение электромагнитной нагрузки:

$$B'_\delta = 0,625 \text{ Тл.}$$

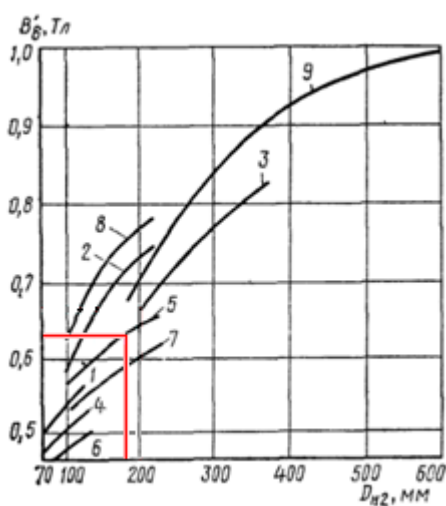


Рисунок 3.6 - График зависимости $B'_\delta = f(D_{H2})$

Расчётный коэффициент полюсной дуги:

$$\alpha' = 0,625.$$

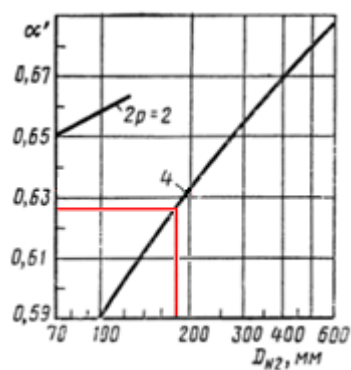


Рисунок 3.7 - График зависимости $\alpha' = f(D_{H2})$.

Расчётная длина сердечника якоря двигателя постоянного тока:

$$l_2' = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot P'}{D_{H2}^2 \cdot n \cdot A_2 \cdot B_8 \cdot \alpha'} = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot 7867,15}{180^2 \cdot 1500 \cdot 175 \cdot 0,625 \cdot 0,625} = 144,45 \text{ мм.} \quad (3.3)$$

Отношение расчётной длины сердечника якоря двигателя постоянного тока к наружному диаметру сердечника якоря:

$$\lambda = \frac{l_2'}{D_{H2}} = \frac{144,45}{180} = 0,8025. \quad (3.4)$$

Принятое максимальное значение:

$$\lambda_{\max} = 1,34.$$

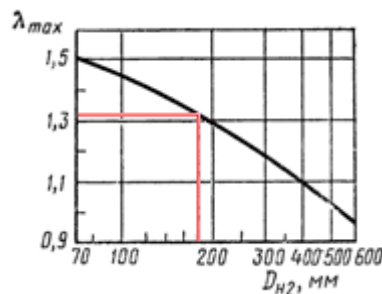


Рисунок 3.8 - График зависимости $\lambda_{\max} = f(D_{H2})$

Таким образом, поскольку $\lambda \leq \lambda_{\max}$ высота оси вращения вала двигателя для расчета главных размеров подобрана правильно.

3.1.1 Сердечник якоря

Принимаем для сердечника якоря: сталь 2013, толщина 0,5 мм, листы сердечника якоря, лакированные; форма пазов полузакрытая овальная; род обмотки - двухслойная насыпная; скос пазов на $\frac{1}{2}$ зубцового деления.

Коэффициент заполнения сердечника якоря сталью:

$$k_c = 0,95.$$

Припуск на сборку сердечника по ширине паза:

$$b_c = 0,2 \text{ мм.}$$

Конструктивная длина сердечника якоря принимается округлением расчетной до ближайшего числа, кратного 5:

$$l_2 = l'_2 = 145 \text{ мм.}$$

Эффективная длина сердечника якоря при отсутствии радиальных каналов:

$$l_{\text{эф}2} = k_c \cdot l_2 = 0,95 \cdot 145 = 137,75 \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Предварительное значение внутреннего диаметра листов якоря:

$$D_2 = 60 \text{ мм.}$$

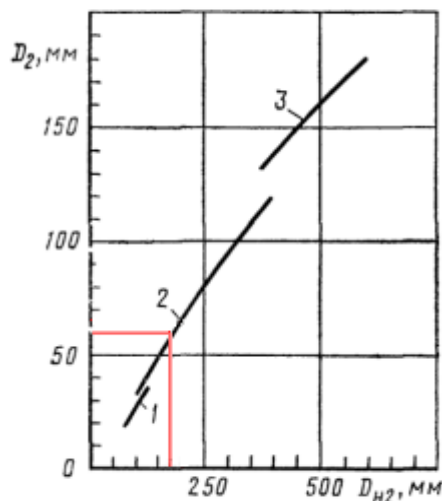


Рисунок 3.9 - График зависимости $D_2 = f(D_{H2})$

3.1.2 Сердечник главных полюсов

Принимаем для сердечников главных полюсов анизотропную холоднокатаную электротехническую сталь марки 3411 из штамповочных листов, толщина 1 мм, листы сердечников полюсов неизолированные; компенсационная обмотка не требуется; вид воздушного зазора между главными полюсами эксцентричный.

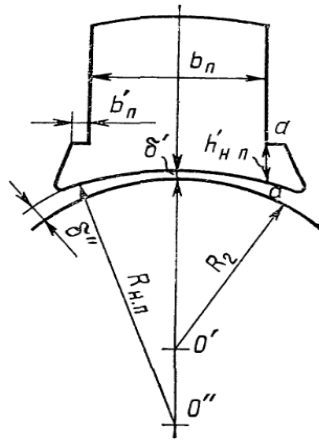


Рисунок 3.10 - Лист главного полюса некомпенсированной машины с эксцентричным зазором.

Коэффициент заполнения сердечника сталью:

$$k_c = 0,98.$$

Количество главных полюсов:

$$2p = 4.$$

Величина воздушного зазора:

$$\delta = 1,75 \text{ мм.}$$

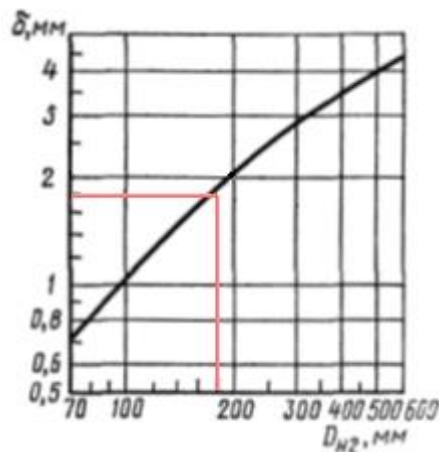


Рисунок 3.11 - График зависимости $\delta = f(D_{H2})$

Высота зазора у оси:

$$\delta' = \frac{\delta}{1,5} = \frac{1,75}{1,5} = 1,17 \text{ мм.} \quad (3.6)$$

Высота зазора у края полюса:

$$\delta'' = 2\delta = 3,5 \text{ мм.} \quad (3.7)$$

Длина сердечника полюса:

$$l_n = l_2 = 145 \text{ мм.}$$

Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{H2}}{2p} = \frac{3,14 \cdot 180}{4} = 141,37 \text{ мм.} \quad (3.8)$$

Расчётная ширина полюсной дуги:

$$b'_{\text{нн}} = \alpha' \cdot \tau = 0,625 \cdot 141,37 = 88,36 \text{ мм.} \quad (3.9)$$

Действительная ширина полюсной дуги у некомпенсированной машины с эксцентричным зазором:

$$b_{\text{нн}} = b'_{\text{нн}} = 88,36 \text{ мм.}$$

Предварительная магнитная индукция в сердечнике полюса:

$$B'_n = 1,45 \text{ Тл.}$$

Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре:

$$\Phi' = B'_\delta \cdot b_{\text{нн}} \cdot l_2 \cdot 10^{-6} = 0,625 \cdot 88,36 \cdot 145 \cdot 10^{-6} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (3.10)$$

Эффективная длина сердечника полюса:

$$l_{\text{эф.н}} = k_c \cdot l_n = 0,98 \cdot 145 = 142,1 \text{ мм.} \quad (3.11)$$

Ширина сердечника полюса:

$$b_n = \frac{\sigma \cdot \Phi' \cdot 10^6}{l_{\text{эф.н}} \cdot B'_n} = \frac{1,2 \cdot 8 \cdot 10^3}{142,1 \cdot 1,45} = 47 \text{ мм.} \quad (3.12)$$

где $\sigma = 1,2$ - коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов;

Ширина уступа полюса, предназначенная для упора обмотки возбуждения при её креплении:

$$b'_n = 0,1 \cdot b_n = 4,7 \text{ мм.} \quad (3.13)$$

Высота наконечника полюса:

$$h'_{\text{нн}} = \frac{(b_{\text{нн}} - b_n) \cdot B'_\delta}{1,67 \cdot B'_n} = \frac{(88,36 - 46,59) \cdot 0,625}{1,67 \cdot 1,45} = 10,78 \text{ мм.} \quad (3.14)$$

3.1.3 Сердечники добавочных полюсов

Принимаем для сердечников добавочных полюсов сталь марки 3411 толщиной 1 мм, листы сердечников полюсов не имеют изолирующего покрытия.

Коэффициент заполнения сердечника сталью:

$$k_c = 0,98.$$

Для машин с $2p = 4$ количество добавочных полюсов:

$$2p_d = 4.$$

Длина наконечника добавочного полюса:

$$l_{\text{нд}} = l_2 = 145 \text{ мм.}$$

Длина наконечника добавочного полюса с учетом выступов:

$$l_d = 145 - 2 \cdot 5 = 135 \text{ мм.}$$

Предварительное значение ширины сердечника добавочного полюса:

$$b'_d = 22 \text{ мм.}$$

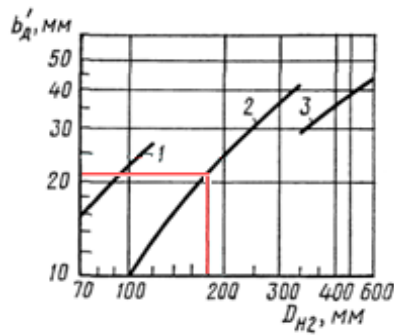


Рисунок 3.12 - График зависимости $b'_d = f(D_{H2})$

Величина воздушного зазора:

$$\delta'_d = 3,75 \text{ мм.}$$

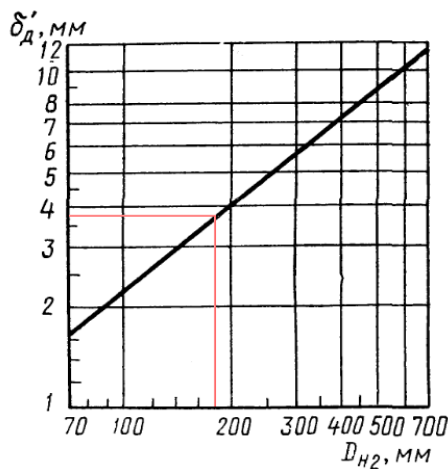


Рисунок 3.13 - График зависимости $\delta'_d = f(D_{H2})$

3.1.4 Станина

Принимаем монолитную машины из стали марки Ст.3.

Длина станины:

$$l_1 = l_2 + 0,65 \cdot \tau = 145 + 0,65 \cdot 141,37 = 236,89 \text{ мм.} \quad (3.15)$$

Предварительная магнитная индукция в станине:

$$B'_{c1} = 1,15 \text{ Тл.}$$

Высота станины:

$$h_{c1} = \frac{\sigma \cdot \Phi' \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B'_{c1}} = \frac{1,2 \cdot 8 \cdot 10^3}{2 \cdot 1 \cdot 237 \cdot 1,15} = 17,61 \text{ мм.} \quad (3.16)$$

где $k_c = 1$ - коэффициент заполнения сердечника сталью;

Высота станины:

$$h_{c1} = 18 \text{ мм.}$$

Магнитная индукция в месте распространения магнитного потока в станине при входе его в главный полюс:

$$B_{cn} = \frac{\sigma \cdot \Phi' \cdot 10^6}{2 \cdot (l_n + b_n) \cdot h_{c1}} = \frac{1,2 \cdot 8 \cdot 10^3}{2 \cdot (145 + 47) \cdot 18} = 1,39 \text{ Тл.} \quad (3.17)$$

Допустимое значение магнитной индукции в месте распространения магнитного потока в станине при входе его в главный полюс:

$$B_{cn, \text{доп.}} = 1,7 \text{ Тл.}$$

Так как $B_{cn} < 1,7 \text{ Тл}$, то h_{c1} рассчитано верно.

Внутренний диаметр монолитной станины:

$$D_1 = D_{H1} - 2 \cdot h_{c1} = 345 - 2 \cdot 18 = 309 \text{ мм.} \quad (3.18)$$

Высота главных полюсов:

$$h_n = \frac{D_1 - 4\delta_d - D_{H2}}{2} = \frac{309 - 4 \cdot 3,75 - 180}{2} = 57 \text{ мм.} \quad (3.19)$$

3.2 Обмотка якоря

Предварительное значение тока якоря:

$$I_2 = \frac{k_T \cdot P_2}{\eta \cdot U} = \frac{0,97 \cdot 7500}{0,86 \cdot 220} = 38,45 \text{ А.} \quad (2.20)$$

где $P_2 = 7500 \text{ Вт}$ - номинальная отдаваемая мощность;

Принимаем волновую обмотку из провода ПЭТ-155.

Количество параллельных ветвей:

$$2a = 2.$$

3.2.1 Количество витков обмотки, коллекторных пластин и пазов

Предварительное количество витков обмотки якоря:

$$\omega_2' = \frac{30 \cdot k_H \cdot U}{\frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi'} = \frac{30 \cdot 0,93 \cdot 220}{\frac{2}{1} \cdot 1500 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 256 \quad (3.21)$$

Число секций в пазу:

$$N_{\text{ш}} = 3.$$

Предварительное количество витков в секции:

$$\omega_{c2} = \frac{1,8 \cdot \omega_2'}{D_{H2}} = \frac{1,8 \cdot 256}{180} = 2,56 \quad (3.22)$$

Принятое значение количества витков в секции:

$$\omega_{c2} = 3.$$

Предварительное количество пазов якоря:

$$Z_2' = \frac{\omega_2'}{N_{\text{ш}} \cdot \omega_{c2}} = \frac{256}{3 \cdot 3} = 28,44. \quad (3.23)$$

Принятое значение количества пазов якоря:

$$Z_2 = 29.$$

Количество коллекторных пластин:

$$K = N_{\text{ш}} \cdot Z_2 = 3 \cdot 29 = 87. \quad (3.24)$$

Зубцовое деление по наружному диаметру якоря:

$$t_2 = \frac{\pi D_{H2}}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 180}{29} = 19,5 \text{ мм.} \quad (3.25)$$

Значение зубцовой зоны попадает в пределы 10÷20 для данной высоты оси вращения.

Наружный диаметр коллектора при полузакрытых пазах якоря и отсутствии петушков на коллекторе:

$$D_k = 0,775 \cdot 180 = 140 \text{ мм.} \quad (3.26)$$

Коллекторное деление:

$$t_k = \frac{\pi D_k}{K} = \frac{3,14 \cdot 140}{87} = 5,06. \quad (3.27)$$

Максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами при нагрузке:

$$U_{k.max} = \frac{2p \cdot U \cdot k_u}{\alpha' \cdot K} = \frac{4 \cdot 220 \cdot 1,8}{0,625 \cdot 87} = 29,13 \text{ В}, \quad (3.28)$$

где $k_u = 1,8$ - коэффициент искажения поля;

Предельно допустимое значение максимального напряжения между соседними коллекторными пластинами при нагрузке:

$$U_{k.max} = 50 \text{ В}.$$

Уточненное число витков обмотки якоря:

$$\omega_2 = \omega_{c2} \cdot K = 3 \cdot 87 = 261 \quad (3.29)$$

Количество эффективных проводников в пазу:

$$N_{n2} = 2N_m \cdot \omega_{c2} = 2 \cdot 3 \cdot 3 = 18. \quad (3.30)$$

Ток в пазу:

$$I_{n2\Sigma} = \frac{N_{n2} \cdot I_2}{2a} = \frac{18 \cdot 38,45}{2} = 346,05 \text{ А}. \quad (3.31)$$

Уточненная линейная нагрузка якоря:

$$A_2 = \frac{20\omega_2 \cdot I_2}{\pi \cdot D_{H2} \cdot 2a} = \frac{20 \cdot 261 \cdot 38,45}{3,14 \cdot 180 \cdot 2} = 177,55 \text{ А}. \quad (3.32)$$

Реальные пазы:

$$y_n = \frac{z_2}{2p} - \varepsilon = \frac{29}{4} - \frac{1}{4} = 7. \quad (3.33)$$

Элементарные пазы:

$$y = y_k = \frac{K - 1}{p} = \frac{87 - 1}{2} = 43. \quad (3.34)$$

$$y_1 = N_m \cdot y_n = 3 \cdot 7 = 21. \quad (3.35)$$

$$y_2 = y - y_1 = 43 - 21 = 22. \quad (3.36)$$

Примерные значения высот пазов:

$$h_{п2} = 27 \text{ мм.}$$

Высота спинки якоря:

$$h_{с2} = \frac{D_{H2} - D_2}{2} - h_{п2} = \frac{180 - 60}{2} - 27 = 33 \text{ мм.} \quad (3.37)$$

