

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА
УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
“ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ”

ТИПОВАЯ ПРОГРАММА, МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
И КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ
“ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ”
для студентов специальности 7.050702
“Электрические машины и аппараты”
заочной формы обучения

Харьков
НТУ “ХПИ”
2012

Типова програма, методичні вказівки і контрольні роботи з курсу “Дослідження вентиляційних та теплових процесів електричних машин” для студентів спеціальності 7.050702 “Електричні машини і апарати” заочної форми навчання. / уклад. І.І.Гаєвська, Л.П.Галайко, І.С.Щукін.- Х., НТУ “ХПІ”, 2012.-с. Рос. мовою.

Укладачі: І. І. ГАЄВСЬКА
Л. П. ГАЛАЙКО
І. С. ЩУКІН

Рецензент
Кафедра електричних машин

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Целью изучения данной дисциплины является получение будущими специалистами теоретических и практических знаний вопросов теплообмена, теплопередачи в электрических машинах, связанных с работой систем охлаждения, проектированием прогрессивных систем охлаждения электрических машин.

Задачами изучения дисциплины являются овладение методами вентиляционных, гидравлических и тепловых расчетов электрических машин, приобретение навыков решения проблем охлаждения электрических машин.

В результате изучения курса студенты должны знать:

- способы охлаждения электрических машин;
- системы охлаждения электрических машин;
- новые направления в области охлаждения;
- методы вентиляционных, гидравлических и тепловых расчетов электрических машин.

В результате изучения курса студенты должны уметь:

- оценивать эффективность систем охлаждения;
- выполнять проектный и поверочный расчеты вентиляторов электрических машин;
- рассчитывать теплообменники в электрических машинах.

В соответствии с учебным планом курс читается в 10-м семестре. Запланировано 20 часов лекций, 8 часов практических занятий, одна контрольная работа, экзамен.

Если при изучении материала дисциплины или выполнении контрольной работы возникают трудности, следует обращаться на кафедру электрических машин для получения необходимой консультации.

2. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА И УКАЗАНИЯ К ТЕМАМ КУРСА

2.1. Введение. Общие вопросы теплообмена

Значение охлаждения электрических машин. Источники тепловыделения в электрических машинах. Срок службы изоляции. Температурные индексы изоляции материалов. Предельные допускаемые превышения температуры. Общая характеристика физических процессов тепловыделения и теплопередачи в электрических машинах. Краткие сведения из теории подобия.

Методические указания

Источники тепла в электрических машинах – потери в активных частях. Деление потерь на основные и добавочные. Формулы расчета потерь. Потери определяются в ходе электромагнитного расчета при проектировании машины и при тепловом расчете предполагаются заданными.

Максимальная температура при принятом классе изоляции лимитирует мощность машины. От температуры зависит срок службы изоляции. Математическое выражение зависимости срока службы изоляции от температуры, классификация изоляционных материалов по температурным индексам.

Передача тепла от горячего тела к холодному называется теплообменом и может осуществляться тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Механизм каждого вида теплопередачи, его математическое описание. Теплообмен между поверхностью твердого тела и обтекающим его потоком жидкости (или газа) всегда происходит конвекцией и называется теплоотдачей. На практике очень часто встречается теплообмен между двумя потоками, разделенными твердой перегородкой, так что тепло дважды передается конвекцией. Такой теплообмен называется теплопередачей. В ряде случаев передача тепла совершается одновременно всеми тремя способами. Такие режимы называются сложным теплообменом.

Сущность теории физического подобия и цели, достигаемые при ее использовании. Два физических явления подобны, если отношения сходственных физических величин одинаковы в сходственные моменты времени во всех сходственных точках пространства. Применение теории подобия

позволяет правильно спланировать опыт, изучить сложные физические явления и процессы на моделях и, обработав результаты опыта в виде чисел подобия, составить уравнение подобия, пригодное для расчета всей группы явлений, подобных изученному явлению. Три теоремы подобия. Критерии гидродинамического и теплового подобия, критериальные уравнения конвективной теплоотдачи.

Литература: (2, с. 92–98, с. 144–166; 3, с. 7–13, 62–70, 252–255).

Вопросы для самопроверки

1. Как зависит величина потерь в активных элементах электрических машин от нагрузки, мощности, габаритов и свойств материалов?
2. Долговечность каких элементов электрической машины наиболее сильно зависит от теплового состояния?
3. Как классифицируются изоляционные материалы по температурным индексам?
4. Что такое теплообмен? Назвать три основных вида теплообмена.
5. Объяснить механизм теплопроводности. Закон Фурье.
6. Коэффициент теплопроводности, от чего он зависит?
7. Математическое описание процесса теплоотдачи законом Ньютона–Рихмана.
8. Коэффициент теплоотдачи, от чего он зависит?
9. Объяснить механизм процесса передачи тепла излучением.
10. Какие явления называют подобными?
11. Сформулировать три теоремы подобия.
12. Что называется критерием подобия?
13. Объяснить смысл критериев гидромеханического и теплового подобия.

2.2. Способы и системы охлаждения электрических машин

Способы охлаждения электрических машин. Классификация систем охлаждения электрических машин. Оценка систем охлаждения. Непосредственное и косвенное охлаждение электрических машин.

Методические указания

Способ охлаждения определяется охлаждающей средой и видом теплосъема. Классификация способов охлаждения. Различают способы охлаждения в зависимости от применяемого охлаждающего вещества (воздушное, водородное, масляное, водяное), в зависимости от наличия или отсутствия тепловой изоляции между охлаждающей средой и источником тепловыделения (косвенное и непосредственное). Новые направления в области охлаждения электрических машин (испарительное охлаждение, применение тепловых труб, явление сверхпроводимости).

Классификация электрических машин в зависимости от способа их охлаждения (машины с естественным охлаждением, самовентилирующиеся машины, машины с наружной вентиляцией, машины с независимым охлаждением). Условное буквенно-цифровое обозначение способов охлаждения электрических машин согласно ДСТУ 20459-87 (МЭК 34-6).

Система охлаждения представляет собой совокупность охлаждающих сред, каналов охлаждающего тракта и нагнетательных элементов. В электрических машинах нашли применение следующие системы вентиляции: вытяжная, нагнетательная, протяжная и замкнутая, радиальная и аксиальная. Преимущества и недостатки вышеперечисленных систем для различных типов электрических машин. Оценка эффективности и экономичности систем охлаждения.

Замкнутая система вентиляции допускает применение для охлаждения машины не только воздуха, но и водорода. Преимущества водорода по сравнению с воздухом и вытекающие отсюда преимущества водородного охлаждения.

