

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

кафедра Электрические машины и электропривод

«Допущен к защите»
Заведующий кафедрой Кашева
К.Ж. к.т.н.
(Ф.И.О., ученая степень, звание)

« _____ » _____ 20__ г.
(подпись)

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Проектирование турбогенератора

Выполнил (а) Кудайберг Д.С. ЭАТК-15-7
(Фамилия и инициалы студента) группа

специальность 5В071800 - электроэнергетика

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

Шидерова Р.М. « 25 » мая 2019г.
(подпись)

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

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

Консультанты:

по экономической части:

Исакулов А.А. к.э.н., профессор
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
Исакулов А.А. « 4 » 06 2019г.
(подпись)

по безопасности жизнедеятельности:

Сакатова Т.С. к.т.н., доцент
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
Сакатова Т.С. « 11 » 06 2019г.
(подпись)

нормоконтролер

Мархамбетова М.В. стар. пр.
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
Мархамбетова М.В. « 13 » 06 2019г.
(подпись)

Алматы 2019 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Институт Электроэнергетики и электротехники
Специальность 58071800 - электроэнергетика
Кафедра Электрические машины и электропривод

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Студент Кулбаев Досжан Сәкеұлы
(фамилия, имя, отчество)

Тема работы Проектирование турбогенератора

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 проектирования турбогенератора был использован турбогенератор ТВ-50-2.
Разработана новая изоляция для модернизации турбогенератора.

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

1. Расчет турбогенератора
2. Тепловой расчет
3. Механический расчет
4. Технологии изготовления полиимидной статорной изоляции.
5. Безопасность жизнедеятельности
6. Экологическая часть.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Схема турбогенератора ТВ-50-2
2. План статора турбогенератора 50 МВт
3. Схема турбогенератора
4. Расчетная модель контурного заземителя.

Рекомендуемая основная литература

1. Абрамов А.И., Извеков В.И., Сервискин Н.А. Проектирование турбогенераторов. М., 1990.
2. Азбучкин Ю.И., АВРух В.Ю. Модернизации турбогенераторов - М. Энергия, 1980.
3. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. Учебное пособие для вузов - М. Энергия, 1979.


Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов


| Раздел | Консультант | Сроки | Подпись |
|---------------------|---------------|------------------|----------|
| БНД | Сейидова Г.С. | 10.02 - 11.06.19 | Сейидова |
| Экономическая часть | Жакупов А.А. | 13.03 - 4.06.19 | Жакупов |
| Освоение части | Шидерова Р.И. | 15.05 - 10.06.19 | Шидерова |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

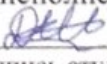
ГРАФИК
подготовки дипломной работы

| № п/п | Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки представления руководителю | Примечание |
|-------|--|----------------------------------|------------|
| 1. | Расчет турбогенератора | 15.01.2019 | Выполнено |
| 2. | Электромагнитный расчет | 19.01.2019 | Выполнено |
| 3. | Тепловой расчет | 01.02.2019 | Выполнено |
| 4. | Механический расчет | 20.02.2019 | Выполнено |
| 5. | Расчет на напряжение в книге | 01.03.2019 | Выполнено |
| 6. | Технология изготовления полиимидной статорной изоляции | 02.04.2019 | Выполнено |
| 7. | Разработка мер электрической безопас- ности | 15.05.2019 | Выполнено |
| 8. | Экономический расчет статора турбогенератора ТВ-50-2 с новой изоля- цией. | 21.05.2019 | Выполнено |
| 9. | Расчет прибыли и сроки окупаемости | 21.05.2019 | Выполнено |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Дата выдачи задания « 15 » 01 20 19 г.