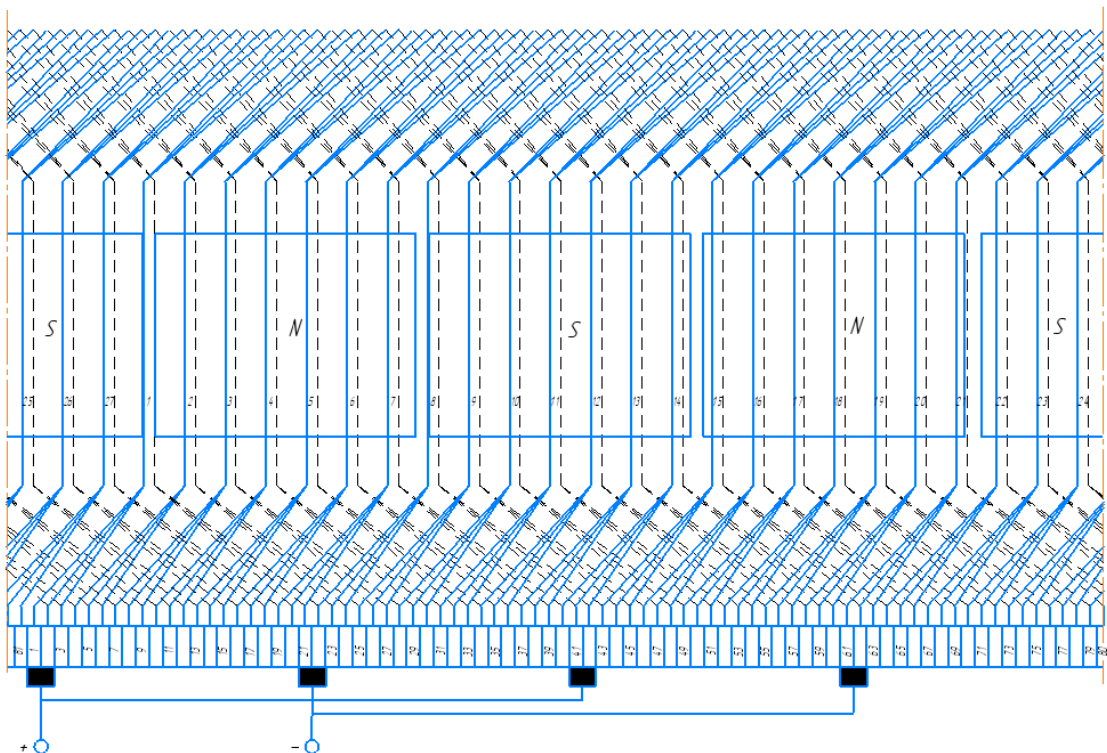


Рисунок 3.14 – Схема развертка простой волной обмотки ДПТ

3.2.2 Обмотка якоря с овальными полузакрытыми пазами

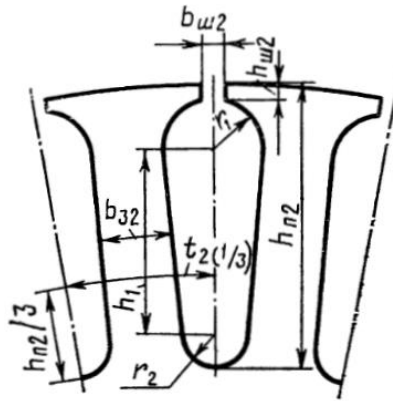


Рисунок 3.15 - Форма и геометрические размеры полужакрытого овального паза якоря.

Предварительная магнитная индукция в спинке якоря:

$$B'_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2l_{\text{эф2}} \cdot h_{c2}} = \frac{8 \cdot 10^3}{2 \cdot 137,75 \cdot 33} = 0,88 \text{ Тл.} \quad (3.38)$$

Допускаемое значение магнитной индукции в спинке якоря:

$$B_{c2} = 1,15 \text{ Тл.}$$

Предварительная магнитная индукция в зубцах:

$$B'_{32} = 1,65 \text{ Тл.}$$

Ширина зубца:

$$b_{32} = \frac{t_2 \cdot B_{\delta}}{k_c \cdot B'_{32}} = \frac{19,5 \cdot 0,625}{0,95 \cdot 1,65} = 7,78 \text{ мм.} \quad (3.39)$$

Радиус паза большой:

$$r_1 = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{ш2}) - z_2 \cdot b_{32}}{2(z_2 + \pi)} = \frac{3,14(180 - 2 \cdot 0,8) - 29 \cdot 7,78}{2(29 + 3,14)} = 5,21 \text{ мм,} \quad (3.40)$$

где $h_{ш2} = 0,8$ мм - высота шлица паза;

Радиус паза меньший:

$$r_2 = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{ш2}) - z_2 \cdot b_{32}}{2(z_2 - \pi)} = \frac{3,14(180 - 2 \cdot 0,8) - 29 \cdot 7,78}{2(29 - 3,14)} = 3,29 \text{ мм.} \quad (3.41)$$

Определение значений ширины зуба, соответствующие вычисленным значениям радиусов паза:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{ш2} - 2r_1)}{z_2} - 2r_1 = \\ &= \frac{3,14(180 - 2 \cdot 0,8 - 2 \cdot 5,21)}{29} - 2 \cdot 5,21 = 7,78 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{ш2} + 2r_2)}{z_2} - 2r_2 = \\ &= \frac{3,14(180 - 2 \cdot 27 - 2 \cdot 3,29)}{29} - 2 \cdot 3,29 = 7,78 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Расстояние между центрами радиусов:

$$h_1 = h_{ш2} - h_{ш2} - r_1 - r_2 = 27 - 0,8 - 5,21 - 3,29 = 17,7 \text{ мм.} \quad (3.44)$$

Площадь поперечного сечения паза в штампе:

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{\pi}{2}(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h_1 = \\ &= \frac{3,14}{2}(5,21^2 + 3,29^2) + (5,21 + 3,29) \cdot 17,7 = 210,09 \text{ мм}^2. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Площадь поперечного сечения паза в свету:

$$\begin{aligned} S'_{ш2} &= \frac{\pi}{2} \left[\left(r_1 - \frac{b_c}{2} \right)^2 + \left(r_2 - \frac{b_c}{2} \right)^2 \right] + (r_1 + r_2 - b_c)h_1 = \\ &= \frac{3,14}{2} \left[\left(5,21 - \frac{0,2}{2} \right)^2 + \left(3,29 - \frac{0,2}{2} \right)^2 \right] + (5,21 + 3,29 - 0,2) \cdot 17,7 = 203,91 \text{ мм}^2 \end{aligned} \quad (3.46)$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции:

$$\begin{aligned} S_u &= b_u(2\pi r_1 + \pi r_2 + 2h_1) = \\ &= 0,5(2 \cdot 3,14 \cdot 5,21 + 3,14 \cdot 3,29 + 2 \cdot 17,7) = 39,24 \text{ мм}^2, \end{aligned} \quad (3.47)$$

где $b_u = 0,5$ мм - односторонняя толщина корпусной изоляции;
Площадь поперечного сечения клина и прокладок:

$$S_{\text{кл}} + S_{\text{пр}} = 5 \cdot r_1 = 5 \cdot 5,21 = 26,05 \text{ мм}^2. \quad (3.48)$$

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой:

$$S''_{\text{П2}} = S_{\text{П2}} - S_u - S_{\text{кл}} - S_{\text{пр}} = 203,91 - 39,24 - 26,05 = 138,62 \text{ мм}^2. \quad (3.49)$$

Предварительный диаметр провода с изоляцией:

$$d' = \sqrt{\frac{0,75 S''_{\text{П2}}}{N_{\text{П2}} \cdot c}} = \sqrt{\frac{0,75 \cdot 138,62}{18 \cdot 2}} = 1,7 \text{ мм}. \quad (3.50)$$

Ближайший меньший стандартный диаметр провода с изоляцией и без изоляции:

$$\frac{d}{d'} = \frac{1,62}{1,705}.$$

Уточненный коэффициент заполнения паза:

$$k_{\text{П}} = \frac{N_2 \cdot c \cdot (d')^2}{S''_{\text{П2}}} = \frac{18 \cdot 2 \cdot 1,705^2}{138,62} = 0,755. \quad (3.51)$$

Площадь поперечного сечения неизолированного провода:

$$S = 2,06 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в обмотке:

$$J_2 = \frac{I_2}{2a \cdot c \cdot S} = \frac{38,45}{2 \cdot 2 \cdot 2,06} = 4,67 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}. \quad (3.52)$$

Удельная тепловая нагрузка якоря от потерь в обмотке:

$$A_2 \cdot J_2 = 177,47 \cdot 4,67 = 828,78 \frac{\text{А}}{\text{см} \cdot \text{мм}^2}. \quad (3.53)$$

Удельная тепловая нагрузка якоря от потерь в обмотке, допустимое значение:

$$A_2 \cdot J_2 = 750 \frac{\text{А}}{\text{см} \cdot \text{мм}^2}.$$

Среднее зубцовое деление якоря:

$$t_{\text{cp}} = \frac{\pi(D_{\text{H2}} - h_{\text{П2}})}{z_2} = \frac{3,14(180 - 27)}{29} = 16,57 \text{ мм.} \quad (3.54)$$

Средняя ширина секции обмотки:

$$b_{\text{cp}} = t_{\text{cp}} \cdot y_n = 16,57 \cdot 7 = 115,99 \text{ мм.} \quad (3.55)$$

Средняя длина одной лобовой части секции:

$$l_{\text{л2}} = (0,7 + 0,4p)b_{\text{cp}} + 15 = (0,7 + 0,4p) \cdot 115,9 + 15 = 189 \text{ мм.} \quad (3.56)$$

Средняя длина витка обмотки:

$$l_{\text{cp2}} = 2(l_2 + l_{\text{л2}}) = 2(145 + 189) = 668 \text{ мм.} \quad (3.57)$$

Сопротивление обмотки при температуре 20°C:

$$r_2 = \frac{\omega_2 \cdot l_{\text{cp2}}}{57 \cdot (2a)^2 \cdot c \cdot S \cdot 10^3} = \frac{261 \cdot 668}{57 \cdot 2^2 \cdot 2 \cdot 2,06 \cdot 10^3} = 0,186 \text{ Ом.} \quad (3.58)$$

Сопротивление обмотки при температуре 20°C (в относительных единицах):

$$r_{2*} = \frac{r_2 \cdot I_2}{U} = \frac{0,186 \cdot 38,45}{220} = 0,0325 \text{ о.е.} \quad (3.59)$$

Сопротивление обмотки при температуре 20°C (контрольное значение):

$$r_{2*} = \frac{\pi \cdot D_{\text{H2}} \cdot l_{\text{cp}} \cdot (A_2 J_2)}{114 \cdot 10^4 \cdot I_2 \cdot U} = \frac{3,14 \cdot 180 \cdot 668 \cdot 828}{114 \cdot 10^4 \cdot 38,48 \cdot 220} = 0,0324. \quad (3.60)$$

Длина витка лобовой части обмотки:

$$l_{\beta 2} = (0,12 + 0,14p) \cdot b_{cp} + 7,5 = (0,12 + 0,14 \cdot 2) \cdot 116 + 7,5 = 53,9 \text{ мм.} \quad (3.61)$$

Ширина шлица паза:

$$b_{m2} = d + 2 \cdot b_u + 0,3 = 1,705 + 2 \cdot 0,5 + 0,3 = 3,005 \text{ мм.} \quad (3.62)$$

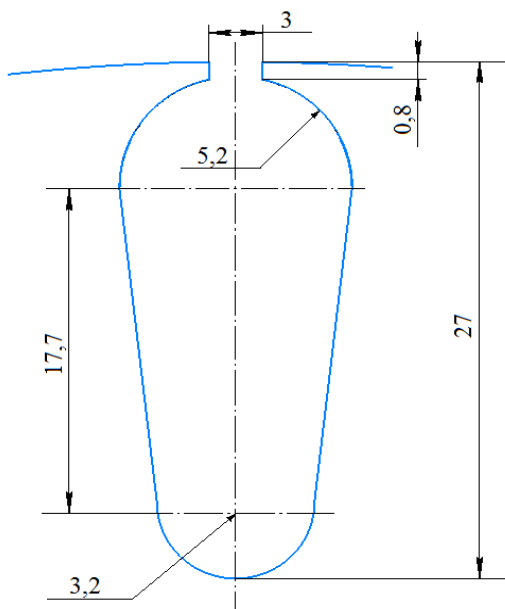


Рисунок 3.16 – Овальный полузакрытый паз якоря.

3.3 Обмотка добавочных полюсов

Поперечная МДС якоря:

$$F_2 = \frac{\omega_2 \cdot I_2}{2p \cdot 2a} = \frac{261 \cdot 38,45}{4 \cdot 2} = 1254,43 \text{ А.} \quad (3.63)$$

Предварительное количество витков катушки добавочного полюса у некомпенсированной машины:

$$\omega'_d = \frac{k'_d \cdot F_2 \cdot a_d}{I_2} = \frac{1,25 \cdot 1254,43 \cdot 1}{38,45} = 40,78. \quad (3.64)$$

где $k'_d = 1,25$;

$a_d = 1$.

Уточнённое количество витков:

$$\omega_d = 41.$$

Уточнённая МДС катушки:

$$F_d = \frac{\omega_d \cdot I_2}{a_d} = \frac{41 \cdot 38,45}{1} = 1576,45 \text{ А.} \quad (3.65)$$

Уточнённое отношение МДС некомпенсированной машины:

$$k_d = \frac{F_d}{F_2} = \frac{1576,45}{1254,43} = 1,26. \quad (3.66)$$

Предварительное значение плотности тока:

$$J'_d = 3,2 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

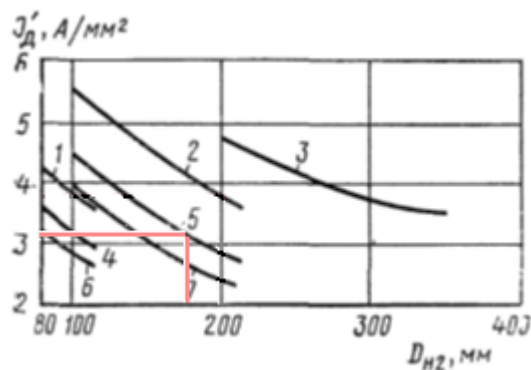


Рисунок 3.17 - График зависимости $J'_d = f(D_{H2})$

Предварительная площадь поперечного сечения проводника:

$$S' = \frac{I_2}{a_d \cdot J'_d} = \frac{38,45}{1 \cdot 3,2} = 12,02 \text{ мм}^2. \quad (3.67)$$

Принимаем провод ПЭТП-155.

Размеры прямоугольной проволоки:

$$a \times b = 2,5 \times 5 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения прямоугольной проволоки:

$$S = 11,95 \text{ мм}^2.$$

Размеры прямоугольной проволоки с изоляцией:

$$a' \times b' = 2,65 \times 5,15 \text{ мм.}$$

Уточнённая плотность тока в обмотке:

$$J_{\text{д}} = \frac{I_2}{a_{\text{д}} \cdot S} = \frac{38,45}{1 \cdot 11,95} = 3,22 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}. \quad (3.68)$$

Предварительная ширина катушки:

$$b'_{\text{кд}} = 0,12 \cdot D_{\text{н2}} = 0,12 \cdot 180 = 21,6 \text{ мм}. \quad (3.69)$$

Средняя длина витка многослойной катушки из изолированных проводников:

$$\begin{aligned} l_{\text{ср.д}} &= 2(l_{\text{д}} + l_{\text{д}}) + \pi(b'_{\text{кд}} + 2b_3 + 2b_u) = \\ &= 2(135 + 22) + 3,14(21,6 + 5) = 397,57 \text{ мм}, \end{aligned} \quad (3.70)$$

где $2b_3$ - двухсторонний зазор между изолированным сердечником полюса и катушкой;

$2b_u$ - двухсторонняя толщина изоляции сердечника и катушки и крепления катушки; $2b_3 + 2b_u = 5 \text{ мм}$.

Сопротивление обмотки при температуре 20°C :

$$r_{\text{д}} = \frac{2\rho_{\text{д}} \cdot \omega_{\text{д}} \cdot l_{\text{ср.д}}}{57 \cdot a_{\text{д}} \cdot S \cdot 10^3} = \frac{4 \cdot 41 \cdot 397,57}{57 \cdot 1 \cdot 11,95 \cdot 10^3} = 0,0957 \text{ Ом}. \quad (3.71)$$

Отношение сопротивления обмотки добавочных полюсов к сопротивлению обмотки якоря:

$$\frac{0,0957}{0,186} = 0,51$$

3.4 Стабилизирующая последовательная обмотка главных полюсов

Принимаем размер, марку и форму провода такими же, как и у обмотки добавочных полюсов.

МДС стабилизирующей обмотки на полюс:

$$F_{\text{пос}} = 0,15 \cdot F_2 = 0,15 \cdot 1254,43 = 188,16 \text{ А}. \quad (3.72)$$

Предварительное количество витков в катушке:

$$\omega_{\text{пос}} = \frac{F_{\text{пос}} \cdot a_{\text{пос}}}{I_2} = \frac{188,16 \cdot 1}{38,45} = 4,89. \quad (3.73)$$

Уточнённое количество витков:

$$\omega_{\text{пос}} = 5.$$

Уточнённое значение МДС обмотки:

$$F_{\text{пос}} = \frac{\omega_{\text{пос}} \cdot I_2}{a_{\text{пос}}} = \frac{5 \cdot 38,45}{1} = 192,25 \text{ А}. \quad (3.74)$$

Предварительная ширина катушки:

$$b_{\text{к.пос}} = 0,1 \cdot D_{\text{H2}} = 0,1 \cdot 180 = 18 \text{ мм}. \quad (3.75)$$

Средняя длина витка многослойной катушки из изолированных проводов:

$$\begin{aligned} l_{\text{ср.пос}} &= 2(l_{\text{п}} + b_{\text{п}}) + \pi(b'_{\text{к.пос}} + 2b_3 + 2b_u) = \\ &= 2(145 + 47) + 3,14(18 + 5) = 456,26 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (3.76)$$

Сопротивление обмотки при температуре 20°C:

$$r_{\text{д}} = \frac{2\rho \cdot \omega_{\text{пос}} \cdot l_{\text{ср.пос}}}{57 \cdot a_{\text{пос}}^2 \cdot S \cdot 10^3} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 456,26}{57 \cdot 1^2 \cdot 11,95 \cdot 10^3} = 0,0134 \text{ Ом}. \quad (3.77)$$

Отношение сопротивления последовательной обмотки главных полюсов к сопротивлению обмотки якоря:

$$\frac{r_{\text{пос}}}{r_2} = \frac{0,0134}{0,186} = 0,072.$$

3.5 Характеристика намагничивания машины

Магнитная цепь машины постоянного тока симметрична, поэтому достаточно рассчитать МДС для одного полюса.