Суть непосредственного охлаждения. Виды каналов в обмотках статора и ротора при водяном и водородном охлаждении. Выбор длины и сечения каналов.

Литература: (1, с. 7–12, 83–86, 100–111; 3, с. 13–22).

Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют способы охлаждения электрических машин?
2. От чего зависит выбор того или иного способа охлаждения электрических машин?

3. Сравнить охлаждающие свойства таких веществ, как воздух, водород, масло, вода.
4. Какие способы охлаждения применяются в турбогенераторах?
5. Перечислить и объяснить преимущества и недостатки водородного охлаждения.
6. Когда применяется водяное охлаждение?
7. Преимущества и недостатки непосредственного охлаждения по сравнению с косвенным.
8. Когда применяется осевая, радиальная и смешанная системы вентиляции?
9. В чем состоит различие систем с вытяжной и нагнетательной вентиляцией?
10. Когда применяется замкнутая система вентиляции?
11. Какой критерий применяется для оценки эффективности систем охлаждения?
12. Какой критерий применяется для оценки экономичности систем охлаждения?
13. Из каких соображений выбираются длина и сечение канала при непосредственном охлаждении?

2.3. Основы теории гидравлических и аэродинамических расчетов

Основные понятия и законы аэродинамики и гидравлики. Понятие о капельных и газообразных жидкостях. Физические свойства жидкостей. Обоснование применения методов гидравлики для вентиляционных расчетов электрических машин. Линии и трубки тока. “Живое” сечение и гидравлический диаметр потока жидкости. Режимы течения жидкости. Цель гидравлических и аэродинамических расчетов. Количественные характеристики аэродинамических и гидравлических цепей. Виды гидравлических сопротивлений. Методика гидравлического расчета. Вентиляторы электрических машин. Устройство и принцип действия центробежного и осевого вентиляторов.

Методические указания

В качестве охлаждающих сред в электрических машинах применяются жидкости и газы. Основные физические свойства жидкостей и газов: плотность, температурное расширение, сжимаемость, вязкость. Капельные жидкости характеризуются большим сопротивлением сжатию и малым сопротивлением растягивающим и касательным усилиям, обусловленным незначительностью сил сцепления и трения между частицами. Газообразные жидкости (газы) обладают большой сжимаемостью, не оказывают сопротивления растягивающим усилиям.

Под идеальной жидкостью подразумевают условную жидкость, обладающую абсолютной несжимаемостью, абсолютной подвижностью частиц, в которой отсутствуют силы сцепления между ними. Уравнения гидростатики и гидродинамики. При течении жидкостей возможны два режима: ламинарный и турбулентный. Условие возникновения турбулентного потока. Частицы жидкости или газа, находящиеся в непосредственной близости от поверхности как бы “прилипают” к ней и скорость потока в точке, находящейся на поверхности стенки, равна нулю. Зона торможения потока называется динамическим пограничным слоем. Свойства пограничного слоя и его роль в конвективном теплообмене.

Методика проведения гидравлических и аэродинамических расчетов одинакова. Различие состоит в количественных характеристиках (скорость движения охлаждающей среды, потери давления) гидравлических и аэродинамических цепей, обусловленных разными физическими свойствами жидкостей и газов. Целью вентиляционных и гидравлических расчетов является выбор нагнетательных элементов, обеспечивающих циркуляцию необходимого количества охлаждающей среды в единицу времени (необходимый расход среды). Потери давления в машине равны давлению, развиваемому нагнетательными элементами (уравнение равновесия). Любой участок гидравлического тракта обладает сопротивлением. В гидравлическом расчете электрической машины должно быть определено ее гидравлическое сопротивление, решено уравнение равновесия, вычислено распределение расходов по отдельным ветвям схемы. Природа возникновения сопротивления течению жидкостей, зависимость гидравлического сопротивления от

условий течения, от шероховатости стенок каналов. Виды местных сопротивлений. Работа центробежных и осевых вентиляторов.

Литература: (1, с. 112–116, 121–124, 148–181; 2, с. 10–58, 74–81).

Вопросы для самопроверки

1. Какие основные свойства жидкости и чем отличается капельная жидкость от газообразной?
2. Что такое вязкость среды?
3. Как изменяется вязкость при изменении температуры жидкости и газа?
4. Основное уравнение гидростатики.
5. Дать определение понятиям “сплошная среда”, “линия тока”, “трубка тока” в поле скоростей текущей жидкости.
6. Как определить режим течения жидкости?
7. Каковы особенности ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости?
8. Сформулировать уравнение Бернулли.
9. Каковы причины возникновения потерь давления при движении жидкости в каналах?
10. Как зависит сопротивление гладких каналов от характера течения жидкости и газа?
11. Как зависит сопротивление канала от шероховатости стенок?
12. Чем вызвано местное гидравлическое сопротивление?
13. Как определить суммарное гидравлическое сопротивление при последовательном и параллельном соединении сопротивлений?
14. Принцип действия центробежного вентилятора.
15. Принцип действия осевого вентилятора.
16. Как величина напора вентилятора зависит от его расхода, относительного радиуса лопаток и угла лопатки на выходе колеса?
17. В чем состоит задача вентиляционного и гидравлического расчетов электрических машин?

2.4. Нестационарные тепловые процессы в электрических машинах

Классическая теория нестационарного нагрева, ее основные допущения. Нагрев и охлаждение электрической машины как однородного тела. Термическая постоянная времени нагрева, ее геометрический и физический смысл. Графическое определение установившегося превышения температуры. Зависимость электрического сопротивления от температуры. Кратковременные перегрузки. Нестационарные тепловые процессы в стандартных режимах работы электрических машин (кратковременный, повторно-кратковременный режимы и другие).

Методические указания

Нестационарные эксплуатационные режимы являются типичными для электрических машин. В основе расчета нестационарного режима лежит классическая теория нагрева однородного тела, к которому при определенных допущениях можно привести электрическую машину. На основании уравнения теплового баланса выводится аналитическое выражение изменения температуры при нагреве и охлаждении однородного тела.

Интенсивность нестационарного теплообмена характеризует термическая постоянная времени, геометрический смысл которой есть подкасательная в произвольной точке кривой нагревания. Физический смысл постоянной времени устанавливается из уравнения теплового баланса при отсутствии теплообмена с окружающей средой.

Иногда в условиях опыта отсутствует возможность определения установившегося превышения температуры, тогда последнее графически определяется по начальному участку кривой нагревания.

Для повышения точности тепловых расчетов необходимо учитывать зависимость электрического сопротивления проводниковых материалов от температуры.