Заведующий кафедрой  Камелва К.К.
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Руководитель  Шидурова П.М.
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению  Кудбаев Д.С.
(подпись студента) (Фамилия и инициалы)

Аннотация

В дипломном проекте на основе старого турбогенератора ТВ-50-2 спроектирован новый, усовершенствованный. Произведен расчет турбогенератора. Перевод водородного охлаждения на воздушное, замена традиционной электрической изоляции турбогенератора на новую полиимидную изоляцию алициклического строения. Рассчитан статор, зубцовая зона и ярмо ротора, выведены параметры и постоянные времени, статическая перегружаемость и токи короткого замыкания, потери мощности и коэффициент полезного действия. Сделаны электромагнитный технологический, тепловой и механический расчеты. Также рассмотрен технико – экономический эффект от замены изоляции и безопасность жизнедеятельности.

Аңдатпа

Бұл дипломдық жобада ескі турбогенератор негізінде ТВ-50-2 жаңартылған, жаңа жоба жасалды. Турбогенератордың есебі жүргізілді. Сумен суы ауамен суытуға ауыстырылды, дәстүрлі турбогенератордың электрлік изоляциясы жаңа полиимды алициклдық изоляциялық құрылымына ауыстырылды. Статордың зубтік аймағы және ротордың ярмасы, керекті өлшемдер мен тұрақты уақыт, статикалық жүктемелік және қысқа тұйықтану тогы, қуаттың жоғалуы, падалы әсер коэффициенттерді есептелді. Электромагниттік, технологиялық, жылулық және механикалық есептеулер жасалды. Сонымен қатар изоляцияны ауыстырудың әсерінің техникалы – экономиялық тиімділігі өміртіршілік қауіпсіздігі есептелді.

Annotation

The thesis project based on the old turbine generator TV-50-2 designed new, improved. The calculation of the turbogenerator is made. Transfer of hydrogen cooling to air, replacement of the traditional electric isolation of the turbogenerator with a new polyimide insulation of the alicyclic structure. The stator, the gear zone and the yoke of the rotor are calculated, the parameters and time constants, static overload and short-circuit currents, power losses and efficiency are derived. Electromagnetic technological, thermal and mechanical calculations are made. Technical and economic effect of insulation replacement and life safety are also considered.

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 9 |
| 1. Описание конструкции турбогенератора | 11 |
| 1.1 Расчет турбогенератора | 13 |
| 1.2 Статор, зубцовая зона и ярмо ротора | 15 |
| 1.3 Электромагнитный расчет ротора | 25 |
| 1.4 Параметры и постоянные времени, статическая перегружаемость и токи короткого замыкания, потери мощности и коэффициент полезного действия | 41 |
| 2 Тепловой расчет | 55 |
| 3 Механический расчет | 64 |
| 3.1 Расчет напряжения в клине | 68 |
| 3.2 Оценка напряжений в бандаже | 69 |
| 3.3 Оценка критических частот | 71 |
| 4 Технология изготовления полиимидной статорной изоляции | 72 |
| 4.1 Полиимидная статорная изоляция | 72 |
| 4.2 Технология изготовления полиимидной статорной изоляции | 73 |
| 4.3 Технология получения полиимидно-фторопластовой пленочной изоляции стержней | 74 |
| 4.4 Цементация стержней при изолировании полиимидно-фторопластовыми пленками | 76 |
| 5 Безопасность жизнедеятельности | 77 |
| 5.1 Расчет шума | 77 |
| 5.2 Разработка мер электрической безопасности | 80 |
| 5.3 Проверочный расчет заземления устройств | 83 |
| 6 Экономическая часть | 86 |
| 6.1 Экономический расчет статора турбогенератора ТВ-50-2 с новой изоляцией | 86 |
| 6.2 Расчет прибыли | 89 |
| 6.3 Срок окупаемости | 90 |
| 6.4 Планово-предупредительный ремонт турбогенератора | 91 |
| Заключение | 93 |
| Приложение А | 94 |
| Список литературы | 95 |

Введение

В ходе развития электромашиностроения был освоен выпуск турбогенераторов нескольких серий. Первая серия Т2 охватывала девять типов генераторов мощностью $0.5 \div 100$ МВт. Затем машины этой серии были сняты с производства и заменены новой серией машин с тем же обозначением охватывающий значительно меньший диапазон мощностей ($2.5 \div 12$ МВт). Турбогенераторы большой мощности выполняют с водородным охлаждением.