Предварительное значение магнитной индукции в зубцах:

$$B_{32} = 1,95 \text{ Тл} > 1,8 \text{ Тл}.$$

поэтому часть магнитного потока, проходящего через пазы, снижает магнитный поток в зубцах. Это снижение будет учитываться коэффициентом k_3 , который зависит от соотношения площадей поперечных сечений паза и зубца. Для овальных полузакрытых пазов напряженность магнитного поля определяют по сечению на $1/3$ высоты зубца.

Сопротивление обмоток якорной цепи двигателя, приведённое к стандартной рабочей температуре:

$$\begin{aligned} r_{T2\Sigma} &= m_T (r_2 + r_1 + r_d + r_{\text{нос}}) = 1,38(0,186 + 0,0957 + 0,0134) = \\ &= 0,407 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (3.78)$$

Уточнённая ЭДС при номинальном режиме работы двигателя:

$$E_2 = U - I_2 r_{T2\Sigma} - \Delta U_{\text{щ}} = 220 - 38,45 \cdot 0,407 - 2 = 202,35 \text{ В}, \quad (3.79)$$

где $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$ - падение напряжения на щетках коллектора;

Уточнённый магнитный поток:

$$\Phi = \frac{30 \cdot E_2}{\left(\frac{p}{a}\right) \cdot n \cdot \omega_2} = \frac{30 \cdot 202,35}{2 \cdot 1500 \cdot 261} = 7,75 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}. \quad (3.80)$$

Площадь поперечного сечения в воздушном зазоре:

$$S_{\delta} = b'_{\text{н.п}} \cdot l'_2 = 88,36 \cdot 145 = 12812,2 \text{ мм}^2. \quad (3.81)$$

Уточнённая магнитная индукция в воздушном зазоре:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{\delta}} = \frac{7,75 \cdot 10^3}{12812,2} = 0,605 \text{ Тл}. \quad (3.82)$$

Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря:

$$k_{\delta} = 1 + \frac{b_{\text{м2}}}{t_2 - b_{\text{м2}} + 5 \frac{\delta \cdot t_2}{b_{\text{м2}}}} = 1 + \frac{3,005}{19,5 - 3,005 + \frac{5 \cdot 1,75 \cdot 19,5}{3,005}} = 1,04. \quad (3.83)$$

Принятое значение коэффициента:

$$k_{\delta} = 1,04.$$

МДС для воздушного зазора:

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 1,75 \cdot 1,04 \cdot 0,605 \cdot 10^3 = 880,88 \text{ А.} \quad (3.84)$$

Площадь равновеликого поперечного сечения зубцов:

$$S_{32} = \frac{z_2}{2p} \cdot \alpha' \cdot b_{32} \cdot l_{\phi 2} = \frac{29}{4} \cdot 0,625 \cdot 7,78 \cdot 137,75 = 4856 \text{ мм}^2. \quad (3.85)$$

Уточнённая магнитная индукция в зубцах:

$$B_{32} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{32}} = \frac{7,75 \cdot 10^3}{4856} = 1,6 \text{ Тл.} \quad (3.86)$$

Величина напряженности в зубцах:

$$H_{32} = 17 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

Средняя длина пути магнитного потока:

$$l_{32} = h_{\Pi 2} - 0,2r_2 = 27 - 0,2 \cdot 3,29 = 26,342 \text{ мм.} \quad (3.87)$$

МДС для зубцов:

$$F_{32} = 0,1 \cdot H_{32} \cdot l_{32} = 0,1 \cdot 1,7 \cdot 26,342 = 44,78 \text{ А.} \quad (3.88)$$

Площадь поперечного сечения спинки якоря без аксиальных каналов:

$$S_{C2} = h_{C2} \cdot l_{\phi 2} = 33 \cdot 137,75 = 4545,75 \text{ мм}^2. \quad (3.89)$$

Уточнённая магнитная индукция в спинке якоря:

$$B_{C2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{C2}} = \frac{7,75 \cdot 10^3}{2 \cdot 4545,75} = 0,852 \text{ Тл.} \quad (3.90)$$

Напряжённость магнитного поля:

$$H_{C2} = 0,93 \frac{A}{cm}$$

Средняя длина пути магнитного потока:

$$l_{C2} = \frac{\pi(D_2 + h_{C2})}{4p} + \frac{h_{C2}}{2} = \frac{\pi(60 + 33)}{8} + \frac{33}{2} = 55,34 \approx 56 \text{ мм.} \quad (3.91)$$

МДС для спинки якоря:

$$F_{C2} = 0,1 \cdot H_{C2} \cdot l_{C2} = 0,1 \cdot 0,93 \cdot 56 = 5,15 \text{ А.} \quad (3.92)$$

Площадь поперечного сечения сердечника главного полюса:

$$S_n = b_n \cdot l_{\text{эф.п}} = 47 \cdot 142,1 = 6678,7 \text{ мм}^2. \quad (3.93)$$

Уточнённая магнитная индукция в сердечнике полюса:

$$B_n = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{S_n} = \frac{1,2 \cdot 7,75 \cdot 10^3}{6678,7} = 1,39 \text{ Тл.} \quad (3.94)$$

Напряженность магнитного поля:

$$H_n = 4,8 \frac{A}{cm}$$

Средняя длина пути магнитного потока:

$$l_{c,n} = h_n = 61 \text{ мм.}$$

МДС для сердечника полюса:

$$F_{c,n} = 0,1 \cdot H_n \cdot l_{c,n} = 0,1 \cdot 4,8 \cdot 61 = 29,28 \text{ А.} \quad (3.95)$$

Эквивалентный зазор в стыке между главным полюсом и станиной:

$$\delta_{nl} = 2l_n \cdot 10^{-4} + 0,1 = 2 \cdot 145 \cdot 10^{-4} + 0,1 = 0,129 \text{ мм.} \quad (3.96)$$

МДС для зазора:

$$F_{nl} = 0,8 \cdot \delta_{nl} \cdot B_n \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,129 \cdot 1,39 \cdot 10^3 = 143,45 \text{ А.} \quad (3.97)$$

Площадь поперечного сечения станины из монолитного материала:

$$S_{C1} = h_{C1} \cdot l_1 = 17,61 \cdot 236,89 = 4171,63 \text{ мм}^2. \quad (3.98)$$

Уточненная магнитная индукция в станине:

$$B_{C1} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{C1}} = \frac{1,2 \cdot 7,75 \cdot 10^3}{2 \cdot 4171,63} = 1,11 \text{ Тл}. \quad (3.99)$$

Напряженность магнитного поля:

$$H_{C1} = 11,1 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

Средняя длина пути магнитного потока:

$$l_{C1} = \frac{\pi(D_1 + h_{C1})}{4p} + \frac{h_{C1}}{2} = \frac{\pi(309 + 17,61)}{8} + \frac{17,61}{2} = 137 \text{ мм}. \quad (3.100)$$

МДС для станины:

$$F_{C1} = 0,1 \cdot H_{C1} \cdot l_{C1} = 0,1 \cdot 11,1 \cdot 137 = 152,07 \text{ А}. \quad (3.101)$$

Суммарная магнитодвижущая сила магнитной цепи:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= F_{\delta} + F_{32} + F_{C2} + F_{31} + F_{CП} + F_{П1} + F_{C1} = \\ &= 880,88 + 44,78 + 5,15 + 29,28 + 143,45 + 152,07 = 1255,53 \text{ А}. \end{aligned} \quad (3.102)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_{\text{нас}} = \frac{F_{\Sigma}}{(F_{\delta} + F_{П1})} = \frac{1255,53}{880,88 + 143,45} = 1,226 \quad (3.103)$$

3.6 Параллельная обмотка главных полюсов

Отношение магнитодвижущих сил:

$$\frac{F_2}{F_{\Sigma}} = \frac{1254,43}{1255,53} \approx 1.$$

Коэффициент магнитной индукции в зубцах:

$$k_{p2} = 0,13.$$

Размагничивающее действие:

$$F_{p2} = k_{p2} \cdot F_2 = 0,13 \cdot 1254,43 = 163,08 \text{ А.} \quad (3.104)$$

МДС обмотки параллельного возбуждения обмотки главных полюсов:

$$F_{II} = F_{\Sigma} + F_{p2} - F_{\text{пос}} = 1255,53 + 163,08 - 192,25 = 1226,36 \text{ А.} \quad (3.105)$$

Предварительная ширина катушки:

$$b'_{к.п} = 0,12 \cdot D_{H2} = 0,12 \cdot 180 = 21,6 \text{ мм.} \quad (3.106)$$

Средняя длина витка обмотки:

$$l_{ср.п} = 2(l_n + b_n) + \pi(b'_{к.п} + 2b_z + 2b_{и}) = \\ = 2(145 + 47) + 3,14(21,2 + 5) = 466,31 \text{ мм.} \quad (3.107)$$

Для построения характеристики намагничивания машины определяем суммарную МДС для следующих значений магнитного потока: 50%, 75%, 90%, 100%, 110%, 115%. Эти данные сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Сводная таблица для построения зависимости $\Phi = f(F_{\Sigma})$ - характеристики намагничивания машины постоянного тока.

Наименование участка		Зазор между якорем и главным полюсом	Зубцы якоря	Спинка якоря	Сердечник главного полюса	Зазор между главным полюсом станиной	Станина	F_{Σ} , А.	
Средняя длина пути Φ , мм.		1,75	26,34	56	61	0,13	137		
Площадь поперечного сечения участка, мм ²		12812,2	4856	4545,8	6678,8	--	4171		
Коэффициенты		1,04	1,11	---	1,2	---	1,2		
Поток Φ % ($Вб \cdot 10^{-3}$)	50 (3,875)	В	0,302	0,8	0,426	0,696	0,696	0,557	
		Н	---	0,88	0,58	0,9	---	4,5	
		F	439,7	2,32	3,25	5,49	71,83	61,65	584,2
	75 (5,81)	В	0,453	1,2	0,64	1,044	1,044	0,836	
		Н	---	1,41	0,73	1,9	---	7,3	
		F	659,6	3,71	4,09	11,59	107,74	100	886,7
	90 (6,975)	В	0,544	1,44	0,767	1,25	1,25	1,003	
		Н	---	4,1	0,85	3,2	---	9,24	
		F	792,06	10,8	4,76	19,52	129	126,6	1082

	100 (7,75)	B	0,605	1,6	0,852	1,39	1,39	1,11	
		H	---	17	0,93	4,8	---	11,1	
		F	880,88	44,78	5,15	29,28	143,45	152,07	1255
	110 (8,525)	B	0,665	1,76	0,938	1,53	1,53	1,23	
		H	---	54	1,03	7,9	---	13,7	
		F	968,24	142,2	5,768	48,19	157,9	187,7	1510
	115 (8,91)	B	0,696	1,84	0,98	1,6	1,6	1,28	
		H	---	92	1,07	10	---	15,2	
		F	1013,38	242,3	5,992	61	165,12	208,24	1696

Предварительное поперечное сечение провода:

$$S' = \frac{1,15 \cdot m_T \cdot 2p \cdot F_n \cdot l_{cp.n}}{57 \cdot U_B \cdot 10^3} = \frac{1,15 \cdot 1,38 \cdot 4 \cdot 1226,36 \cdot 466}{57 \cdot 220 \cdot 10^3} = 0,29 \text{ мм}^2. \quad (3.108)$$

Принимаем круглый провод марки ПЭТ-155.

Принятое ближайшее стандартное поперечное сечение провода:

$$S = 0,302 \text{ мм}^2.$$

Уточнённый коэффициент запаса:

$$k_{зап} = \frac{1,15 \cdot S}{S'} = \frac{1,15 \cdot 0,302}{0,29} = 1,2. \quad (3.109)$$

Диаметр принятого провода без изоляции:

$$d = 0,62 \text{ мм.}$$

Диаметр принятого провода с изоляцией:

$$d' = 0,675 \text{ мм.}$$

Предварительная плотность тока в обмотке:

$$J'_n = 3,15 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Предварительное количество витков в одной катушке:

$$\omega'_n = \frac{k_{зап} \cdot F_n}{J'_n \cdot S} = \frac{1,2 \cdot 1226,36}{3,15 \cdot 0,302} = 1547. \quad (3.110)$$

Уточнённое количество витков:

$$\omega_n = 1550.$$

Уточнённая плотность тока в обмотке:

$$J_n = \frac{k_{\text{зап}} \cdot F_n}{\omega_n \cdot S} = \frac{1,2 \cdot 1226,36}{1550 \cdot 0,302} = 3,14 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}. \quad (3.111)$$

Сопротивление обмотки при температуре 20°C:

$$r_n = \frac{2p \cdot \omega_n \cdot l_{\text{ср.п}}}{57 \cdot S \cdot 10^3} = \frac{4 \cdot 1550 \cdot 466,31}{57 \cdot 0,302 \cdot 10^3} = 167,95 \text{ Ом}. \quad (3.112)$$

Максимальный ток обмотки:

$$I_{n.\text{max}} = \frac{U_n}{m_T \cdot r_n} = \frac{220}{1,38 \cdot 167,95} = 0,95 \text{ А}. \quad (3.113)$$

Максимальная МДС:

$$F_{n.\text{max}} = I_{n.\text{max}} \cdot \omega_n = 0,95 \cdot 1550 = 1472,5 \text{ А}. \quad (3.114)$$

3.7 Размещение обмоток главных и добавочных полюсов

3.7.1 Параллельная обмотка главных полюсов

Принимаем трапецеидальную форму поперечного сечения катушки с раскладкой витков по средней ширине $N_{\text{Ш}} = 36$ и высоте $N_{\text{В}} = 43$.

Ширина катушки:

$$b_k = 1,05 \cdot N_{\text{Ш}} \cdot d' = 1,05 \cdot 36 \cdot 0,675 = 25,5 \text{ мм}. \quad (3.115)$$

Высота катушки:

$$h_k = 1,05 \cdot N_{\text{В}} \cdot d' = 1,05 \cdot 43 \cdot 0,675 = 30,5 \text{ мм}. \quad (3.116)$$

3.7.2 Стабилизирующая последовательная обмотка

Ширина катушки:

$$b_k = 1,05 \cdot N_{III} \cdot a' = 1,05 \cdot 2,65 \cdot 5 = 14 \text{ мм.} \quad (3.117)$$

Высота катушки:

$$h_k = 1,05 \cdot N_B \cdot b' = 1,05 \cdot 1 \cdot 5,15 = 5,4 \text{ мм.} \quad (3.118)$$

3.7.3 Обмотка добавочных полюсов

Ширина катушки:

$$b_k = 1,05 \cdot N_{III} \cdot a' = 1,05 \cdot 2,65 \cdot 5 = 14 \text{ мм.} \quad (3.119)$$

Высота катушки:

$$h_k = 1,05 \cdot N_B \cdot b' = 1,05 \cdot 8 \cdot 5,15 = 44 \text{ мм.} \quad (3.120)$$

3.8 Щетки и коллектор

Ширина щетки:

$$t = 12,5 \text{ мм.}$$

Длина щетки:

$$a = 16 \text{ мм.}$$

Число перекрытых щеткой коллекторных пластин:

$$\gamma = \frac{t}{t_k} = \frac{12,5}{5,06} = 2,47. \quad (3.121)$$

Укорочение:

$$\varepsilon_k = \frac{K}{2p} - y_1 = \frac{87}{4} - 21 = 0,75. \quad (3.122)$$

Ширина зоны коммутации:

$$b_{3.к} = \frac{\left(\frac{t}{t_k} + N_{ш} - \frac{a}{p} + \varepsilon_k \right) t_k \cdot D_H}{D_k} = \frac{\left(\frac{12,5}{5,06} + 3 - \frac{1}{2} + 0,75 \right) \cdot 5,06 \cdot 180}{140} = \quad (3.123)$$

$$= 37,215 \text{ мм.}$$

Критерий выбора ширины щетки:

$$k_{3.к} = \frac{b_{3.к}}{\tau - b_{н.п}} = \frac{37,215}{141,37 - 89} = 0,71. \quad (3.124)$$

Контактная площадь одной щетки:

$$S_{щ} = t \cdot a = 12,5 \cdot 16 = 200 \text{ мм}^2. \quad (3.125)$$

Необходимая контактная площадь всех щеток:

$$S'_{щ\Sigma} = \frac{2I_2 \cdot 10^2}{J'_{щ}} = \frac{2 \cdot 38,45 \cdot 10^2}{8} = 961,25 \text{ мм}^2, \quad (3.126)$$

где $J'_{щ} = 8 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ - плотность тока;

Количество щеток на одном бражете:

$$N'_{щ.б} = \frac{S'_{щ\Sigma}}{2p \cdot S_{щ}} = \frac{961,25}{4 \cdot 200} = 1,2. \quad (3.127)$$

Уточнённое количество щеток на одном бражете:

$$N_{щ.б} = 2.$$

Уточнённая контактная площадь всех щеток:

$$S_{щ\Sigma} = N_{щ\Sigma} \cdot 2p \cdot S_{щ} = 2 \cdot 4 \cdot 200 = 1600 \text{ мм}^2. \quad (3.128)$$

Уточнённая плотность тока под щетками:

$$J_{щ} = \frac{2I_2 \cdot 10^2}{S_{щ\Sigma}} = \frac{2 \cdot 38,45 \cdot 10^2}{1600} = 4,8 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}. \quad (3.129)$$