Влияние динамических тепловых процессов проявляется в температурных деформациях и напряжениях, температурном старении изоляционных и других материалов. Особенно это выражено при коротком замыкании. Существует аналитическая зависимость превышения температуры от плотности тока и времени при коротком замыкании. При изучении кратковременных и повторно-кратковременных режимов работы определяется

допустимая полезная мощность, до которой можно нагрузить двигатель в этих режимах.

Литература: (1, с. 75–79; 2, с. 215–224).

Вопросы для самопроверки

1. Какие режимы работы электрических машин сопровождаются нестационарными тепловыми процессами?
2. Перечислить основные допущения классической теории нестационарного нагрева.
3. Объяснить структуру уравнения теплового баланса.
4. Уравнение нагревания однородного тела.
5. Уравнение остывания однородного тела.
6. Физический смысл термической постоянной времени.
7. Какой геометрический смысл имеет термическая постоянная времени?
8. От чего зависит термическая постоянная времени?
9. Как графически определить установившийся нагрев?
10. Как зависит электрическое сопротивление от температуры?
11. Зависимость перегрева обмотки при коротком замыкании от плотности тока и времени.
12. Охарактеризовать процесс нагрева при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы.

2.5. Тепловые расчеты электрических машин в стационарном режиме

Задача теплового расчета. Обзор современных методов теплового расчета электрических машин. Метод эквивалентных тепловых схем замещения (ЭТС). Расчет тепловых сопротивлений. Эквивалентные тепловые схемы различных типов электрических машин. Метод температурного поля. Аналитические и численные методы расчета температурного поля. Метод конечных элементов и современные пакеты прикладных программ для расчета температурного поля.

Методические указания

В задачи теплового расчета входит определение температур активных частей машины и сравнение ее с допустимыми температурами, указанными в ДСТУ 183-74. Исходными данными для теплового расчета служат потери энергии в активных частях электрической машины, значения коэффициентов теплопроводности и условия охлаждения на граничных поверхностях. Существует два основных метода тепловых расчетов: метод температурного поля и метод ЭТС.

В настоящее время метод ЭТС получил самое широкое распространение. Метод ЭТС базируется на следующих допущениях. Действительные распределенные источники тепла и распределенные тепловые сопротивления заменяются сосредоточенными источниками тепла и сосредоточенными эквивалентными тепловыми сопротивлениями и тепловыми емкостями. Тепловые сопротивления предполагаются не зависящими от величины теплового потока. Это дает возможность свести метод ЭТС к линейным тепловым цепям. Реальный элемент с распределенными потерями в ЭТС заменяется эквивалентным элементом с сосредоточенными потерями. Такая эквивалентная замена предполагает преобразование линейного размера. Толщина эквивалентной пластины будет зависеть от того, какую температуру (среднюю или максимальную) сохраняют при преобразовании. Расчет теплового сопротивления при двумерном течении тепла ведется по правилам параллельного сложения сопротивлений электрической линейной цепи. Тепловые сопротивления ЭТС должны соответствовать характеру теплообмена. Они бывают кондукционные и конвективные.

Температуры в узлах ЭТС замещения определяются путем решения системы уравнений теплового баланса на основе принципа электротепловой аналогии с использованием законов Кирхгофа (аналогично электрическим цепям). ЭТС электрических машин составляется на основании анализа картины распределения тепловых потоков и предварительных оценок величин отдельных тепловых сопротивлений.

Литература: (1, с. 68–71; 2, с. 167–215; 3, с. 255–262, 277–290 299–366, 447–460).

Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит цель теплового расчета электрической машины?
2. Какие существуют методы тепловых расчетов электрических машин?
3. Как рассчитывается перегрев обмотки статора по методу тепловых параметров?
4. Когда применяется метод температурного поля и на чем он основывается?
5. Какие допущения лежат в основе метода ЭТС?
6. Какую толщину должна иметь эквивалентная пластина без внутренних источников тепла, имеющая среднюю температуру такую же, как и реальная пластина с внутренними источниками тепла?
7. Какие виды тепловых сопротивлений встречаются в ЭТС? Как они рассчитываются?
8. Какими уравнениями описывается ЭТС?
9. Последовательность теплового расчета по методу ЭТС?
10. Составить ЭТС главных и добавочных полюсов вентилируемой машины постоянного тока.
11. Составить ЭТС якоря вентилируемой машины постоянного тока.
12. Составить ЭТС асинхронного двигателя защищенного исполнения с аксиальной вентиляцией.

2.6. Оребрение электрических машин

Задачи оребрения. Теплопередача вдоль стержня. Расчет ребра произвольного профиля.

Методические указания

В конструкциях электрических машин имеются детали в виде стержней и ребер, через которые осуществляется отвод тепла. Задача расчета таких элементов сводится к нахождению распределения температуры, величины отводимого теплового потока и оптимальных геометрических размеров. Температурное поле ребра находится путем решения уравнения тепло-

проводности ребра. Если бы теплопроводность ребра была идеальной, то вся поверхность ребра имела бы одинаковую температуру, равную температуре у основания ребра, и отводимый поток достигал бы максимально возможного значения. Для оценки ухудшения теплоотвода по сравнению с идеальным случаем применяется коэффициент эффективности ребра.

На практике из технологических соображений используются ребра непрямоугольного профиля. Расчет ребер произвольного профиля сложный, поэтому разработаны упрощенные методики, приведенные к методике расчета прямого ребра прямоугольного профиля.

Сравнение различных прямых ребер.

Литература: (2, с. 120–124; 3, с. 156–65).

Вопросы для самопроверки

1. С какой целью выполняется оребрение?
2. Температурное поле ребра прямоугольного профиля.
3. Как выражается полный тепловой поток, отводимый ребром?
4. Что такое коэффициент эффективности ребра и от каких факторов он зависит?
5. Что такое коэффициент оребрения?

2.7. Теплообменники в электрических машинах

Классификация теплообменных аппаратов по принципу действия. Конструкция рекуперативных теплообменников. Уравнения теплопередачи и теплового баланса для теплообменников. Схемы движения теплоносителей в теплообменниках. Характер изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена. Средняя разность температур теплоносителей и методы ее вычисления. Задачи проектных и поверочных расчетов теплообменников. Расчет конечной температуры рабочих жидкостей.

Методические указания

По принципу действия теплообменные аппараты делятся на рекуперативные, регенеративные и смешительные. В электрических машинах применяются рекуперативные теплообменники. Механизм теплообмена в них сводится к передаче теплоты от горячего теплоносителя к холодному через

стенку. Конструкция рекуперативных теплообменников и их типы в зависимости от рода охлаждающей среды (воздухо- и газоохладители, водоводяные теплообменники и т. д.).

Процесс теплообмена в теплообменнике описывается двумя основными соотношениями: уравнением теплового баланса и уравнением теплопередачи. Из уравнения теплового баланса выводится соотношение между эквивалентами и изменениями температур горячей и холодной жидкостей.

Характер изменения температур жидкостей по поверхности теплообменного аппарата зависит от схемы их движения и водяных эквивалентов. Наиболее простыми схемами движения являются: прямоток, противоток и перекрестный ток.

Методы определения среднего температурного напора. Различают среднюю логарифмическую разность температур и среднюю арифметическую разность температур теплоносителей в теплообменнике. Средний температурный напор определяется как среднее арифметическое из крайних напоров, если температуры теплоносителей изменяются по поверхности незначительно.

Расчеты теплообменников делятся на проектные и поверочные. При поверочном расчете определяются производительность теплообменника и конечные температуры рабочих жидкостей.

Литература: (1, с. 80–82; 4, с. 187–202).

Вопросы для самопроверки

1. Что называется теплообменным аппаратом?
2. Как классифицируются теплообменники по принципу действия?
3. Принцип действия рекуперативного теплообменника.
4. Описать конструкцию теплообменных аппаратов.
5. Какими уравнениями описывается процесс теплообмена в теплообменнике?
6. От чего зависит коэффициент теплопередачи?
7. Что такое водяной эквивалент и его влияние на перепад температуры теплоносителя?
8. От чего зависит характер изменения температуры жидкостей по поверхности теплообменника?

9. Какие существуют методы определения среднего температурного напора?

10. Какие существуют типы теплообменников в зависимости от вида охлаждающей среды?

11. Сформулировать задачи проектных и поверочных расчетов теплообменников.

12. Как рассчитываются конечные температуры рабочих сред в теплообменнике?

3. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

3.1. Указания к выполнению и оформлению контрольной работы

Каждому студенту необходимо выполнить по изучаемой дисциплине контрольную работу, номер варианта которой определяется по двум последним цифрам шифра зачетной книжки студента.

Контрольная работа представляет собой решение задачи вентиляционного расчета электрической машины с аксиальной системой вентиляции. Ее цель – практическое освоение методики вентиляционного расчета. Выполнение контрольной работы начинают с изложения задания и исходных данных. Затем приводят решение задачи в соответствии с предложенным ниже планом. Решение следует проводить в общем виде и в полученные формулы подставлять цифровые значения величин, указывая размерность полученного результата. Необходимо обосновывать выбранный путь решения: каждый пункт расчета должен сопровождаться краткими, но достаточными пояснениями. В конце работы следует привести перечень использованной литературы.

Контрольную работу выполняют в отдельной тетради. Текст размещают так, чтобы справа оставались поля шириной 4 см для заметок преподавателя. Текст сопровождают рисунками, поясняющими решение задачи. Обозначение единиц физических величин, условные буквенные обозначения электромагнитных, тепловых и других величин, условных графических обозначений, рисунков, таблиц, ссылки на литературу, оформление списка литературы должны соответствовать установленным стандартам. Терминология и определения должны быть едиными и соответствовать общепринятым в научно-технической литературе.

При исправлении контрольной работы по замечаниям рецензента стирать или заклеивать замечания не разрешается. Вместе с исправленной работой необходимо представлять для повторной проверки первоначальный вариант работы с замечаниями рецензента. В случае исправления по отдельным замечаниям можно вклеивать листы с новым (исправленным) текстом.

3.2. Содержание контрольной работы

Выполнить поверочный вентиляционный расчет двигателя постоянного тока защищенного исполнения с самовентиляцией; система вентиляции – аксиальная. Вентилятор – центробежный с радиальными лопатками (рис. 3.1).

Заданы:

удельная теплоемкость воздуха $c = 1010 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;

плотность воздуха $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$;

подогрев воздуха $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

коэффициент трения в каналах $\lambda = 0,08$.

Остальные исходные данные к заданию приведены в таблице 3.1.

Требуется:

1. Описать схему вентиляции заданного двигателя.
2. Составить схему замещения системы вентиляции заданного двигателя.
3. Определить требуемый расход воздуха.
4. Рассчитать гидравлические сопротивления вентиляционного тракта.
5. Рассчитать и построить характеристику давления вентиляционного тракта двигателя.
6. Рассчитать характеристику давления вентилятора.
7. Определить рабочий расход и рабочий напор вентилятора.
8. Определить расходы воздуха в параллельных ветвях вентиляционного тракта.
9. Определить затраты мощности на вентиляцию.

Методические указания

1. При описании схемы вентиляции заданного двигателя схематично изобразить устройство машины, показав на рисунке стрелками направление движения воздуха и перечислив конструктивные элементы, через которые проходит воздух (см. рис. 3.1.). Описать, какие гидравлические сопротивления встречает на своем пути охлаждающий поток воздуха.

2. При определении аэродинамической характеристики системы охлаждения последняя представляется в виде схемы замещения, содержащей

сосредоточенные гидравлические сопротивления, заменяющие путевые и местные сопротивления, которые в действительности распределены на некоторых участках тракта. Схема замещения рассматриваемой в задаче системы вентиляции приведена на рис. 3.2.