Активная длина коллектора:

$$l_k = N_{ш,б} \cdot (a + 8) + 10 = 2 \cdot (16 + 8) + 10 = 58 \text{ мм.} \quad (3.130)$$

Окружная скорость коллектора при номинальной частоте вращения:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{ном}}{60000} = \frac{3,14 \cdot 140 \cdot 1500}{60000} = 11 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (3.131)$$

3.9 Коммутационные параметры

Проводимость рассеяния овального полузакрытого паза:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Pi 2} &= 0,6 \frac{h_2}{2r_2} + \frac{h_2}{b_2} + \frac{l_2}{l_2} + \frac{2,5 \cdot 10^6}{\omega_{c2} \cdot l_2 \cdot A_2 \cdot v_2} \cdot \frac{a}{p} = \\ &= 0,6 \frac{27}{2 \cdot 3,29} + \frac{0,8}{3,005} + \frac{189}{145} + \frac{2,5 \cdot 10^6}{3 \cdot 145 \cdot 177,47 \cdot 14,13} \cdot \frac{1}{2} = 5,18. \end{aligned} \quad (3.132)$$

Окружная скорость якоря:

$$v_{2max} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n}{60000} = \frac{3,14 \cdot 180 \cdot 3000}{60000} = 28,27 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (3.133)$$

Реактивная ЭДС коммутируемой секции:

$$\begin{aligned} E_p &= 2 \cdot \omega_{c2} \cdot l_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot \lambda_{\Pi 2} \cdot 10^{-7} = 2 \cdot 3 \cdot 145 \cdot 177,47 \cdot 14,13 \cdot 5,18 \cdot 10^{-7} = \\ &= 1,13 \text{ В.} \end{aligned} \quad (3.134)$$

Среднее значение магнитной индукции в зазоре под добавочным полюсом:

$$B_{\delta д} = \lambda_{\Pi 2} \cdot A_2 \cdot 10^{-4} = 5,18 \cdot 177,47 \cdot 10^{-4} = 0,092 \text{ Тл.} \quad (3.135)$$

Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря:

$$k_{\delta_{д2}} = 1 + \frac{b_{ш2}}{t_2 - b_{ш2} + 5 \frac{\delta \cdot t_2}{b_{ш2}}} = 1 + \frac{3,005}{19,5 - 3,005 + \frac{5 \cdot 3,75 \cdot 19,5}{3,005}} = 1,02. \quad (3.136)$$

Общий коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta_{д}} = k_{\delta_{д2}} \cdot k_{\delta_{д}} \cdot k_{к_{д}} = 1,02. \quad (3.137)$$

Необходимый зазор под добавочным полюсом:

$$\delta_{д} = \frac{F_{д} + F_1 - F_2}{0,08 \cdot B_{\delta_{д}} \cdot k_{\delta_{д}}} = \frac{1576,45 - 1254,43}{0,08 \cdot 0,092 \cdot 1,02} = 4,3 \text{ мм}. \quad (3.138)$$

Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря:

$$k_{\delta_{д2}} = 1 + \frac{b_{ш2}}{t_2 - b_{ш2} + 5 \frac{\delta_{д} \cdot t_2}{b_{ш2}}} = 1 + \frac{3,005}{19,5 - 3,005 + \frac{5 \cdot 4,3 \cdot 19,5}{3,005}} = 1,02. \quad (3.139)$$

Общий коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta_{д}} = 1,02.$$

Необходимый зазор под добавочным полюсом:

$$\delta_{д} = 4,3 \text{ мм}.$$

Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом при номинальной нагрузке:

$$\Phi_{\delta_{д}} = b_{з.к} \cdot I_{н.д} \cdot B_{\delta_{д}} \cdot 10^{-6} = 37,215 \cdot 145 \cdot 0,092 \cdot 10^{-6} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}. \quad (3.140)$$

Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом при перегрузке:

$$\Phi'_{\delta_{д}} = \Phi_{\delta_{д}} \frac{I_{\max}}{I_{н}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}. \quad (3.141)$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при номинальной нагрузке:

$$\Phi_{\text{д}} = \sigma_{\text{д}} \cdot \Phi_{\delta\text{д}} = 3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (3.142)$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при перегрузке:

$$\Phi'_{\text{д}} = \Phi_{\text{д}} \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{н}}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (3.143)$$

Площадь поперечного сечения сердечника добавочного полюса:

$$S_{\text{д}} = b'_{\text{д}} \cdot l_{\text{д}} \cdot k_{\text{с}} = 22 \cdot 135 \cdot 0,98 = 2910 \text{ мм}^2. \quad (3.144)$$

Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса при перегрузке:

$$B_{\text{д}} = \frac{\Phi'_{\text{д}} \cdot 10^6}{S_{\text{д}}} = \frac{2,25 \cdot 10^3}{2910} = 0,773 \text{ Тл.} \quad (3.145)$$

Расчетная магнитная индукция на участках станины, в которых суммируются магнитные потоки главного и добавочного полюсов:

$$B''_{\text{с1}} = \frac{\sigma \cdot \Phi + \Phi'_{\text{д}}}{2S_{\text{с1}}} \cdot 10^6 = \frac{1,2 \cdot 7,75 \cdot 10^{-3} + 2,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4171,63} \cdot 10^6 = 1,41 \text{ Тл.} \quad (3.146)$$

Принятая величина магнитной индукции:

$$B''_{\text{с1}} = 1,6 \text{ Тл.}$$

Расчетная магнитная индукция на участках спинки якоря, в которых суммируются магнитные потоки главного и добавочного полюсов:

$$B''_{\text{с2}} = \frac{\Phi + \Phi'_{\delta\text{д}}}{2S_{\text{с2}}} \cdot 10^6 = \frac{7,75 \cdot 10^{-3} + 0,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4545,75} \cdot 10^6 = 0,935 \text{ Тл.} \quad (3.147)$$

Принятое значение магнитной индукции:

$$B''_{\text{с2}} = 1,7 \text{ Тл.}$$

3.10 Номинальный режим

Масса стали зубцов якоря с овальными полужакрытыми пазами:

$$\begin{aligned}
T_{3.2} &= 7,8 \cdot z_2 \cdot b_{3.2} \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) l_{\text{эф}2} \cdot 10^{-6} = \\
&= 7,8 \cdot 29 \cdot 7,78 \left(17,7 + \frac{5,21 + 3,29}{2} \right) 137,75 \cdot 10^{-6} = 5,32 \text{ кг.}
\end{aligned}
\tag{3.148}$$

Магнитные потери в зубцах:

$$P_{3.2} = 2,3 \cdot p_{\frac{1,0}{50}} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \cdot B_{3.2}^2 \cdot T_{3.2} = 2,3 \cdot 2,5 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot 1,6^2 \cdot 5,32 = 78,31 \text{ Вт.}
\tag{3.149}$$

где $p_{\frac{1,0}{50}} = 2,5$ - удельные магнитные потери; $\beta = 1,5$;

Масса стали спинки якоря:

$$\begin{aligned}
m_{C2} &= 7,8 \left\{ \frac{\pi \left[(D_{H2} - 2h_{П2})^2 - D_2^2 \right]}{4} - 0,785 \cdot n_k \cdot d_k^2 \right\} l_{\text{эф}2} \cdot 10^{-6} = \\
&= 7,8 \left\{ \frac{\pi \left[(180 - 2 \cdot 27)^2 - 60^2 \right]}{4} \right\} \cdot 137,75 \cdot 10^{-6} = 10,4 \text{ кг.}
\end{aligned}
\tag{3.150}$$

Магнитные потери в спинке якоря:

$$P_{C2} = 2,3 \cdot p_{\frac{1,0}{50}} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \cdot B_{C2}^2 \cdot T_{C2} = 2,3 \cdot 2,5 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot 0,852^2 \cdot 10,4 = 43,4 \text{ Вт.}
\tag{3.151}$$

Суммарные магнитные потери в стали:

$$P_{C\Sigma} = P_{3.2} + P_{C2} = 78,31 + 43,4 = 121,71 \text{ Вт.}
\tag{3.152}$$

Потери на трение щеток о коллектор:

$$P_{\text{Тщ}} = 5 \cdot S_{\text{щ}\Sigma} \cdot v_k \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 1600 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 88 \text{ Вт.}
\tag{3.153}$$

Потери на трение подшипников, трение о воздух и на вентиляцию машины:

$$P_{\text{ТП}} + P_{\text{всн}} = 2200 \cdot D_{\text{Н2}}^{3,6} \left(\frac{\Pi}{1500} \right)^2 \cdot 10^{-9} = 2200 \cdot 180^{3,6} \left(\frac{1500}{1500} \right)^2 \cdot 10^{-9} = 289,33 \text{ Вт.}$$

(3.154)

Суммарные механические потери:

$$P_{\text{мх.}\Sigma} = P_{\text{Тщ}} + P_{\text{ТП}} + P_{\text{всн}} = 88 + 289,33 = 377,33 \text{ Вт.} \quad (3.155)$$

Добавочные потери у некомпенсированного двигателя:

$$P_{\text{Д}} = \frac{0,01 \cdot P_2}{\eta} = \frac{0,01 \cdot 7500}{0,86} = 87 \text{ Вт.} \quad (3.156)$$

Электромагнитная мощность двигателя:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{Н2}} + P_{\text{С}\Sigma} + P_{\text{мх}\Sigma} + P_{\text{Д}} = 7500 + 121,71 + 377,33 + 87 = 8086 \text{ Вт.} \quad (3.157)$$

ЭДС якоря двигателя:

$$E_2 = \frac{U - \Delta U_{\text{щ}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{U - \Delta U_{\text{щ}}}{2} \right)^2 - P_{\text{эм}} \cdot m_{\text{T}} r_{2\Sigma}} =$$

$$= \frac{220 - 2}{2} + \sqrt{\left(\frac{220 - 2}{2} \right)^2 - 8086 \cdot 0,407} = 201,7 \text{ В.} \quad (3.158)$$

Ток якоря двигателя:

$$I_2 = \frac{P_{\text{эм}}}{E_2} = \frac{8086}{201,7} = 40,1 \text{ А.} \quad (3.159)$$

Уточнённый ток двигателя:

$$I = I_2 + I_{\text{n.max}} = 40,1 + 0,95 = 41,05 \text{ А.} \quad (3.160)$$

Подводимая мощность двигателя:

$$P_1 = U \cdot I = 220 \cdot 41,05 = 9031 \text{ Вт.} \quad (3.161)$$

Суммарные потери в двигателе:

$$P_{\Sigma} = P_1 - P_2 = 9031 - 7500 = 1531 \text{ Вт.} \quad (3.162)$$

Коэффициент полезного действия машины:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{7500}{9031} = 0,83. \quad (3.163)$$

Уточнённый магнитный поток:

$$\Phi = \frac{30E_2}{\left(\frac{p}{a}\right)_{\Pi} \cdot \omega_2} = \frac{30 \cdot 201,7}{\frac{2}{1} \cdot 1500 \cdot 261} = 7,73 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (3.164)$$

МДС магнитной цепи двигателя:

$$F_{\Sigma} = 1330 \text{ А.}$$

Размагничивающее действие МДС якоря двигателя:

$$F_{p2} = k_{p2} \cdot F_2 = 163,08 \text{ А.}$$

МДС последовательной стабилизирующей обмотки двигателя:

$$F_{\text{пос}} = \frac{\omega_{\text{пос}} \cdot I_2}{a_{\text{пос}}} = \frac{5 \cdot 40,1}{1} = 200,5 \text{ А.} \quad (3.165)$$

Необходимая МДС параллельной или независимой обмотки главных полюсов двигателя:

$$F_n = F_{\Sigma} + F_{p2} - F_{\text{пос}} = 1330 + 163,08 - 200,5 = 1292,6 \text{ А.} \quad (3.166)$$

Момент вращения на валу двигателя:

$$M_2 = \frac{9,55 \cdot P_2}{n} = \frac{9,55 \cdot 7500}{1500} = 47,75 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (3.167)$$

3.11 Рабочие характеристик двигателя постоянного тока

К основным рабочим характеристикам относятся зависимости: $n = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $I = f(P_2)$. Для упрощения расчета примем коэффициент нагрузки:

$$k = \frac{I_2}{I_{2H}},$$

и присвоим ему значения 0,1; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25. Для каждого произведения коэффициента нагрузки на величину механической мощности вала рассчитаем рабочие характеристики:

Таблица 3.2 - Рабочие характеристики двигателя постоянного тока

Условные обозначения	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25
k	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$I_2 = k \cdot I_{2H}, A$	4,01	10,025	20,05	30,075	40,1	50,12
E_2, B	216,37	213,92	209,8	205,76	201,7	197,6
$F_{p2} = k \cdot F_{p2H}, A$	16,308	40,77	81,54	122,31	163,1	203,8
$F_{\text{пос}} = k \cdot F_{\text{посH}}, A$	20,05	50,125	100,3	150,38	200,5	250,6

Продолжение таблицы 3.2

$F_{\Sigma} = F_n + F_{\text{пос}} - F_{p2}, A$	1296,3	1302	1311	1320,7	1330	1339
$\Phi \cdot 10^{-3}, Bб$	7,61	7,63	7,66	7,7	7,75	7,76
$\Pi = \frac{30 \cdot E_2}{\frac{p}{a} \cdot \omega_2 \cdot \Phi}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	1634	1611,3	1574	1535,8	1500	1463
I, A	4,96	10,98	21	31,03	41,05	51,08
$P_1, Bт$	1091	2414,5	4620	6825,5	9031	11236
$P_{\text{эм}} = E_2 \cdot I_2, Bт$	867,6	2144,5	4207	6188,2	8087	9904
$P_d = k^2 \cdot P_{dH}, Bт$	0,87	5,44	21,75	48,94	87	135,9
$P_2 = P_{\text{эм}} - P_{\text{сз}} - P_{\text{мхз}} - P_d$	367,7	1640	3686	5640	7500	9270
$P_{\Sigma} = P_1 - P_2, Bт$	723,3	774,5	933,5	1185	1531	1967
$\eta, \text{о. е.}$	0,337	0,679	0,798	0,826	0,83	0,825
$M_2, H \cdot м$	2,15	9,72	22,36	35,07	47,75	60,49

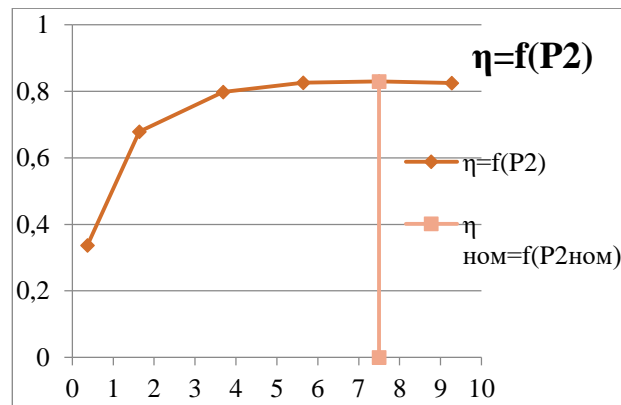


Рисунок 3.18 – График зависимости КПД от номинальной мощности (P_2)

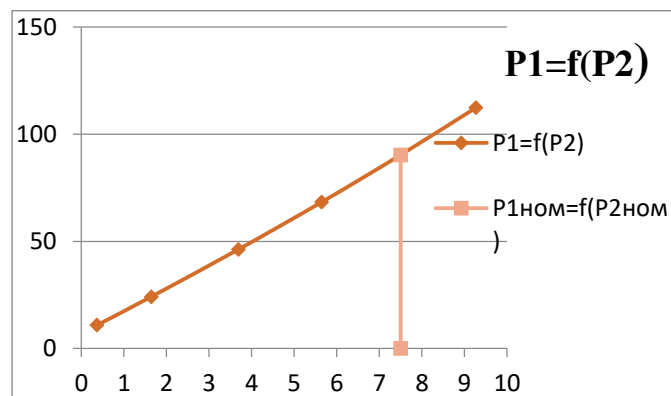


Рисунок 3.19 – График зависимости потребляемой мощности ($P_{1н}$) от номинальной мощности (P_2)

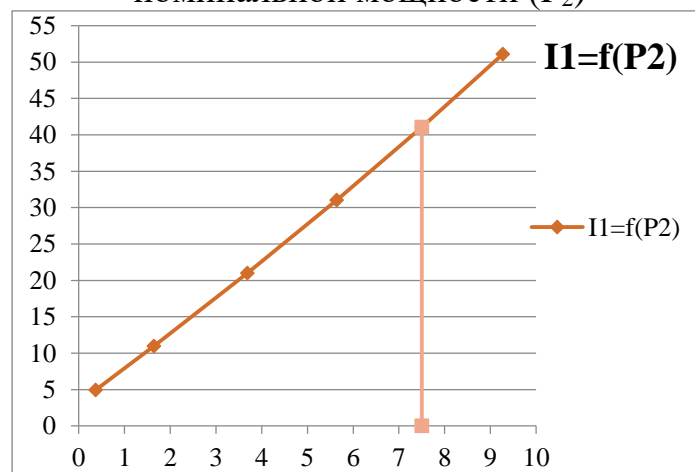


Рисунок 3.20 – График зависимости номинального тока (I_1) от номинальной мощности (P_2)

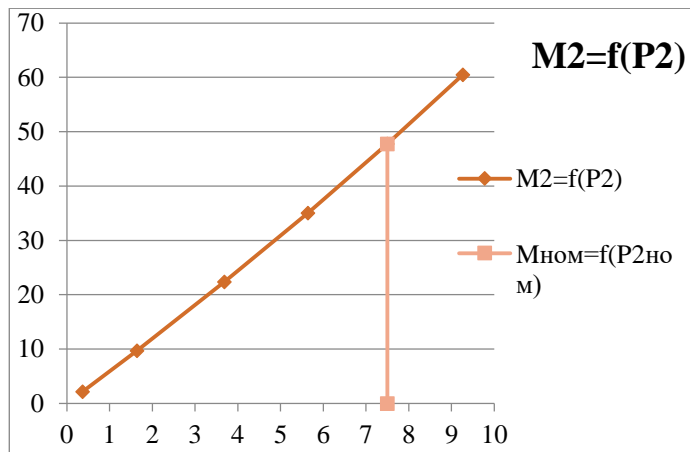


Рисунок 3.21 – График зависимости вращающего момента (M_2) от номинальной мощности (P_2)

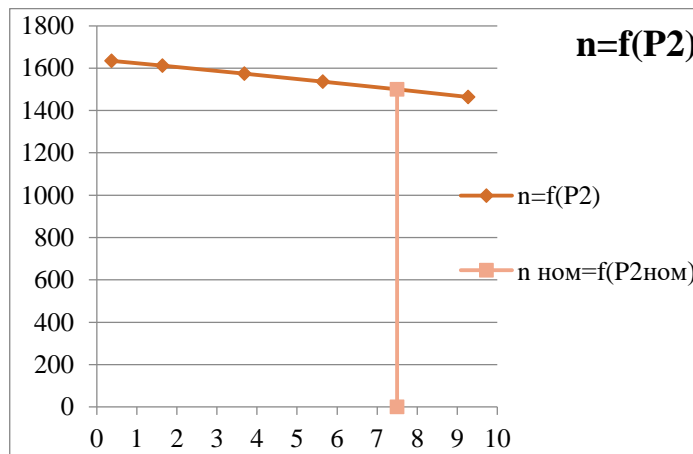


Рисунок 3.22 – График зависимости скорости вращения ротора (n) от номинальной мощности (P_2)

После построения рабочих характеристик на оси абсцисс откладывается номинальная мощность (точка А), через точку А проводится параллельно оси ординат линия АВ, точками пересечения линии АВ с кривыми рабочих характеристик и определяются номинальные значения потребляемой мощности $P_{1н}$, тока $I_{1н}$, вращающего момента $M_{2н}$, коэффициента полезного действия, скорости вращения ротора n_n и скольжения S_n .