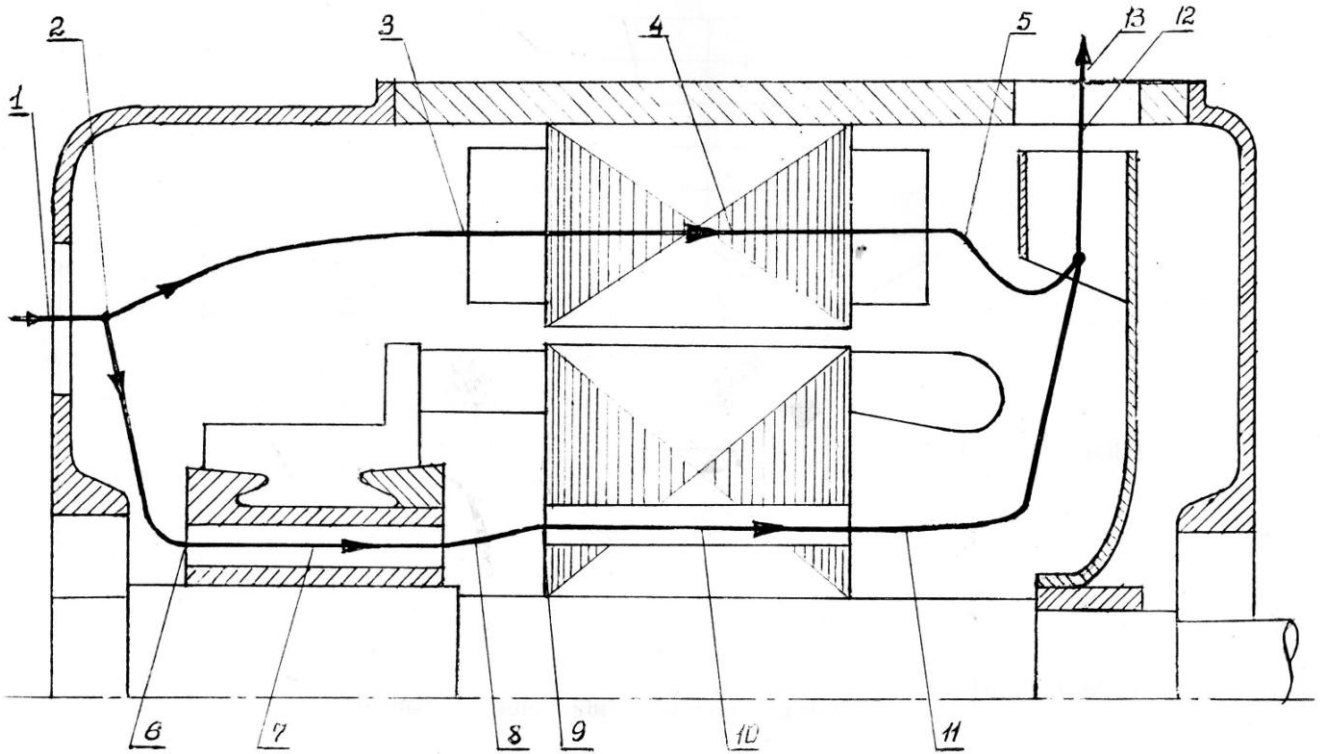


Рисунок 3.1. Схема вентиляции двигателя постоянного тока

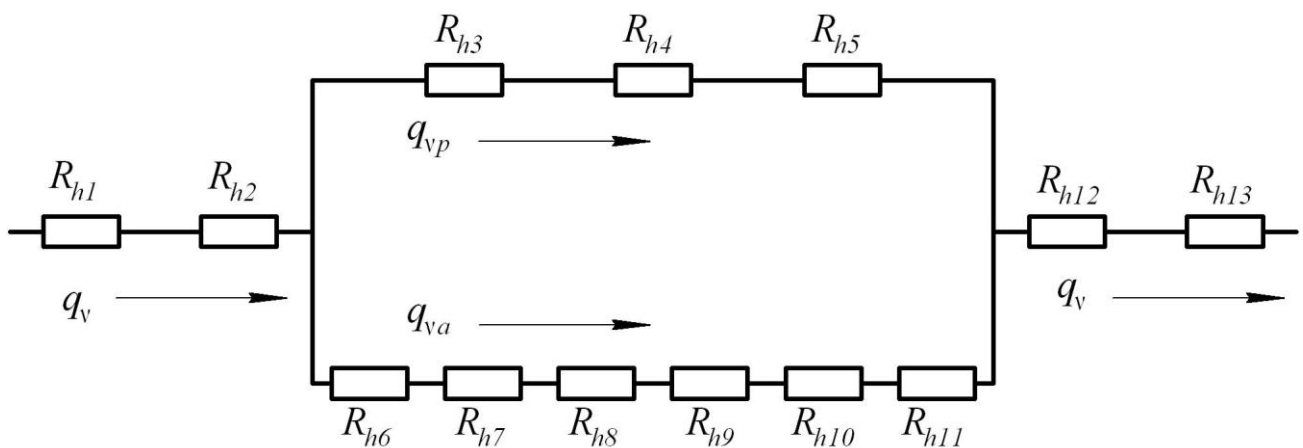


Рисунок 3.2. Схема замещения системы вентиляции двигателя постоянного тока

3. Требуемый расход определяется по формуле:

$$q_v = \frac{\Delta P}{c_p \Delta \theta}$$

4. Двигаясь в канале, воздух преодолевает гидравлические сопротивления различного вида: путевые и местные. Путевые гидравлические сопротивления обусловлены силами трения, а местные гидравлические сопротивления обусловлены конструктивными элементами и местными преградами в потоке (поворот потока, сужение, расширение и т.п.).

Путевое сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R_{hfr} = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot l}{2S^2 \cdot d_h}$$

где λ – коэффициент трения;

ρ – плотность среды;

l и d_h – длина и гидравлический диаметр канала;

S – площадь проходного сечения канала.

Местное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R_{hpl} = \frac{\xi \cdot \rho}{2 \cdot S^2}$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления.

Обычно основную долю гидравлического сопротивления электрических машин составляют местные сопротивления. Расчет путевых и местных сопротивлений ведется с использованием опытных значений коэффициентов λ и ξ , которые выражают в виде эмпирических формул, графиков или таблиц.

При подсчете гидравлических сопротивлений необходимо обращать внимание на определение характерного сечения, площадь которого необходимо подставлять в формулы. Обычно в качестве характерного принимают сечение с меньшей площадью. Расчет гидравлических сопротивлений сведен в таблицу 3.2.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета

Наименование данных	Вариант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Потери двигателя ΔP , Вт	3424	3838	6434	10255	16894	4826	5825	8248	11644
Частота вращения n , об/мин	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Диаметр якоря d_{ae} , м	0,21	0,21	0,294	0,327	0,368	0,245	0,245	0,294	0,327
Длина якоря l_a , м	0,125	0,165	0,15	0,19	0,265	0,135	0,175	0,205	0,24
Число аксиальных каналов n_v	15	15	21	24	27	18	18	21	24
Диаметр аксиального канала якоря d_v , м	0,017	0,017	0,022	0,022	0,024	0,02	0,02	0,022	0,022
Диаметр обмоткодержателя d_8 , м	0,15	0,15	0,21	0,235	0,265	0,178	0,178	0,21	0,235
Внутренний диаметр якоря d_{ai} , м	0,065	0,065	0,085	0,10	0,115	0,075	0,075	0,085	0,10
Длина канала между полюсного окна l_4 , м	0,165	0,218	0,197	0,25	0,348	0,178	0,23	0,27	0,316
Эквивалент-	0,015	0,0147	0,018	0,02	0,021	0,0173	0,017	0,018	0,02