Аналогично по разработанной программе “MathCad” произведем расчет двигателей мощностью 10; 15 кВт со скоростью вращения $n = 1500$ об/мин., 10; 11; 15; 18,5 кВт со скоростью вращения $n = 2200$ об/мин. и 11; 15; 18,5; 22 кВт со скоростью вращения $n = 3000$ об/мин.

Результаты расчета сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета параметров двигателей в диапазоне мощности 7,5 – 22 кВт.

Мощность	P_n , кВт	11	11	11	15	15	18,5

Высота оси вращения	h, мм	160	160	132	160	160	160
Диаметр якоря	D, мм	195	195	138	195	195	195
Напряжение	U, В	220	220	220	220	220	220
Номинальный ток	I _н , А	58,14	58,8	58,8	79,3	79,3	79,3
Частота вращения	n, об/мин	1500	2200	3000	2200	3000	3000
КПД	η, %	0,87	0,87	0,86	0,87	0,87	0,87
Вращающий момент	M _н , Н·м	77,7	53,08	37,43	69,8	50,22	50,48
Воздушный зазор	δ, м	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,15 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,19 \cdot 10^{-2}$	$0,18 \cdot 10^{-2}$	$0,2 \cdot 10^{-2}$
Воздушный зазор под добавочным полюсом	δ _д	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Главный полюс							
Ширина сердечника полюса	b _г , м	$6,85 \cdot 10^{-2}$	$6,85 \cdot 10^{-2}$	$4,54 \cdot 10^{-2}$	$6,85 \cdot 10^{-2}$	$6,85 \cdot 10^{-2}$	$6,85 \cdot 10^{-2}$
Добавочный полюс							
Количество витков на полюс	W _д	31	32	21	29	29	26
Сопrotивление обмотки при t = 75	R _{д75}	0,082	0,07	0,067	0,046	0,031	0,037
Якорь							
Количество витков	W	72	76	72	92	88	80
Количество пазов	Z	36	38	36	46	44	40
Длина сердечника	L _г , м	0,15	0,097	0,193	0,12	0,092	0,102
Обмотка якоря							
Тип	Простая волновая обмотка						

Продолжение таблицы 3.3

Количество параллельных ветвей	a	1	1	1	1	1	1
Сопrotивление обмотки при t = 75	R _в , Ом	88	103,2	140,2	89,13	113,8	118
Коллектор							
Диаметр	d _к , м	0,14	0,14	0,1	0,14	0,14	0,14
Длина	l _к , м	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$
Количество пластин	к	72	76	72	92	88	80

В таблице 3.4 приведены основные результаты расчета участка серии от 7,5 кВт до 22 кВт.

Таблица 3.4 – Основные параметры участка серии

h, мм	D _{H2} , мм	P ₂ , кВт, при n, об/мин			η при n, об/мин			$\lambda = \frac{l_2}{D_{H2}}$			L ₂ , мм при n, об/мин		
		300 0	220 0	150 0	3000	2200	1500	3000	2200	1500	300 0	220 0	150 0
132	138	11	10	7,5	0,85 6	0,866	0,85 8	1,4	1,66	1,83	193	221	242
160	195	15	11	10	0,86 7	0,87 4	0,86 4	0,50 1	0,50 5	0,66 9	92	97	132
160	195	18,5	15	11	0,88	0,87 3	0,87 2	0,59 6	0,65 3	0,73 5	115	120	150
180	195	22	18,5	15	0,88 2	0,88	0,87 2	0,73 5	0,84 3	0,95 7	128	139	177

Для каждой машины могут быть выбраны наиболее выгодные главные размеры, обеспечивающие экономичность машины. Однако требования облегчения производства диктуют необходимость унификации возможно большего количества деталей и узлов и, в частности, размеров активной стали. Поэтому при проектировании серии машин соседние типоразмеры базируются на одинаковых диаметрах с применением разных длин сердечников. Так, например, как видно из таблицы 2, машины с высотой вращения $h = 160$ мм спроектированы диаметрами якоря $D = 195$ мм при различных длинах на мощности 10, 11, 15, 18.5, 22 кВт и скорости вращения: 3000, 2200, 1500 об/мин. Это дает возможность при массовом серийном производстве унифицировать сборочные единицы и детали, такие, например, как подшипниковые щиты, подшипники, крышки подшипников, валы, коллекторы, щетки, щеткодержатели, вводные устройства и т.п. Это уменьшает номенклатуру и увеличивает количество одинаковых изделий в партиях, что весьма благоприятно сказывается на повышении показателей технологичности конструкций. Одноименные детали двигателей соседних высот оси вращения или даже соседних участков серии должны иметь принципиально одинаковую конструкцию для облегчения перестройки автоматических поточных линий и агрегатных станков. Для машин на одно и тоже число пар полюсов размеры остаются одинаковыми. Однако зубцовая зона якоря может измениться, что связано с условиями коммутации.

В сериях малых и средних машин наиболее часто применяются две длины сердечника на диаметр. Большое количество длин диаметр влечет за собой значительное отступление от наиболее выгодных размеров машины. Очевидно, что для коротких машин мы получим плохое использование материалов: не будут использованы по длине корпус статора (станина), вал, подшипниковые щиты, а также размеры пазов статора независимо от его длины

и напряжения машины. Длинные машины по расходу материалов получаются более дешевыми, так как в таких машинах несколько лучше используется обмоточная медь, чем в коротких машинах, и, кроме того, их несущие (конструктивные) части получаются более легкими. Но при этом ухудшаются

условия коммутации из-за возрастания реактивной ЭДС. в коммутируемых секциях; ухудшаются также условия охлаждения, что валов, подшипники, коллекторы, обмоткодержатели, значительно сокращается количество мерительного инструмента, технологической оснастки.

3.12 Регулирование частоты вращения

3.12.1 Регулирование частоты вращения вверх

Магнитный поток при наибольшей частоте вращения:

$$\Phi_{\min} = \frac{\Phi_{\text{H}} \cdot \Pi_{\text{H}}}{\Pi_{\max}} = \frac{7,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1500}{3000} = 3,87 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (3.168)$$

МДС при минимальном магнитном потоке:

$$F_{\Sigma \min} = 573 \text{ А.}$$

Минимальный ток возбуждения:

$$I_{\Pi \min} = \frac{F_{\Sigma \min}}{\omega_{\Pi}} = \frac{573}{1550} = 0,37 \text{ А.} \quad (3.169)$$

Максимальная величина регулирующего сопротивления:

$$r_p = 1,3 \left(\frac{U}{I_{\Pi \min}} - r_{\Pi} \right) = 1,3 \left(\frac{220}{0,37} - 167,95 \right) = 554,6 \text{ Ом.} \quad (3.170)$$

Частота вращения при холостом ходе:

$$n_{\text{оmax}} = \frac{30(U-2)}{\left(\frac{p}{a}\right) \Phi_{\text{min}} \cdot \omega_2} = \frac{30(220-2)}{\frac{2}{1} \cdot 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot 261} = 3237 \frac{\text{об}}{\text{мин}}. \quad (3.171)$$

3.12.2 Регулирование частоты вращения вниз

Допустимый момент вращения на валу при наименьшей частоте вращения двигателя с самовентиляцией:

$$M_2 = 0,81 \cdot 47,75 = 38,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.172)$$

Магнитный поток при n_{min} у двигателя с самовентиляцией:

$$\Phi = \sqrt{\frac{M_2}{M_{2H}}} \cdot \Phi_H = \sqrt{0,81} \cdot 7,75 \cdot 10^{-3} = 6,97 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}. \quad (3.173)$$

Ток якоря при n_{min} у двигателя с самовентиляцией:

$$I_2 = \sqrt{\frac{M_2}{M_{2H}}} \cdot I_{2H} = \sqrt{0,81} \cdot 40,1 = 36,09 \text{ А}. \quad (3.174)$$

ЭДС при n_{min} :

$$E_{2\text{min}} = \frac{\Phi \cdot \frac{p}{a} \cdot n_{\text{min}} \cdot \omega_2}{30} = \frac{6,97 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 500 \cdot 261}{30} = 60,63 \text{ В}. \quad (3.175)$$

Напряжение на якоре при n_{min} :

$$U_{\text{min}} = E_{2\text{min}} + I_2 \cdot m_T r_{2\Sigma} + \Delta U_{\text{щ}} = 60,63 + 36,09 \cdot 0,407 + 2 = 77,3 \text{ В}. \quad (3.176)$$

Результирующая МДС при n_{min} :

$$F_{\Sigma\text{min}} = 1090 \text{ А}.$$

Размагничивающая МДС реакции якоря:

$$F_{p2} = \frac{I_2}{I_{2H}} \cdot F_{p2H} = \sqrt{0,81} \cdot 163,08 = 146,8 \text{ А}. \quad (3.177)$$

МДС стабилизирующей обмотки:

$$F_{\text{noc}} = \frac{I_2}{I_{2H}} \cdot F_{\text{noc.H}} = \sqrt{0,81} \cdot 200,5 = 180,45 \text{ А.} \quad (3.178)$$

МДС обмотки возбуждения главных полюсов:

$$F_{\Pi\text{min}} = F_{\Sigma\text{min}} + F_{p2} - F_{\text{noc}} = 1090 + 146,8 - 180,45 = 1056,4 \text{ А.} \quad (3.179)$$

Ток обмотки возбуждения:

$$I_{\Pi\text{min}} = \frac{F_{\Pi\text{min}}}{\omega_{\Pi}} = \frac{573}{1550} = 0,37 \text{ А.} \quad (3.180)$$

Максимальная величина регулирующего сопротивления:

$$r_p = 1,3 \left(\frac{U_{\Pi}}{I_{\text{min}}} - r_{\Pi} \right) = 1,3 \left(\frac{220}{0,68} - 167,95 \right) = 202,3 \text{ Ом.} \quad (3.181)$$

3.13 Тепловой расчет и вентиляционный расчет

3.13.1 Тепловой расчет машины постоянного тока

Коэффициент повышения температуры элементов электрической машины в зависимости от класса нагревостойкости:

$$m'_T = 1,48.$$

Коэффициент потерь, нагревающих воздух внутри машины и ее элементы в зависимости от степени защиты и способа охлаждения:

$$k = 0,9.$$

3.13.2 Потери в обмотках и контактах щеток

Потери в обмотке якоря:

$$P'_{M2} = I_2^2 \cdot m'_T r_2 = 38,45^2 \cdot 1,48 \cdot 0,186 = 407 \text{ Вт.} \quad (3.182)$$

Потери в обмотке добавочных полюсов:

$$P'_{\text{МД}} = I_2^2 \cdot m_T r_{\text{Д}} = 38,45^2 \cdot 1,48 \cdot 0,0957 = 209,4 \text{ Вт.} \quad (3.183)$$

Потери в стабилизирующей последовательной обмотке:

$$P'_{\text{Мпос}} = I_2^2 \cdot m_T r_{\text{пос}} = 38,45^2 \cdot 1,48 \cdot 0,0134 = 29,3 \text{ Вт.} \quad (3.184)$$

Потери в параллельной или независимой обмотке главных полюсов:

$$P_{\text{М.П}} = U_{\text{П}} \cdot I_{\text{Пmax}} = 220 \cdot 0,95 = 209 \text{ Вт.} \quad (3.185)$$

Потери в контактах щеток:

$$P_{\text{кщ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_2 = 2 \cdot 38,45 = 76,9 \text{ Вт.} \quad (3.186)$$

3.13.3 Обмотка якоря

Условная поверхность охлаждения активной части якоря:

$$S_{\text{П2}} = (\pi D_{\text{Н2}} + n_{\text{Н2}} \cdot d_{\text{к2}}) l_2 = 3,14 \cdot 180 \cdot 145 = 0,82 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (3.187)$$

Условный периметр поперечного сечения овального полузакрытого паза:

$$\Pi_2 = \pi(r_1 + r_2) + 2h_1 = 3,14(5,21 + 3,29) + 2 \cdot 17,7 = 62,1 \text{ мм.} \quad (3.188)$$

Условная поверхность охлаждения пазов:

$$S_{\text{иП2}} = z_2 \cdot l_2 \cdot \Pi_2 = 29 \cdot 62,1 \cdot 145 = 2,61 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (3.189)$$

Условная поверхность охлаждения лобовых частей обмотки:

$$S_{\text{Л2}} = 2\pi \cdot D_{\text{Н2}} \cdot l_{\text{В2}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 180 \cdot 53,9 = 0,61 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (3.190)$$

Условная поверхность охлаждения машины:

$$S_{\text{маш}} = \pi D_{\text{Н1}} \cdot (l_2 + 2l_{\text{В2}}) = 3,14 \cdot 345 \cdot (145 + 2 \cdot 53,9) = 2,74 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (3.191)$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и от потерь в стали, отнесенных к поверхности охлаждения активной части якоря:

$$p_{\Pi 2} = \frac{P'_{M2} \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{cp2}} + P_{CS}}{S_{\Pi 2}} = \frac{407 \cdot \frac{2 \cdot 145}{668} + 121,71}{0,82 \cdot 10^5} = 364 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}. \quad (3.192)$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения пазов:

$$p_{и\Pi 2} = \frac{P'_{M2} \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{cp2}}}{S_{и\Pi 2}} = \frac{407 \cdot \frac{2 \cdot 145}{668}}{2,61 \cdot 10^5} = 67,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}. \quad (3.193)$$

Удельный тепловой поток от потерь в лобовых частях обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки:

$$p_{л2} = \frac{P'_{M2} \cdot \frac{2 \cdot l_{л2}}{l_{cp2}}}{S_{л2}} = \frac{407 \cdot \frac{2 \cdot 189}{668}}{0,61 \cdot 10^5} = 378 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}. \quad (3.194)$$

Окружная скорость якоря при номинальной частоте вращения:

$$v_{2H} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n}{60000} = \frac{3,14 \cdot 180 \cdot 1500}{60000} = 14,14 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (3.195)$$

Превышение температуры поверхности активной части якоря над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta t_{\Pi 2} = \frac{p_{\Pi 2}}{\alpha_2} = \frac{364 \cdot 10^{-5}}{9 \cdot 10^{-5}} = 40,4^\circ\text{C}. \quad (3.196)$$

Перепад температуры в изоляции паза и проводов:

$$\Delta t_{и\Pi 2} = p_{и\Pi 2} \left(\frac{b_{и2}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{r_1 + r_2}{8 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 6,67 \cdot 10^{-5} \left(\frac{0,5}{16 \cdot 10^{-5}} + \frac{5,21 + 3,29}{8 \cdot 112,5 \cdot 10^{-5}} \right) = 2,75^\circ\text{C}. \quad (3.197)$$

где $\lambda_{\text{эКВ}} = 16 \cdot 10^{-5}$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции в пазу;

$\lambda'_{\text{эКВ}} = 112,5 \cdot 10^{-5}$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушек;

$b_{и2} = 0,5$ - односторонняя толщина изоляции в пазу якоря.

Превышение температуры поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta t_{л2} = \frac{p_{л2}}{\alpha_2} = \frac{378 \cdot 10^{-5}}{9 \cdot 10^{-5}} = 42^\circ\text{C}. \quad (3.198)$$

Перепад температуры в изоляции катушек и проводов лобовых частей обмотки:

$$\Delta t_{иЛ2} = p_{л2} \left(\frac{b_{иЛ2}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{h_{П2}}{8 \cdot \lambda'_{эКВ}} \right) = 378 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{27}{8 \cdot 112,5 \cdot 10^{-5}} = 11,34^\circ\text{C}. \quad (3.199)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины:

$$\begin{aligned} \Delta t'_2 &= (\Delta t_{П2} + \Delta t_{иП2}) \frac{2l_2}{l_{ср2}} + (\Delta t_{л2} + \Delta t_{иЛ2}) \frac{2l_{л2}}{l_{ср2}} = \\ &= (40,4 + 2,75) \frac{2 \cdot 145}{668} + (42 + 11,34) \frac{2 \cdot 189}{668} = 48,9^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (3.200)$$

Сумма потерь в машине:

$$\begin{aligned} P'_\Sigma &= P'_{М2} + k(P'_{Мд} + P'_{м.пос} + P'_M) + P'_{кш} + P'_{ГЦ} + 0,1(P'_{ТП} + P'_{вен}) + P'_{С\Sigma} + P'_D = \\ &= 407 + 0,7(209,4 + 29,3 + 209) + 76,9 + 88 + 0,1(289,33) + 121,71 + 87 = 1123\text{Вт}. \end{aligned} \quad (3.201)$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха:

$$\Delta t_B = \frac{P'_\Sigma}{\alpha_B \cdot S_{маш}} = \frac{1123}{11 \cdot 10^{-5} \cdot 2,74 \cdot 10^5} = 37,3^\circ\text{C}. \quad (3.202)$$

где $\alpha_B = 11 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot \text{град}}$ - коэффициент подогрева воздуха.

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой наружного охлаждающего воздуха:

$$\Delta t_2 = \Delta t'_2 + \Delta t_B = 48,9 + 37,3 = 86,2^\circ\text{C}. \quad (3.203)$$

3.13.4 Обмотка добавочных полюсов

Условная поверхность охлаждения многослойных катушек из изолированных проводов:

$$S_{\text{д}} = 2p_{\text{д}} \cdot l_{\text{ср.д}} \cdot \Pi_{\text{д}} = 4 \cdot 397,57 \cdot 71,4 = 1,14 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (3.204)$$

где $\Pi_{\text{д}} = 12 + 0,33D_{\text{н2}} = 71,4$ - периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки.

Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесенных к поверхности охлаждения обмотки:

$$p_{\text{д}} = \frac{k \cdot p'_{\text{мд}}}{S_{\text{д}}} = \frac{0,7 \cdot 209,4}{1,14 \cdot 10^5} = 128,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}. \quad (3.205)$$

Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta t_{\text{пд}} = \frac{p_{\text{д}}}{\alpha_1} = \frac{128,6 \cdot 10^{-5}}{4,8 \cdot 10^{-5}} = 26,8^\circ\text{C}. \quad (3.206)$$

Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции многослойных катушек обмотки из изолированных проводов:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{ид}} &= p_{\text{д}} \left(\frac{b_{\text{ид}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_{\text{кд}}}{8 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 128,6 \cdot 10^{-5} \left(\frac{0,2}{16 \cdot 10^{-5}} + \frac{21,6}{8 \cdot 112,5 \cdot 10^{-5}} \right) = \\ &= 4,7^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (3.207)$$

где $b_{\text{ид}} = 0,2$ мм - односторонняя толщина наружной изоляции катушки.

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta t'_{\text{д}} = \Delta t_{\text{пд}} + \Delta t_{\text{ид}} = 26,8 + 4,7 = 31,5^\circ\text{C}. \quad (3.208)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха:

$$\Delta t_{\text{д}} = \Delta t'_{\text{д}} + \Delta t_{\text{в}} = 31,5 + 37,3 = 68,8^\circ\text{C}. \quad (3.209)$$

3.13.5 Параллельная обмотка главных полюсов

Условная поверхность охлаждения всех катушек:

$$S_{\Pi} = 2p \cdot l_{\text{ср.п}} \cdot \Pi_{\Pi} = 4 \cdot 466,31 \cdot 62,2 = 1,16 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (3.210)$$

где $\Pi_{\Pi} = 37 + 0,14D_{H2} = 62,2$ - периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки.

Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесенных к поверхности охлаждения обмотки:

$$p_{\Pi} = \frac{k \cdot p_{\text{МП}}}{S_{\Pi}} = \frac{0,7 \cdot 209}{1,16 \cdot 10^5} = 126,12 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}. \quad (3.211)$$

Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta t_{\text{III}} = \frac{p_{\Pi}}{\alpha_1} = \frac{126,12 \cdot 10^{-5}}{4,8 \cdot 10^{-5}} = 26,275^{\circ}\text{C}. \quad (3.212)$$

Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции обмотки:

$$\Delta t_{\text{иП}} = p_{\Pi} \left(\frac{b_{\text{иП}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_{\text{кП}}}{8 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 126,12 \cdot 10^{-5} \left(\frac{0,2}{16 \cdot 10^{-5}} + \frac{21,6}{8 \cdot 112,5 \cdot 10^{-5}} \right) = 4,6^{\circ}\text{C}. \quad (3.213)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta t'_{\Pi} = \Delta t_{\text{III}} + \Delta t_{\text{иП}} = 26,275 + 4,6 = 30,875^{\circ}\text{C}. \quad (3.214)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха:

$$\Delta t_{\Pi} = \Delta t'_{\Pi} + \Delta t_{\text{в}} = 30,875 + 37,3 = 68,175^{\circ}\text{C}. \quad (3.215)$$

3.13.6 Коллектор

Условная поверхность охлаждения коллектора:

$$S_k = \pi \cdot D_k \cdot l_k = 3,14 \cdot 140 \cdot 58 = 0,26 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (3.216)$$

Удельный тепловой поток от потерь на коллекторе, отнесенных к поверхности охлаждения коллектора:

$$p_k = \frac{P_{\text{кш}} + P_{\text{тш}}}{S_k} = \frac{76,9 + 88}{0,26 \cdot 10^5} = 634 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}. \quad (3.217)$$

Превышение температуры коллектора над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta t'_k = \frac{p_k}{\alpha_k} = \frac{634 \cdot 10^{-5}}{19,5 \cdot 10^{-5}} = 32,5^\circ\text{C}. \quad (3.218)$$

где $\alpha_k = 19,5$ - коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора.

Превышение температуры коллектора над температурой наружного охлаждающего воздуха:

$$\Delta t_k = \Delta t'_k + \Delta t_B = 32,5 + 37,3 = 69,8^\circ\text{C}. \quad (3.219)$$

3.13.7 Вентиляционный расчет

Необходимый расход воздуха:

$$V_B = \frac{k_2 \cdot P'_\Sigma}{C_B \cdot \Delta t_B} = \frac{5,54 \cdot 1123}{1100 \cdot 37,3} = 0,152 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (3.220)$$

где $k_2 = 2,2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n}{1000}\right)^3} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{корп}}}{100}} = 5,54$ - коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи по длине корпуса машины;

$C_B = 1100 \frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C} \cdot \text{м}^3}$ - теплоемкость воздуха.

Расход воздуха:

$$V'_B = 0,6 \cdot \left(\frac{n_1}{1000}\right) \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2} = 0,6 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right) \cdot \left(\frac{345}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2} = 0,37 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (3.221)$$

Напор воздуха:

$$H = 0,6 \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100} \right)^2 = 0,6 \cdot \left(\frac{1500}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{345}{100} \right)^2 = 329 \text{ Па.} \quad (3.222)$$

3.14 Масса и динамические показатели

Масса проводов обмотки якоря:

$$T_{M2} = 8,9 \cdot \omega_2 \cdot l_{\text{ср2}} \cdot c \cdot S \cdot 10^{-6} = 8,9 \cdot 261 \cdot 668 \cdot 2 \cdot 2,06 \cdot 10^{-6} = 6,39 \text{ кг.} \quad (3.223)$$

Масса проводов обмотки добавочных полюсов:

$$T_{MД} = 8,9 \cdot 2p_d \cdot \omega_d \cdot l_{\text{срД}} \cdot S \cdot 10^{-6} = 8,9 \cdot 4 \cdot 41 \cdot 397,57 \cdot 11,95 \cdot 10^{-6} = 6,93 \text{ кг.} \quad (3.224)$$

Масса проводов стабилизирующей последовательной обмотки:

$$T_{M.\text{пос}} = 8,9 \cdot 2p \cdot \omega_{\text{пос}} \cdot l_{\text{српос}} \cdot S \cdot 10^{-6} = 8,9 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 456,26 \cdot 11,95 \cdot 10^{-6} = 0,97 \text{ кг.} \quad (3.225)$$

Масса проводов параллельной или независимой обмотки главных полюсов:

$$T_{M\Pi} = 8,9 \cdot 2p \cdot \omega_{\Pi} \cdot l_{\text{ср\Pi}} \cdot S \cdot 10^{-6} = 8,9 \cdot 4 \cdot 1550 \cdot 466,31 \cdot 0,302 \cdot 10^{-6} = 7,77 \text{ кг.} \quad (3.226)$$

Масса меди коллектора:

$$T_{MК} = 5,25 \cdot D_k^{1,5} \cdot l_k \cdot 10^{-5} = 5,25 \cdot 140^{1,5} \cdot 58 \cdot 10^{-5} = 5,04 \text{ кг.} \quad (3.227)$$

Суммарная масса проводов обмоток и меди коллектора:

$$T_{M\Sigma} = T_{M2} + T_{M\Pi} + T_{MД} + T_{M.\text{пос}} + T_{M\Pi} + T_{MК} = 6,39 + 6,93 + 0,97 + 7,77 + 5,04 = 27,1 \text{ кг.} \quad (3.228)$$

Масса стали зубцов сердечника якоря:

$$T_{32} = 5,32 \text{ кг.}$$

Масса стали спинки сердечника якоря:

$$T_{C2} = 10,4 \text{ кг.}$$

Масса стали сердечников главных полюсов:

$$\tau_{\Pi} = 8,5 \cdot 2\rho \cdot l_{\text{ф.п}} \cdot b_{\Pi} \cdot h_{\Pi} \cdot 10^{-6} = 8,5 \cdot 4 \cdot 142,1 \cdot 47 \cdot 61 \cdot 10^{-6} = 13,85 \text{ кг.} \quad (3.229)$$

Масса стали сердечников добавочных полюсов:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{д}} &= 7,8 \cdot 2\rho_{\text{д}} \cdot k_{\text{с}} \cdot l_{\text{д}} \cdot b_{\text{д}} \cdot h_{\text{д}} \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 4 \cdot 0,98 \cdot 135 \cdot 22 \cdot 57 \cdot 10^{-6} = \\ &= 5,18 \text{ кг.} \end{aligned} \quad (3.230)$$

Масса стали массивной станины:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{с1}} &= 6,05 \cdot l_1 \cdot (D_{\text{н1}}^2 - D_1^2) \cdot 10^{-6} = 6,05 \cdot 236,89 \cdot (345^2 - 309^2) \cdot 10^{-6} = \\ &= 33,74 \text{ кг.} \end{aligned} \quad (3.231)$$

Суммарная масса активной стали:

$$\begin{aligned} m_{\text{сз}} &= \tau_{\text{з2}} + \tau_{\text{с2}} + \tau_{\Pi} + \tau_{\text{д}} + \tau_{\text{с1}} = 5,32 + 10,4 + 13,85 + 5,18 + 33,74 = \\ &= 68,5 \text{ кг.} \end{aligned} \quad (3.232)$$

Масса изоляции машины:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{и}} &= (3,8 \cdot D_{\text{н1}}^{1,5} + 0,2 \cdot D_{\text{н1}} \cdot l_2) \cdot 10^{-4} = (3,8 \cdot 345^{1,5} + 0,2 \cdot 345 \cdot 145) \cdot 10^{-4} = \\ &= 3,44 \text{ кг.} \end{aligned} \quad (3.233)$$

Масса конструкционных материалов:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{к}} &= (A \cdot D_{\text{н1}}^2 \cdot l_2 + B \cdot D_{\text{н1}}^3) \cdot 10^{-6} = (0,7 \cdot 345^2 \cdot 145 + 1,1 \cdot 345^3) \cdot 10^{-6} = \\ &= 57,25 \text{ кг.} \end{aligned} \quad (3.234)$$

где $A = 0,7; B = 1,1$ - коэффициенты.

Масса машины:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{маш}} &= \tau_{\text{мз}} + \tau_{\text{сз}} + \tau_{\text{и}} + \tau_{\text{к}} = 27,1 + 68,5 + 3,44 + 57,25 = \\ &= 156,3 \text{ кг.} \end{aligned} \quad (3.235)$$

Динамический момент инерции якоря:

$$\begin{aligned}
 J_{\text{ид}} &= 0,6 \cdot D_{\text{H2}}^4 \cdot (1_2 + 0,3 \cdot D_{\text{H2}} + 0,75 \cdot P_2) \cdot 10^{-12} = \\
 &= 0,6 \cdot 180^4 \cdot (145 + 0,3 \cdot 180 + 0,75 \cdot 7,5) \cdot 10^{-12} = 0,129 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}.
 \end{aligned}
 \tag{3.236}$$

Электромеханическая постоянная времени якоря:

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\text{ид}} \cdot T_{\text{T}} r_{2\Sigma}}{\left(91 \cdot \frac{E_2}{n} \right)} = \frac{0,129 \cdot 0,407}{91 \cdot \frac{201,7}{1500}} = 0,0043 \text{ с.}
 \tag{3.237}$$

4 Технология производства катушек основных полюсов

К обмоткам полюсов относятся сосредоточенные обмотки, на неподвижных (машины постоянного тока) и вращающихся (синхронные машины, гидрогенераторы) полюсах.

Обмотки полюсов можно разделить: на обмотки из круглого и прямоугольного изолированного проводов; обмотки из шины, наматываемой плашмя, и обмотки из шины, наматываемой на ребро. Обмотки могут наматываться на полюс, на каркас, с которыми они устанавливаются на полюс,

также могут быть бескаркасными. По виду работы обмотки делятся на неподвижные и вращающиеся.

Действие центробежной силы на вращающуюся катушку вызывает ряд дополнительных требований к её конструкции и технологии. Влияние центробежной силы особенно сказывается в катушках из тонкого круглого провода, которые подвергаются при вращении деформациям, что приводит к нарушению балансировки якоря и замыканиям между витками. Надежная междувитковая изоляция получается только у шинных катушек, намотанных на

ребро, у которых давление между витками значительно ниже по сравнению с другими обмотками.

Катушки полюсов наматывают круглым проводом сечением до 7мм, прямоугольным до 16 мм". При сечениях свыше 20мм катушки наматывают медными шинами. катушках из изолированного провода междувитковой изоляцией служит изоляция провода. катушках, наматываемых медными шинами на ребро, изоляцию между витками вставляют виде прокладок, а при намотке плашмя междувитковую изоляцию наматывают вместе с шинами.

Перед установкой в машину катушки пропитывают лаками или эпоксидными компаундами. После пропитки лаком катушку надевают на полюс закрепляют при установке в машину. Пропитку катушки в компаунде осуществляют вместе с сердечником полюса. При этом компаунд скрепляет

катушку сердечником, повышая их надежность в работе и облегчая установку в машину. При пропитке в эпоксидных компаундах систему изоляции называют «монолит».

4.1 Технология изготовления катушек полюсов из круглого провода

Технологический процесс изготовления катушек состоит из операций намотки, изолировки, пропитки сушки и контроля. Катушки можно наматывать на намоточный шаблон, на каркас или непосредственно на изолированный полюс. Катушки, наматываемые на шаблон, называются бескаркасными. Шаблон служит только для намотки. Катушки, наматываемые на каркас, называются каркасными. Вместе с каркасом их надевают на полюс машины.

Наибольшее применение находят бескаркасные катушки. Рассмотрим технологию их изготовления. Намотку таких катушек производят на станках различной конструкции, но все они должны иметь механизм раскладки провода. На рисунке показан шаблон, который состоит из сердечника 3 и двух щек 2 и 4. Шаблон прикреплен к планшайбе станка втулкой 1. Размеры шаблона по ширине и длине должны соответствовать размерам катушки с учетом припуска на изоляцию и не плотности намотки. В щеках шаблона имеется шесть пазов для скрепления катушки после намотки. Щека 4 крепится клином 5 к сердечнику 3.

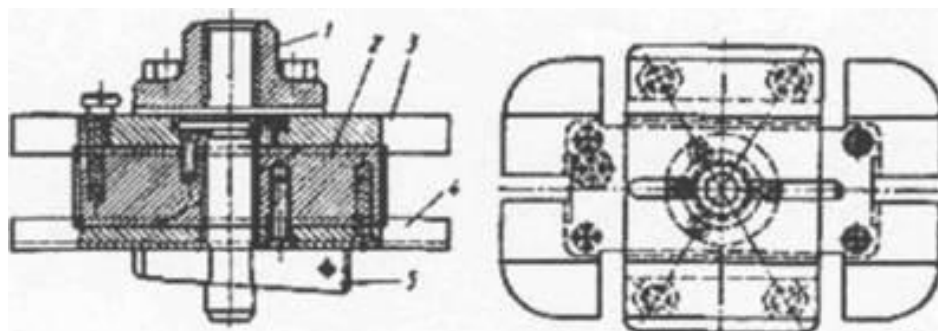


Рисунок 4.1 - Шаблон для намотки катушки полюса.

При намотке раскладчик станка производит рядовую раскладку провода, передвигаясь за один оборот шаблона расстояние, равное диаметру наматываемого провода. При намотке ступенчатых катушек для образования ступеней между щекой шаблона и рядами витков могут быть установлены закладные кольца. В ответственных машинах для достижения монолитности витков при намотке ряды катушек промазывают клеящими лаками. Намотанные катушки перевязывают в нескольких местах лентой, снимают с шаблона и припаивают наконечники. Затем накладывают часть изоляции, называемую стягивающим слоем, который служит для предохранения витков

от сдвига, и расклинивают внутреннее отверстие деревянными клиньями. В таком виде катушку пропитывают лаком. После пропитки клинья выбивают из неостывшей катушки. На катушку накладывают остальные слои наружной изоляции и повторяют пропитку. Повторная пропитка предназначена для заполнения пор наружной изоляции и воздушных промежутков между слоями. Заключительными операциями изготовления катушек являются: зачистка выводных концов, маркировка и контроль. Зачистку выводных концов от

пленки лака, образовавшейся при пропитке, производят вручную металлической щеткой. Около каждого вывода проставляют буквы "Н" и "К", означающие начало и конец намотки, а на боковой поверхности-номер чертежа.