ный диаметр канала между полюсного окна d_{eq4} , м	2		7		2		8	7	
Длина канала втулки коллектора l_7 , м	0,09	0,12	0,15	0,22	0,26	0,12	0,15	0,18	0,22
Эквивалентный диаметр канала втулки коллектора d_{eq7} , м	0,008	0,008	0,015	0,02	0,03	0,01	0,01	0,015	0,02
Площадь поперечного сечения каналов втулки коллектора S_7 , м ²	0,003 2	0,0032	0,006	0,008	0,012	0,004	0,004	0,006	0,008
Площадь входных окон подшипникового щита S_1 , м ²	0,032	0,032	0,045	0,05	0,055	0,0377	0,037 7	0,045	0,05

Продолжение таблицы 3.1

Наименование данных	Вариант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Площадь поперечного сечения про-	0,105	0,105	0,145	0,16	0,18	0,12	0,12	0,145	0,16

странства над коллектором $S_2, \text{м}^2$									
Площадь поперечного сечения между полюсных окон $S_4, \text{м}^2$	0,014	0,013	0,021 5	0,024	0,027	0,018	0,01 9	0,021 5	0,024
Площадь пространства над лобовыми частями со стороны заднего подшипникового щита $S_5, \text{м}^2$	0,096	0,096	0,135	0,15	0,169	0,112	0,11 2	0,112	0,135
Площадь поперечного сечения выходной решетки $S_{12}, \text{м}^2$	0,032 2	0,0322	0,045 5	0,05	0,056 5	0,0375	0,03 75	0,045 5	0,05
Наружный диаметр вентилятора $d_2, \text{м}$	0,31	0,32	0,42	0,45	0,56	0,33	0,39	0,41	0,5
Внутренний диаметр вентилятора $d_1, \text{м}$	0,23	0,23	0,3	0,32	0,36	0,25	0,26	0,31	0,33
Ширина лопаток вентилятора $b_{bl}, \text{м}$	0,025	0,024	0,03	0,04	0,045	0,028	0,03 2	0,032	0,045

Продолжение таблицы 3.1

Наименование данных	Вариант							
	10	11	12	13	14	15	16	17
Потери двигателя ΔP , Вт	14890	2038	3480	4210	4415	5525	5839	7642
Частота вращения n , об/мин	1500	600	600	800	800	1000	1000	1200
Диаметр якоря d_{ae} , м	0,368	0,245	0,245	0,245	0,294	0,294	0,294	0,294
Длина якоря l_a , м	0,215	0,17	0,285	0,255	0,18	0,175	0,205	0,23
Число аксиальных каналов n_v	27	18	18	18	21	21	21	21
Диаметр аксиального канала якоря d_v , м	0,024	0,02	0,02	0,02	0,022	0,022	0,022	0,022
Диаметр обмоткодержателя d_8 , м	0,265	0,178	0,178	0,178	0,21	0,21	0,21	0,21
Внутренний диаметр якоря d_{ai} , м	0,115	0,075	0,075	0,075	0,085	0,085	0,085	0,085
Длина канала между полюсного окна l_4 , м	0,283	0,224	0,375	0,336	0,236	0,23	0,27	0,3
Эквивалентный диаметр канала между полюсного окна d_{eq4} , м	0,0212	0,0168	0,0173	0,0178	0,0163	0,0175	0,0178	0,0187
Длина канала втулки коллектора l_7 , м	0,26	0,09	0,12	0,12	0,15	0,15	0,15	0,22
Эквивалентный диаметр канала втулки коллектора d_{eq7} , м	0,03	0,01	0,01	0,01	0,015	0,015	0,015	0,015
Площадь поперечного сечения каналов втулки коллектора S_7 , м ²	0,012	0,004	0,004	0,004	0,006	0,006	0,006	0,006
Площадь входных окон подшипникового	0,055	0,0377	0,0377	0,0377	0,045	0,045	0,045	0,045

щита $S_1, \text{м}^2$								
------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы 3.1.

Наименование данных	Вариант							
	10	11	12	13	14	15	16	17
Площадь поперечного сечения пространства над коллектором $S_2, \text{м}^2$	0,18	0,12	0,12	0,12	0,145	0,145	0,145	0,145
Площадь поперечного сечения междуплюсных окон $S_4, \text{м}^2$	0,027	0,017	0,018	0,019	0,016	0,0185	0,019	0,021
Площадь пространства над лобовыми частями со стороны заднего подшипникового щита $S_5, \text{м}^2$	0,15	0,169	0,112	0,112	0,135	0,135	0,135	,135
Площадь поперечного сечения выходной решетки $S_{12}, \text{м}^2$	0,0565	0,0375	0,0375	0,0375	0,0455	0,0455	0,0455	0,0455
Наружный диаметр вентилятора $d_2, \text{м}$	0,5	0,39	0,39	0,39	0,47	0,47	0,47	0,47
Внутренний диаметр вентилятора $d_1, \text{м}$	0,37	0,25	0,26	0,27	0,31	0,31	0,32	0,33
Ширина лопаток вентилятора $b_{bl}, \text{м}$	0,05	0,031	0,032	0,033	0,038	0,037	0,036	0,035

Площадь сечения каналов обмоткодержателя

$$S_8 = S_{11} = \frac{\pi(d_8^2 - d_{ai}^2)}{4}.$$

Площадь сечения аксиальных вентиляционных каналов якоря и их длина

$$S_{10} = \frac{n_v \cdot \pi d_{va}^2}{4}; \quad l_{10} = l_a.$$

Таблица 3.2. – Расчет гидравлических сопротивлений

Обозначение сопротивления	Номер и наименование участка	Причина возникновения сопротивления	Расчетная формула	Значения ξ_i, λ	Подстановка численных значений и вы-
---------------------------	------------------------------	-------------------------------------	-------------------	---------------------------	--------------------------------------

					числение R_h
Вход в машину					
R_{h1}	1. Вход через жалюзи подшипникового щита	Вход в отверстие с толстыми стенками	$\frac{\xi_1 \cdot \rho}{2 \cdot S_1^2}$	$\xi_1 = 0,5$	
R_{h2}	2. Вход в камеру под коллектором	Внезапное расширение	$\frac{\xi_2 \cdot \rho}{2 \cdot S_1^2}$	$\xi_2 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$	
Проход воздуха между полюсными катушками					
R_{h3}	3. Вход в пространство между полюсными катушками	Внезапное сужение	$\frac{\xi_3 \cdot \rho}{2 \cdot S_4^2}$	$\xi_3 = 0,5 \left(1 - \frac{S_4}{S_2}\right)$	
R_{h4}	4. Междуполюсные каналы	Гидродинамическое трение	$\frac{\lambda \cdot \rho \cdot l_4}{2 \cdot d_{eq4} \cdot S_4^2}$	$\lambda = 0,08$	
R_{h5}	5. Выход из междуполюсных окон	Внезапное расширение	$\frac{\xi_5 \cdot \rho}{2 \cdot S_4^2}$	$\xi_5 = \left(1 - \frac{S_4}{S_5}\right)^2$	