Контроль катушек заключается в проверке габаритных размеров, активного сопротивления, количества витков, отсутствия междувитковых замыканий.

Технология изготовления катушек на каркасе начинается изготовления каркаса. Каркас изготавливают из листовой стали толщиной от 0,5 до 2,0 мм. Перед намоткой каркас необходимо изолировать. Применяемые для изоляции материалы выбирается конструктором в зависимости от условий работы машины. Выполняется изоляция следующим образом. По всем четырем сторонам каркаса накладывается в два слоя полоса изоляции толщиной 1 мм. Ширина полосы должна быть равна высоте каркаса и платно упираться краями

в боковые стороны каркаса. Начало и конец полосы обрезают на конус, для того чтобы избежать утолщения в этих местах. Для предотвращения разматывания

полосы поверх её наматывают в разбег технологическую ленту. Затем для изолировки боковых сторон каркаса вырезают четырехугольные шайбы с таким расчетом, чтобы их края выступали за намотанную катушку на 10-15 мм с каждой стороны. В нарезанных четырёхугольниках намечаются ширина и длина изолированного каркаса, затем вырезается намеченная часть. Полученные таким образом шайбы надевают на каркас. Для этого они разрезаются по короткой стороне, но ни в коем случае не прямо, и по две накладываются на отогнутые части стального каркаса, причем шайбы должны быть уложены так, чтобы разрезы их помещались на разных сторонах каркаса. Надев шайбы, со средней части каркаса снимают временно ленту и приступают

к намотке катушек.

Сначала выполняют вывод от начала намотки. Вывод от начала намотки на наружную поверхность катушки выполняют из медной ленты, которую припаивают к первому витку и огибают им сечение катушки. Под медную ленту подкладывают изоляцию из электроизоляционного картона и лакоткани. Толщину ленты обычно принимают не более 1 мм, так как при большей толщине ленту трудно выгибать, и она занимает места по высоте катушки.

Ширина ленты определяется протекающим по ней током. Для Укрепления второго выводного конца катушки перед концом намотки прокладывают медную ленту с ушком на одном конце. При дальнейшей намотке она закрепляется 5-10 витками. Лента изолирована от витков катушки.

После намотки катушку с каркасом пропитывают лаком и производят заключительные операции. На полюс машины катушка устанавливается вместе с каркасом.

Намотка катушек из круглого провода на изолированный сердечник производится редко.

4.2 Изолировка катушек полюсов машин постоянного тока

Изолировка катушек является трудоемким процессом, который недостаточно механизирован. Изоляция катушки состоит из нескольких слоев ленты. Первый и последний слои являются вспомогательной изоляцией. Первый слой скрепляет витки после намотки, а последний предохраняет основную изоляцию от механических повреждений в процессе изготовления и эксплуатации. качестве вспомогательной изоляции используют киперные или стеклянные ленты. Основная изоляция служит для изоляции катушки от корпуса машины. качестве основной изоляции используют миканитовые или стекло слюдинитовые ленты. Основная изоляция может накладываться на катушку в виде простынок, имеющих сложную форму. Простынки заготавливаются заранее вырезкой из листа или штамповкой. Наложение лент может производиться вручную или на приспособлениях. При ручной изолировке ролик изоляции проводят через внутреннее отверстие катушки. Для этого при каждом обороте ролик дважды переключают из одной руки в другую. Для механизации процесса изолировки используют изолировочные головки различной конструкции. Широкая номенклатура катушек, изготавливаемых на одном предприятии. И небольшое их количество приводят к применению универсальных изолировочных головок.

5 Безопасность жизнедеятельности

5.1 Анализ опасности поражения электрическим током

Случаи поражения человека током вероятны только при замыкании электрической цепи через тело человека либо, иначе говоря, при прикосновении человека не менее чем к двум точкам цепи, между которыми присутствует некоторое напряжение.

Опасность данного контакта, оцениваемая величиной тока, протекающего через человека, либо же напряжением прикосновения, находятся в зависимости от ряда аспектов: схемы включения человека в цепь,

напряжения сети, схемы самой сети, режима ее нейтрали, степени изоляции токоведущих частей от земли, а также от величины емкости токоведущих частей относительно земли и т. п.

Схемы включения человека в сеть могут быть разнообразными. Однако наиболее многочисленными являются две схемы включения: среди двумя проводами и между одним проводом и землей (рисунок 5.1). В случае провода(фазы) и земли предполагается наличие электрической связи между фазой и землей.

В сетях переменного тока по первой схеме обычно называют двухфазным включением, а по второй - однофазным.

Двухфазное включение - когда человек одновременно касается двух фаз, как правило, более опасно, поскольку к телу человека прикладывается максимальное в данной сети напряжение - линейное, и поэтому через человека пойдет максимальный ток:

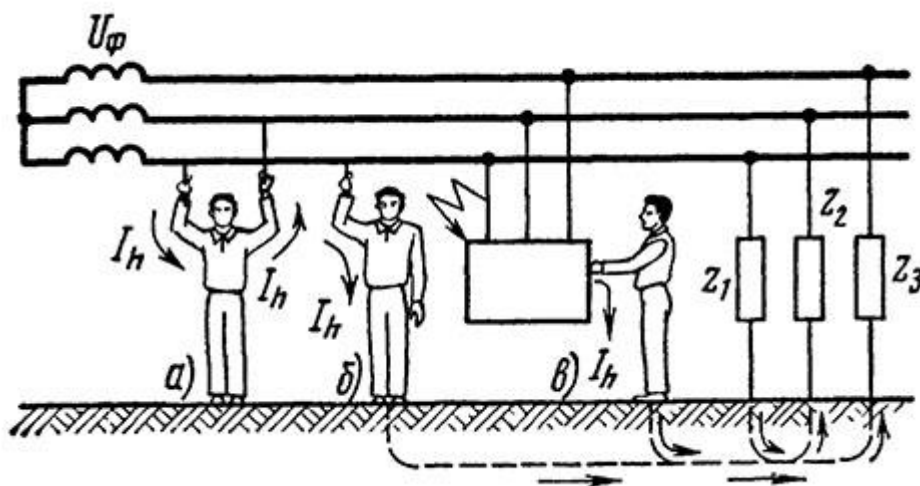
$$I_h = \frac{1,73 \cdot U_\phi}{R_h} = \frac{U_\pi}{R_h}, \quad (5.1)$$

$$I_h = \frac{380}{1000} = 380 \text{ мА. - смертельное опасное}$$

где I_h - ток, протекающий через тело человека, А;

$U_\pi = \sqrt{3} \cdot U_\phi$ - линейное напряжение, т. е. напряжение между фазами, В;

U_ϕ - фазное напряжение, т. е. напряжение между началом и концом одной обмотки (или между фазой и нулевым проводом), В.



а - двухфазное включение; б, в - однофазные включения

Рисунок 5.1 - Случаи включения человека в цепь тока

Нетрудно представить, что двухфазное включение является таким же опасным в сети как с изолированной, так и с заземленной нейтралью.

При двухфазном включении опасность поражения не уменьшится, если человек надежно изолирован от земли, если он имеет на ногах резиновые галоши или боты или на диэлектрическом коврике.

Однофазное включение происходит значительно чаще, но является не таким опасным, чем двухфазное включение, поскольку напряжение, под которым оказывается человек, не превышает фазного, т. е. меньше линейного в 1,73 раза. Соответственно меньше оказывается ток, проходящий через человека.

Кроме того, на величину этого тока влияют также режим нейтрали источника тока, сопротивление изоляции и емкость проводов относительно земли, сопротивление пола, на котором стоит человек, сопротивление его обуви и некоторые другие факторы.

В трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью на стороне 10 кВ питающего трансформатора, ток, проходящий через человека, при прикосновении к одной из фаз сети в период ее нормальной работы (рисунок 5.1, а) определяется следующим выражением в комплексной форме (А):

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{Z}{3}},$$

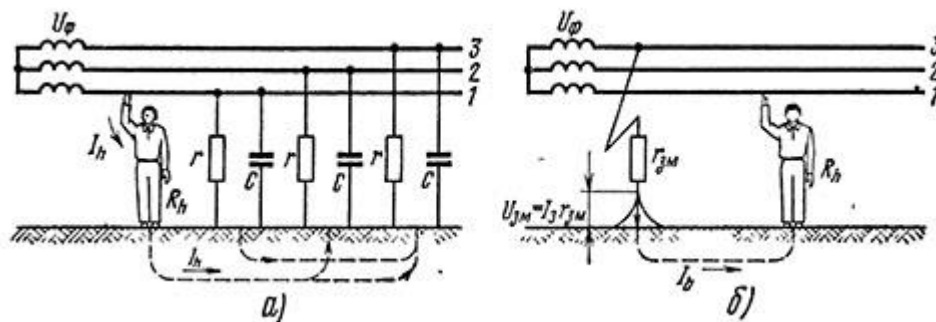
(5.2)

где Z - комплекс полного сопротивления одной фазы относительно земли (Ом):

$$Z = \frac{r}{1 + j\omega \cdot C \cdot r}.$$

(5.3)

здесь r и C – получается, сопротивление изоляции провода (Ом) и емкость провода (Ф) относительно земли (приняты для упрощения одинаковыми для всех проводов сети).



а - при нормальном режиме; б - при аварийном режиме

Рисунок 5.2 - Прикосновение человека к проводу трехфазной сети с изолированной нейтралью

Ток в действительной форме (А):

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r(r + 6R_h)}{9R_n^2(1 + r^2\omega^2C^2)}}}$$

(5.4)

Если емкость проводов касательнoземли минимальна, т. е. $C = 0$, что обычно имеет место в воздушных не очень длинных сетях, то уравнение (5.4) примет вид

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{r}{3}}$$

(5.5)

$$I_h = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{1000 + \frac{500 \cdot 10^3}{3}} = 2,16 \text{ А. - смертельно опасный ток.}$$

Если же емкость велика, а проводимость изоляции не большая, т. е. $r \approx \infty$, что обычно имеет место в кабельных сетях, то согласно выражению (5.5) ток через человека (А) будет:

$$I_h = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{x_c}{3}\right)^2}}, \quad (5.6)$$

где $x_c = \frac{1}{\omega C}$ - емкостное сопротивление, Ом.

Эта формула используется в сетях протяженных, т.к. в проекте эти сети не используются, то расчёт не производится.

Исходя из выражения (5.6), что в сетях с изолированной нейтралью, обладающих небольшой емкостью между проводами и землей, опасность для человека, контактируя с одной из фаз в период нормальной работы сети, зависит от сопротивления проводов относительно земли: с увеличением сопротивления опасность становится меньше.

Поэтому очень важно в таких сетях обеспечивать максимальное сопротивление изоляции и проверять ее состояние в целях своевременного выявления и устранения возникших неисправностей.

Однако в сетях с высокой емкостью относительно земли роль изоляции проводов в обеспечении безопасности прикосновения исчезает, что видно из формул (5.4) и (5.6).

При аварийном режиме работы сети, - когда произошло замыкание одной из фаз на землю через малое сопротивление, ток будет протекать через человека, прикоснувшегося к здоровой фазе (рисунок 5.1, б), будет (А):

$$I_h = \frac{U_\phi \sqrt{3}}{R_h + r_{3M}}, \quad (5.7)$$

а напряжение прикосновения (В):

$$U_{пр} = I_h R_h = U_\phi \sqrt{3} \frac{R_h}{R_h + r_{3M}}. \quad (5.8)$$

Если принять, что $r_{3M} = 0$ или по крайней мере считать, что $r_{3M} < R_h$ (так обычно бывает на практике), то согласно выражению (5.8)

$$U_{пр} = U_\phi \sqrt{3}. \quad (5.9)$$

т. е. человек окажется под линейным напряжением.

В действительных условиях $r_{3M} > 0$, поэтому напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправной фазе трехфазной сети с изолированной нейтралью, будет значительно больше фазного и несколько меньше линейного напряжения сети. Таким образом, этот случай прикосновения во много раз опаснее прикосновения к той же фазе сети при нормальном режиме работы.

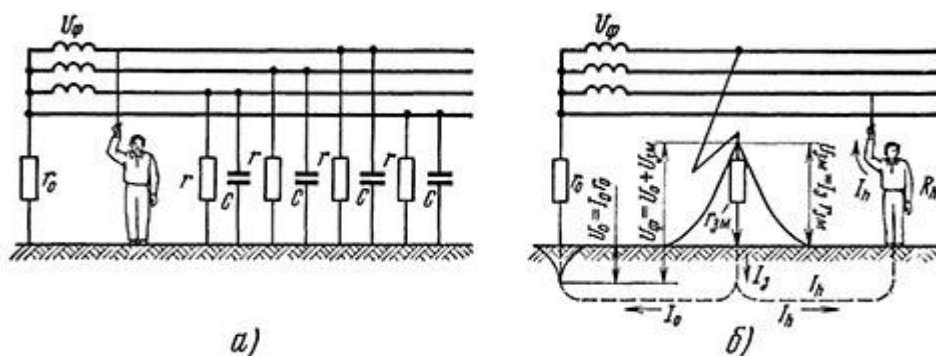
В трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью проводимость изоляции и емкостная проводимость проводов относительно

земли малы по сравнению с проводимостью заземления нейтрали, поэтому при определении тока через человека, касающегося фазы сети, ими можно пренебречь.

При нормальном режиме работы сети ток через человека будет (рисунок 5.3, а):

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + r_0}, \quad (5.10)$$

где r_0 - сопротивление заземления нейтрали, Ом.



а - при нормальном режиме; б - при аварийном режиме

Рисунок 5.3 - Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью

В обычных сетях $r_0 < 10$ Ом, сопротивление тела человека R_h не опускается ниже нескольких сотен Ом. Следовательно, без большой ошибки в уравнении (5.10) можно пренебречь значением r_0 и считать, что при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью человек оказывается под фазным напряжением U_ϕ , а ток, протекающий через него, равняется частному от деления U_ϕ на R_h .

Исходя из этого, что прикосновение к фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью в период нормальной ее работы более критично, чем прикосновение к фазе нормально работающей сети с изолированной нейтралью, но менее опасно прикосновения к исправной фазе сети с изолированной нейтралью в аварийный период, так как $r_{з\text{м}}$ может в ряде случаев мало отличаться от r_0 .

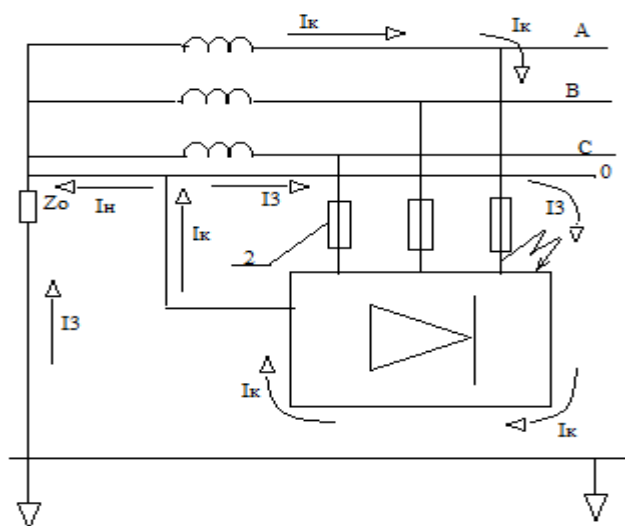
В проекте рассмотрен привод постоянного тока, питающийся от преобразователя, поэтому условия электрической безопасности рассмотрены при замыкании на корпус преобразователя.

5.2 Разработка мер защиты от поражения электрическим током

Безопасное обслуживание машин и аппаратов с индивидуальными электродвигателями и эксплуатация электрооборудования, зависят от многочисленных производственных условий и состояния помещения, в которых производятся работы. Такие факторы как влажность воздуха, производимое сырьё, температура окружающей среды очень сильно повышают риск пробоя изоляции.

При снижении сопротивления изоляции проводов возможен переход напряжения на корпуса и металлические конструкции станков. В таких случаях при неисправности защитного зануления или вообще его отсутствие создают колоссальную опасность поражения электрическим током эксплуатирующего и обслуживающего персонала.

Опасность поражения электрическим током при телесном контакте с корпусом или другими нетоковедущими частями электрооборудования станка, оказавшимися под напряжением по причине замыкания на корпус или вследствие других причин, может быть ликвидирована быстрым отключением поврежденной электроустановки от питающей сети и вместе с тем снижением напряжения на корпусе относительно земли. Именно для этого предусмотрено зануление.



- 1 - Корпус электроустановки, 2 - Аппараты защиты от токов короткого замыкания, 3 - I_z – часть $I_{кз}$, протекающего через землю, I_k – ток короткого замыкания, I_n – часть I_k протекающий через нулевой защитный провод, Z_o – R заземление обмотки источника тока, Z_n – R повторное заземление нулевого защитного провода

Рисунок 5.4 – Расчётная схема зануления

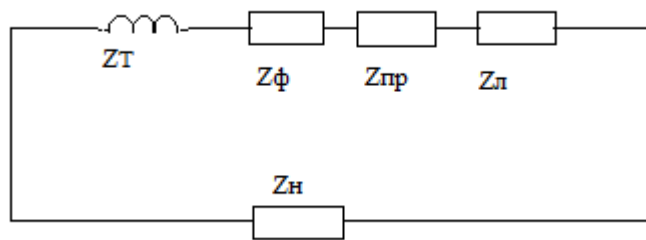


Рисунок 5.5 – Расчетная схема зануления

Зануление – преднамеренное электрическое соединение с нулевым проводом металлических нетоковедущих конструкций, которые могут оказаться под напряжением.

Исходные данные:

Напряжение сети – 0,4 кВ;

Мощность трансформатора – 630 кВА;

Мощность электроприёмника Р – 8 кВт

Ток нагрузки силового пункта (СП) I_n – 30 А.

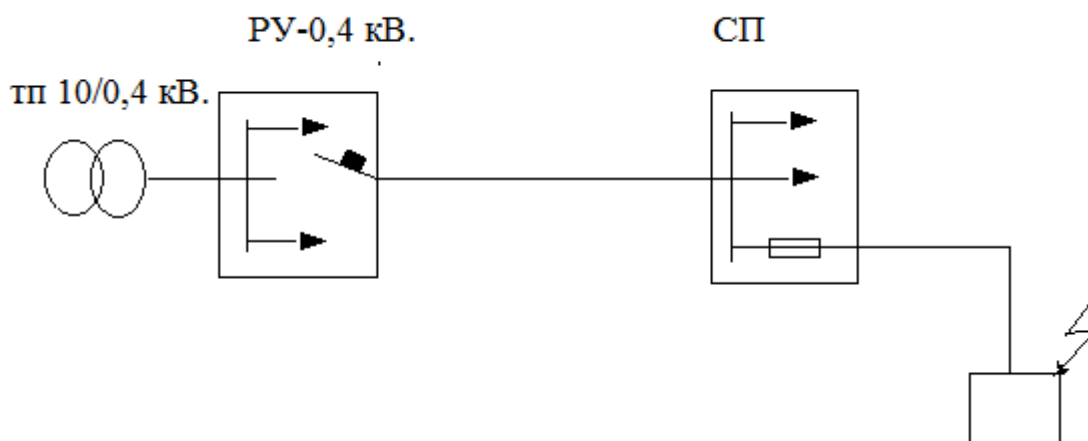


Рисунок 5.6 – Схема замещения

При замыкании фазы на корпус заземленной электроустановки, то электроустановка мгновенно при следующем условии

$$(5.11) \quad I_k > K \cdot I_{ном}$$

где $I_{ном}$ – ток срабатывания автомата;

K – кратности номинального тока, $K = 1,4$;

Мощность потребителя двигателя подачи Р – 8 кВт.;

Максимальный потребляемый ток одной фазы $I_{дв}$ – 13,21 А.

Подача напряжения подключена через автоматический выключатель АК63-3М, $I_n = 30$ А.

$$I_k = 1,4 \cdot 30 = 42 \text{ А.}$$

Станок питается от ТП, где установлен, силовой трансформатор типа ТСГЛ, 10/0,4 кВ, Мощностью 630 кВА.

Находим значения активных и индуктивных элементов цепи. $Z_{тр} = 0,129$
Сопротивления фазных и нулевого провода:

$$(5.12) \quad R_{\phi} = \rho \cdot \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление проводника (0,18 Ом·мм/м);
 l – длина проводника, мм².

$$R_{\phi} = 0,18 \cdot \frac{40}{10} = 0,07 \text{ Ом.}$$

Внутреннее активное и индуктивное сопротивление стальной полосы.

$$S_{\Pi} = 80 \text{ мм}^2, I_k = 42 \text{ А.}$$

Плотность тока:

$$I = \frac{I_k}{S_{\Pi}} = \frac{42}{80} = 0,53 \text{ А / мм}^2.$$

По таблице

$$R_{\omega} = 5,24 \text{ Ом/км}; x = 3,14 \text{ Ом/км};$$

Определяем $R_{н2}$ и $X_{н2}$:

$$R_{н3} = r_{\omega} \cdot l = 5,24 \cdot 0,04 = 0,2 \text{ Ом};$$

$$X_{н3} = x \cdot l = 3,14 \cdot 0,04 = 0,14 \text{ Ом.}$$

Для меди $X_{\phi} = 0$.

Внешнее индуктивное сопротивление фаза – нуль принимаем равным

$$X_{\Pi} = 0,6 \text{ Ом/км};$$

$$X_{\Pi} = 0,6 \cdot 0,04 = 0,024 \text{ Ом/км.}$$

Определим полное сопротивление цепи фаза – нуль

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_r}{3} + Z_n},$$

$$\frac{I_{кз}}{I_{на}} = \frac{610}{42} = 14,5.$$

Исходя из этого, найдём время отключения автоматического выключателя

$$t_B = 0,095 \text{ с.}$$

Потенциал корпуса поврежденного оборудования

$$U_k = I_{кз} \cdot Z_n = 98,92 \text{ В.}$$

Ток, проходящий через тело человека

$$I_h = \frac{U_k}{R_h} = \frac{98,92}{1000} = 98,92 \text{ мА,}$$

$$I_h = 0,098 \text{ А,}$$

$$I_{кз} > I_k \text{ т.е. } 610 > 42 \text{ А.}$$

Отключающая способность обеспечена.

Согласно ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ такие величины являются допустимыми при продолжительности воздействия 1,0 и 0,5 т.е. время воздействия больше, чем время срабатывания автоматического выключателя и предохранителя.

6 Экономическая часть

6.1 Расчет экономической эффективности

Машины постоянного тока общепромышленного назначения, так же как и асинхронные двигатели, изготавливают в виде серий. В настоящее время промышленностью выпускается серия 2П, которая имеет диапазон мощностей от 0,37 до 200 кВт (при частоте вращения 1500 об/мин), 12 высот оси вращения от 80 до 315 мм и включает кроме основного исполнения ряд модификаций. Машины выпускают со степенью IP22 и IP44 и многочисленными способами охлаждения. Рассмотрим наиболее простую конструкцию машины постоянного тока.

Дисконтированный срок окупаемости инвестиций – это время окупаемости первоначальных затрат на реализацию проекта за счёт доходов, дисконтированных по заданной процентной ставке (норме прибыли) на текущий момент времени.

Первоначальные затраты – затраты на приобретение, установку и пуско-наладку основных средств. Для упрощения считается, что первоначальные вложения возникают одновременно в момент запуска в эксплуатацию оборудования. К первоначальным затратам относятся оборотные средства, необходимые для реализации проекта. Принцип метода дисконтированного срока окупаемости – из первоначальных затрат на реализацию инвестиционного проекта поочередно вычитаются дисконтированные денежные доходы с тем, чтобы окупилась инвестиционные издержки. Таким образом, дисконтированный срок окупаемости включает в себя такое количество лет реализации инвестиционного проекта, в течение которых сумма чистых доходов, дисконтированных на момент завершения инвестиций, равна сумме инвестиций.

Плюсы метода состоят в том, что он имеет четко выраженный критерий приемлемости инвестиционных проектов. При использовании данного метода проект принимается, при условии если он окупит себя за экономически оправданный срок своей реализации.

Расчет экономической эффективности от внедрения нового оборудования ведется в сравнении с взаимозаменяемым вариантом технического решения. Базисный вариант – двигатель постоянного тока серии П-81 мощностью 19 кВт, будет заменён на более усовершенствованный и выгодный вариант – двигатель постоянного тока 2ПН225М, мощностью 22 кВт.

В этой части экономического раздела будет произведена оценка технико - экономического эффекта, определение ожидаемой экономической эффективности использования. Расчет экономической эффективности от внедрения нового оборудования позволит сделать вывод о целесообразности замены оборудования.

В состав капитальных затрат по каждому варианту входит:

- стоимость нового оборудования системы;
- стоимость монтажных работ по установке и наладке электрооборудования;
- транспортные расходы по доставке оборудования;

Стоимость нового и старого оборудования приведены соответственно в таблицы 6.1 и 6.2.

Затраты на транспортировку и монтаж берем по 5 % от общей стоимости оборудования.

Таблица 6.1 - Стоимость оборудования нового варианта

Статьи расходов	Марка	Сметная стоимость, тг.
Двигатель постоянного тока	2ПН225М	300 000,00
Итого по оборудованию	-	300 000,00

Транспортные расходы	-	15 000,00
Стоимость монтажных работ	-	15 000,00
Общая сумма	-	330 000,00

Таблица 6.2 - Стоимость оборудования базисного варианта

Статьи расходов	Марка	Сметная стоимость, тг.
Двигатель постоянного тока	П-82	225 000,00
Итого по оборудованию	-	225 000,00
Транспортные расходы	-	11 250,00
Стоимость монтажных работ	-	11 250,00
Общая сумма	-	247 500,00

При замене старого оборудования на новое будут иметь место затраты на демонтаж, который будут производить два человека с 5-м разрядом и часовой тарифной ставкой 1000 тг./ч.

$$Z_{\text{дем}} = n \cdot t \cdot T_{\text{тар}}, \quad (6.1)$$

где $Z_{\text{дем}}$ - затраты на демонтаж старого оборудования, тг.;

n - количество человек;

t - время работ по демонтажу, ч;

$T_{\text{тар}}$ - тарифная ставка работника 5-го разряда.

$$Z_{\text{дем}} = 2 \cdot 2 \cdot 1000 = 4000 \text{ тг.}$$

Так же необходимо посчитать остаточную стоимость оборудования базисного варианта при его использовании в течении 5-и лет.

$$\Phi_{\text{ост}} = 0,5 \cdot \Phi_{\text{осн}}, \quad (6.2)$$

где $\Phi_{\text{ост}}$ - остаточная стоимость старого оборудования, тг.

$\Phi_{\text{осн}}$ - первоначальная стоимость, тг.

$$\Phi_{\text{ост}} = 0,5 \cdot 247500 = 123750 \text{ тг.}$$

В итоге получаем сумму долгосрочных инвестиций, связанных с приобретением нового оборудования.

$$I = K_1 + Z_{\text{дем}} - \Phi_{\text{ост}}, \quad (6.3)$$

где I - долгосрочные инвестиции, тг.;

K_1 - стоимость нового оборудования, тг.

$$I = 300000 + 4000 - 123750 = 180250 \text{ тг.}$$

Расчет и сопоставление эксплуатационных расходов.

Эксплуатационные расходы складываются из амортизационных отчислений и затрат на обслуживание.

Амортизационные отчисления:

$$Z_a = N_a \cdot K_{\text{об}}, \quad (6.4)$$

где Z_a - затраты на амортизацию оборудования, тенге.;

N_a - норма амортизации;

$K_{\text{об}}$ - стоимость оборудования.

$$Z_{a1} = 0,05 \cdot 300000 = 15000 \text{ тг.},$$

$$Z_{a2} = 0,1 \cdot 225000 = 22500 \text{ тг.}$$

В затратах на ремонт и обслуживание учитывается количество текущих, средних и капитальных ремонтов в течении всего срока службы и трудоёмкость ремонтов (таблица 6.3).

Ремонт будет проводить электрик 5-го разряда с часовой тарифной ставкой $C_{\text{ч}} = 1000$ тг./час.

Затраты на заработную плату электрика за год по всему оборудованию.

$$Z_3 = T \cdot C_{\text{ч}}, \quad (6.5)$$

где Z_3 - затраты на зарплату электрика, тг.;

T - суммарная трудоёмкость ремонта, чел/ч;

$C_{\text{ч}}$ - часовая тарифная ставка электрика 5-го разряда, тг./час.

$$Z_{31} = (72 + 18) \cdot 1000 = 90000 \text{ тг.},$$

$$Z_{32} = (270 + 18) \cdot 1000 = 288000 \text{ тг.}$$

Полные эксплуатационные расходы:

$$Z_3 = Z_a \cdot Z_3, \quad (6.6)$$

где Z_3 - полные эксплуатационные расходы, тг.

$$Z_{3,1} = 90000 + 15000 = 105000 \text{ тг.},$$

$$Z_{3,2} = 288000 + 22500 = 250500 \text{ тг.}$$

Таблица 6.3 - Затраты на заработную плату ремонтных рабочих

Оборудование	Количество ремонтов Т-С-К	Трудоемкость ремонтов, чел/ч.	Суммарная трудоемкость ремонта, чел/ч.
Двигатель постоянного тока П-82	20 - 5 - 1	2 - 4 - 12	72
Двигатель постоянного тока 2ПН225М	4 - 2 - 1	1 - 2 - 10	18

Годовая экономия:

$$\mathcal{E} = Z_{3,2} - Z_{3,1}, \quad (6.7)$$

где \mathcal{E} - годовая экономия, тг.

$$\mathcal{E} = 250500 - 105000 = 145500 \text{ тг.}$$

По экспертной оценке, стоимость станкочаса работы продольно-строгального станка составляет 4800 тг. Благодаря тому, что высвобождается время на работу станка за счет снижения времени на ремонт, получаем:

$$V_{\text{вв}} = F \cdot C_c, \quad (6.8)$$

где $V_{\text{вв}}$ - выручка за счет высвобождения времени, тг.;

F - разница эффективных фондов времени, ч;

C_c - стоимость станкочаса работы продольно-строгального станка, тг.

$$V_{\text{вв}} = 198 \cdot 4800 = 950400 \text{ тг.}$$

Так же нам удастся увеличить выручку за счет повышения производительности на 10 %.

$$V_{\text{п}} = 0,1 \cdot F_{\text{эф1}} \cdot C_{\text{с}}, \quad (6.9)$$

где $V_{\text{п}}$ - выручка за счет повышения производительности, тг.;
 $F_{\text{эф1}}$ - эффективный фонд времени нового оборудования, ч.

$$V_{\text{п}} = 0,1 \cdot 198 \cdot 4800 = 95040 \text{ тг.}$$

При этом дополнительная выручка за счет повышения времени работы и роста производительности труда составит:

$$V = V_{\text{вв}} + V_{\text{п}} = 950400 + 95040 = 1045440 \text{ тг.} \quad (6.10)$$

где V - общая выручка, тг.
 Отсюда найдем прибыль:

$$\Pi = \frac{V \cdot R}{1 + R}, \quad (6.11)$$

где Π - прибыль, тг.;
 R - рентабельность (15 %).

$$\Pi = \frac{1055440 \cdot 0,15}{1 + 0,15} = 136361,739 \text{ тг.}$$

Определим сумму годовой экономии и прибыли от высвобождения времени и увеличения производительности:

$$\mathcal{E}_{\text{вг}} = \mathcal{E} + \Pi, \quad (6.12)$$

где - $\mathcal{E}_{\text{вг}}$ сумма годовой экономии и прибыли, тг.

$$\mathcal{E}_{\text{вг}} = 145500 + 136361,739 = 281861,739 \text{ тг.}$$

Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \frac{I}{\mathcal{E}_{\text{вг}}}, \quad (6.13)$$

где $T_{\text{ок}}$ - срок окупаемости, лет.

$$T_{\text{ок}} = \frac{180250}{281861,739} = 0,6.$$

$$0,6 \cdot 12 \text{ месяцев} = 7,2 \text{ месяца.}$$

Оценку инвестиционных проектов можно осуществить методом чистого дисконтирования.

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \mathcal{E}_t \cdot \frac{1}{(1+E)^t} - I, \quad (6.14)$$

где ЧДД - чистый дисконтированный доход, тг.;
 T - горизонт прогнозирования, лет;
 t - шаг прогнозирования, лет;
 \mathcal{E}_t - экономический эффект каждого года, полученный в результате внедрения инвестиций, тг.;
 E - норма дисконта.

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{0,6} 281861 \frac{1}{(1+0,12)^{0,3}} - 180250 = 101611 \text{ тг.}$$

Если $\text{ЧДД} > 0$, значит, проект следует принять.

Технико-экономический анализ показал, что капитальные затраты на новую систему ЭП окупаются за счет снижения эксплуатационных расходов и получения прибыли от высвобождения времени на ремонт и повышения производительности.

Основные показатели технико-экономического сравнения вариантов сведены в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 - Таблица экономических показателей

Показатель	Единица измерения	Значение	
		1-й вариант	2-й вариант

1. Капитальные затраты			
Стоимость оборудования	тг.	30000	225000
Транспортные расходы	тг.	15000	11250
Затраты на монтаж и наладку	тг.	15000	11250
Итого	тг.	330000	247500
2. Эксплуатационные расходы			
Амортизационные отчисления	тг.	15000	22500
Затраты на ремонт	тг.	90000	288000
Итого	тг.	105000	310500
Годовая экономия на эксплуатационных расходах	тг.	145500	
Прибыль	тг.	136361,739	
Итого экономия	тг.	281861,739	
Затраты на демонтаж	тг.	11250	

Продолжение таблицы 6.4

Остаточная стоимость	тг.	270611,739	
Инвестиции	тг.	330 000,00	
Срок окупаемости с учетом дисконтирования	Г	0,6	
Чистый дисконтированный доход (ЧДД)	тг.	101611	

Заключение

Данный дипломный проект выполнен на тему “Отрезок серии машин постоянного тока мощностью от 7,5 до 22 кВт”.

В основной части был произведен расчет двигателя постоянного тока мощностью 7,5 кВт в программе MathCad. По полученным данным построены рабочие характеристики.

В разделе «Безопасность жизнедеятельности» был проведен анализ опасности поражения электрическим током, разработаны меры защиты от поражения электрическим током, произведен расчет зануления двигателя.

В экономической части приводится расчет экономической эффективности. Расчет показал, что срок окупаемости составил 7,2 месяца.

Список литературы

- 1 Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1958г . 390 с.
- 2 Копылов И.П. Проектирование электрических машин. Москва, «Энергия», 1980 г.
- 3 Робинович Л.Н., Шубов И.Г. Проектирование электрических машин постоянного тока. Л., «Энергия», 1967 г.
- 4 Гольберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. Москва, «Высшая школа», 1984 г.
- 5 Вольдек А.И. Электрические машины, Ленинград, «Энергия», 1974 г.
- 6 Виноградов Н.В. Производство электрических машин. – ГЭИ, 1961 г.
- 7 Петров Г.Н. Электрические машины постоянного и переменного тока. М., «Энергия», 1968 г., 223с.
- 8 Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. Москва, «Энергия», 1978 г.
- 9 Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. Изд.3 Москва, «Энергия», 1969 г.
- 10 Копалов И.П., Клоков Б.К. Справочник по электрическим машинам. Москва, «Энергоатомиздат», 1988 г.
- 11 Долин Л.Н. Справочник по технике безопасности. Энергоатомиздат, 1985 г.