Продолжение таблицы 3.2

Проход воздуха через вентиляционные каналы якоря					
R_{h6}	6. Вход в вентиляционные каналы коллекторной втулки	Внезапное сужение	$\frac{\xi_6 \cdot \rho}{2 \cdot S_7^2}$	$\xi_6 = 0,5 \left(1 - \frac{S_7}{S_2}\right)$	
R_{h7}	7. Каналы коллекторной втулки	Гидродинамическое трение	$\frac{\lambda \cdot \rho \cdot l_7}{2 \cdot d_{eq7} \cdot S_7^2}$	$\lambda = 0,08$	

R_{h8}	8. Выход из каналов колектора	Внезапное расширение	$\frac{\xi_8 \cdot \rho}{2 \cdot S_7^2}$	$\xi_8 = \left(1 - \frac{S_7}{S_8}\right)^2$	
R_{h9}	9. Вход в аксиальные вентиляционные каналы якоря	Внезапное сужение	$\frac{\xi_9 \cdot \rho}{2 \cdot S_{10}^2}$	$\xi_9 = 0,5 \left(1 - \frac{S_{10}}{S_8}\right)$	
R_{h10}	10. Вентиляционные каналы	Гидродинамическое трение	$\frac{\lambda \cdot \rho \cdot l_{10}}{2 \cdot d_{10} \cdot S_{10}^2}$	$\lambda = 0,08$	
R_{h11}	11. Выход из вентиляционных каналов	Внезапное расширение	$\frac{\xi_{11} \cdot \rho}{2 \cdot S_{10}^2}$	$\xi_{11} = \left(1 - \frac{S_{10}}{S_{11}}\right)^2$	
Выход из машины					
R_{h12}	12. Проход через выходную решетку	Проход через отверстие с толстыми стенками	$\frac{\xi_{12} \cdot \rho}{2 \cdot S_{12}^2}$	$\xi_{12} = 0,5$	
R_{h13}	13. Выход воздуха в атмосферу	Выход в открытый канал	$\frac{\xi_{13} \cdot \rho}{2 \cdot S_{12}^2}$	$\xi_{13} = 1$	

Суммарное гидравлическое сопротивление охлаждающего тракта рассчитывается по формуле

$$R_{h\Sigma} = R_{hin} + R_{heq} + R_{hout},$$

где

$$R_{hin} = R_{h1} + R_{h2},$$

$$R_{heq} = \frac{R_{hp} \cdot R_{ha}}{\left(\sqrt{R_{hp}} + \sqrt{R_{ha}}\right)^2},$$

$$R_{hp} = R_{h3} + R_{h4} + R_{h5},$$

$$R_{ha} = R_{h6} + R_{h7} + R_{h8} + R_{h9} + R_{h10} + R_{h11},$$

$$R_{hout} = R_{h12} + R_{h13}.$$

5. Характеристика давления вентиляционного тракта рассчитывается по формуле:

$$\Delta p = R_{h\Sigma} \cdot q_v^2.$$

Задаваясь рядом значений q_v , рассчитывают и строят характеристику вентиляционного тракта двигателя $\Delta p = f(q_v)$

6. Рассчитывается характеристика вентилятора $\Delta p = f(q_v)$.

Рассчитывают давление при холостом ходе вентилятора по формуле:

$$\Delta p_0 = \eta_0 \rho (v_2^2 - v_1^2),$$

где η_0 – гидравлический КПД вентилятора в режиме холостого хода. Для вентиляторов с радиальными лопатками $\eta_0 = 0,6$;

v_1, v_2 – окружные скорости по внутреннему и наружному диаметрам лопаток соответственно

$$v_1 = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{60}; \quad v_2 = \frac{\pi \cdot d_2 \cdot n}{60}.$$

Определяют максимальный расход вентилятора по формуле

$$q_{v\max} = 0,42 \cdot S_2 \cdot v_2,$$

где S_2 – площадь выходного сечения рабочего колеса вентилятора,

$$S_2 = 0,92 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_{bl}.$$

Характеристику давления вентилятора рассчитывают по формуле

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{q_v}{q_{v\max}} \right)^2 \right].$$

7. Задаваясь рядом значений q_v рассчитывают и строят характеристику вентилятора на том же графике, где построена характеристика воздухопровода

машины. Находят точку пересечения характеристик. Эта точка определяет истинный расход воздуха q_{vw} и напор вентилятора Δp_w (рис. 3.3).

8. Частичные расходы в параллельных ветвях определяют исходя из положения, что при параллельном соединении сопротивлений падения давлений на них равны:

$$R_{hp} \cdot q_{vp}^2 = R_{ha} \cdot q_{va}^2.$$

На основании первого закона Кирхгофа

$$q_{vw} = q_{va} + q_{vp}.$$

Решая совместно эти два уравнения, находят частичные расходы в параллельных ветвях.

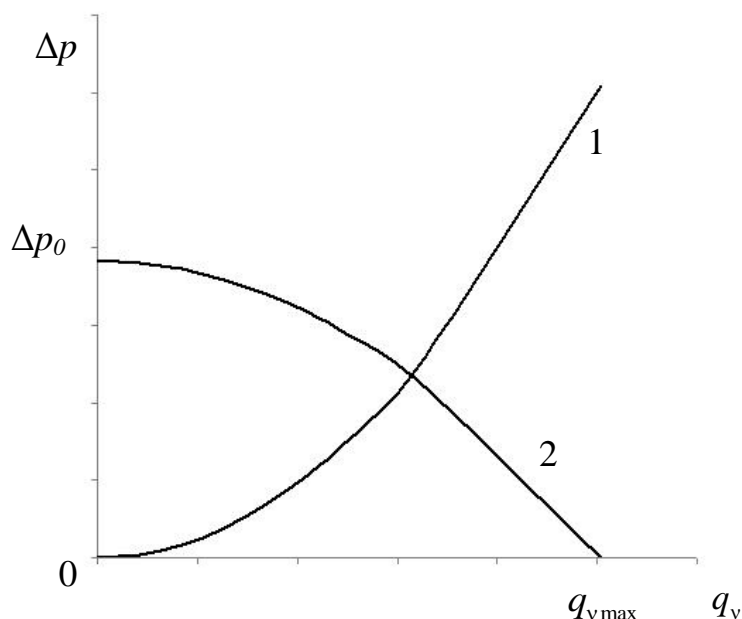


Рисунок 3.3.– Характеристики вентиляционного тракта (1) и вентилятора (2)

Вентиляционные потери определяют по формуле:

$$\Delta P_{vent} = \frac{\Delta p_w \cdot q_{vw}}{\eta_e},$$

где η_e – энергетический КПД вентилятора. Для вентилятора с радиальными лопатками $\eta_e = 0,15 - 0,2$.

Пример расчета

Для двигателя постоянного тока произвести вентиляционный расчет.

Исходные данные:

$$\Delta P = 1623,4 \text{ Вт}; \quad n = 1500, \text{ об/мин}; \quad d_{ae} = 0,164 \text{ м}; \quad l_a = 0,17, \text{ м};$$

$$d_{ae} = 0,164 \text{ м}; \quad n_v = 11; \quad d_v = 0,013 \text{ м}; \quad d_8 = 0,113 \text{ м}; \quad l_4 = 0,25 \text{ м};$$

$$d_{eq4} = 0,077 \text{ м}; \quad l_7 = 0,113 \text{ м}; \quad d_{eq7} = 0,051 \text{ м}; \quad S_7 = 0,00124 \text{ м}^2;$$

$$S_1 = 0,01 \text{ м}^2; \quad S_2 = 0,022 \text{ м}^2; \quad S_4 = 0,0048 \text{ м}^2; \quad S_5 = 0,0197 \text{ м}^2;$$

$$S_{12} = 0,0124 \text{ м}^2; \quad D_2 = 0,2 \text{ м}; \quad D_1 = 0,12 \text{ м}; \quad b_{bl} = 0,04 \text{ м}.$$

Результаты расчета гидравлических сопротивлений сведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета гидравлических сопротивлений

Сечение канала, м ²	ξ, λ	Гидравлическое сопротивление, Н·с ² /м ⁸
$S_1 = 0,01$	$\xi_1 = 0,5$	$R_{h1} = 3000$
$S_2 = 0,022$	$\xi_2 = 0,2975$	$R_{h2} = 1785$
$S_4 = 0,048$	$\xi_3 = 0,391$	$R_{h3} = 10180$
$S_5 = 0,0197$	$\lambda = 0,08$	$R_{h4} = 6764$
	$\xi_5 = 0,573$	$R_{h5} = 14897$
$S_7 = 0,00124$	$\xi_6 = 0,472$	$R_{h6} = 184112$
	$\lambda = 0,08$	$R_{h7} = 69168$
$S_8 = 0,00782$	$\xi_8 = 0,709$	$R_{h8} = 276259$
$S_{10} = 0,00146$	$\xi_9 = 0,407$	$R_{h9} = 114578$
	$\lambda = 0,08$	$R_{h10} = 294747$
$S_{11} = 0,00782$	$\xi_{11} = 0,663$	$R_{h11} = 186385$
$S_{12} = 0,0124$	$\xi_{12} = 0,5$	$R_{h12} = 1951$
	$\xi_{13} = 1$	$R_{h13} = 3902$

$$R_{hin} = 4785; \quad R_{hout} = 5853; \quad R_{hp} = 31841; \quad R_{ha} = 1125250; \quad R_{heq} = 23332$$

Гидравлическое сопротивление двигателя

$$R_{h\Sigma} = 33970 \text{ кг/м}^7.$$

Для расчета характеристики вентилятора: давления при холостом ходе вентилятора

$$\Delta p_0 = 113,58 \text{ Па}.$$

Максимальный расход воздуха

$$q_{v\max} = 0,152 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Точка пересечения характеристик воздухопровода двигателя и вентилятора дает истинный расход воздуха $q_{vw} = 0,0541 \text{ м}^3/\text{с}$ и напор вентилятора $\Delta p_w = 99,29 \text{ Па}$.

Частичные расходы в параллельных ветвях

$$q_{va} = 0,0079 \text{ м}^3/\text{с}; \quad q_{vp} = 0,0463 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Вентиляционные потери

$$\Delta P_{vent} = \frac{0,0541 \cdot 99,29}{0,2} = 26,84 \text{ Вт}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах./ И.Ф. Филиппов. – - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. –256 с.
2. Сипайлов Г. А., Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах./ Г.А.Сипайлов, Д.И.Санников, В. А. Жадан – М.: Высш. шк.,1989.–239 с.
3. Борисенко А. И., Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах./ А. И.Борисенко, В. Г. Данько, А. И.Яковлев –М.: Энергия, 1974.–560 с.
4. Теоретические основы тепло- и хладотехники: учеб. пособие/ под ред. проф. Э. И. Гуйго. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1976.–224 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах./ И.Ф. Филиппов. – - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. –256 с.
2. Сипайлов Г. А., Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах./ Г.А.Сипайлов, Д.И.Санников, В. А. Жадан – М.: Высш. шк.,1989.–239 с.
3. Борисенко А. И., Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах./ А. И.Борисенко, В. Г. Данько, А. И.Яковлев –М.: Энергия, 1974.–560 с.
4. Теоретические основы тепло- и хладотехники: учеб. пособие/ под ред. проф. Э. И. Гуйго. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1976.–224 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие указания.....	
2. Типовая программа и указания к темам курса.....	
2.1. Введение. Общие вопросы теплообмена.....	
2.2. Способы и системы охлаждения электрических машин.....	
2.3. Основы теории гидравлических и аэродинамических расчетов.....	
2.4. Нестационарные тепловые процессы в электрических машинах.....	
2.5. Тепловые расчеты электрических машин в стационарном режиме.....	
2.6. Оребрение электрических машин.....	
2.7. Теплообменники в электрических машинах.....	
3. Контрольная работа.....	
3.1. Указания к выполнению и оформлению контрольной работ.....	
3.2. Содержание контрольной работы	
Список литературы.....	

ТИПОВА ПРОГРАМА, МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
І КОНТРОЛЬНА РОБОТА З КУРСУ «ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ»
для студентів спеціальності 7.050702
«Електричні машини і апарати»
заочної форми навчання

Російською мовою

Укладачі: Гаєвська Ірина Гнатівна
Галайко Лідія Петрівна
Щукін Ігор Сергійович

Відповідальний за випуск В.І. Мілих

Роботу до видання рекомендував В.Т. Долбня

Редактор О.С. Самініна

План 2012 р., поз. 112

Підп. до друку Формат 60x84 1/16 Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.1,6 Обл.-вид. арк. 1,8

Наклад 100 прим. Зам. № Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП»

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХП», 61002, вул. Фрунзе, 21