В турбогенераторах с воздушным охлаждением потери на трение вращающегося ротора о воздух и вентиляционные потери составляют $25 \div 35\%$ общих потерь. Быстрое увеличение потерь на трение с увеличением размеров бочки ротора (пропорционально диаметру ротора в четвертой степени) является одним из основных факторов, ограничивающих рост единичной мощности турбогенераторов с воздушным охлаждением. Использование в качестве охлаждающей среды водорода позволяет снизить турбогенераторов мощности с воздушным охлаждением. указанные выше потери почти в 10 раз и повысить КПД генератора на 1,2%. Мощность машины при переводе ее с воздушного на водородное охлаждение можно увеличить примерно на 20% при сохранении главных размеров. Водородное целесообразно применять размеров турбогенераторов мощностью 30-100 МВт. Наибольшая реализованная мощность генератора с косвенным водородным охлаждением составляет 150 МВт. Для машин мощностью ниже 30 МВт затраты на специальное оборудование не оправдываются преимуществами водородного охлаждения.

При одном и том же давлении чистый водород имеет в 14,3 раза меньшую плотность, чем воздух. Так как вентиляционные потери и потери на трение изменяются пропорционально плотности газа, то разница плотностей водорода и воздуха объясняет снижение потерь в машине. Водород, находящийся внутри корпуса машины, содержит обычно около 3 % воздуха. Такая смесь имеет плотность порядка одной десятой плотности воздуха, что дает снижение потерь в указанные десять раз. Объемные теплоемкости водорода и воздуха практически одинаковы, поэтому расход водорода на единицу потерь остается таким же, что и при охлаждении воздухом.

Теплопроводность водорода в семь раз превышает теплопроводность воздуха. Благодаря этому практически исчезают температурные перепады в газовых включениях в изоляции и пазах машины, что приводит к повышению теплопроводности пазовой изоляции. Коэффициент теплопередачи от нагретой поверхности к водороду в 13,5 раз выше, чем для воздуха. В результате снижается превышение температуры меди обмоток по отношению к водороду на $5-10$ °С. Это дает возможность увеличить на 15-20 % токовые нагрузки, сохраняя неизменными размеры активных обмотки статора в атмосфере водорода работает более надежно, несмотря на то, что напряженность электрического поля, при которой возникает корона, и диэлектрическая прочность водорода ниже чем у воздуха. Это объясняется

тем, что в атмосфере водорода невозможно образование озона, оказывающего разрушающее действие на изоляцию.

При водородном охлаждении отсутствует загрязнение машины и становится возможным применение роторных обмоток с неизолированными лобовыми частями. В рассмотренных выше турбогенераторах с воздушным охлаждением такая конструкция была неприменима из-за возможного замыкания витков вследствие загрязнения пылью. Водород не поддерживает горения, поэтому опасность пожара при аварии уменьшается настолько, что отпадает необходимость в специальных устройствах для тушения. Практически исчезают вентиляционный шум, так как плотность водорода его невелика. Остаются только шумы магнитного происхождения.

Наряду с перечисленными преимуществами система водородного охлаждения обладает и существенными недостатками, прежде всего из-за взрывоопасной смеси водорода и воздуха. Взрывобезопасность турбогенератора с водородным охлаждением обеспечивается следующими мерами: 1) внутри корпуса поддерживается давление водорода, превышающее атмосферное, что предотвращает попадание воздуха внутрь машины; 2) корпус статора рассчитывают на испытательное давление до 1 МПа, чтобы взрыв при самых неблагоприятных условиях не повредил машины. Это приводит к почти двойному увеличению массы корпуса и наружных щитов турбогенератора с водородным охлаждением по сравнению с турбогенератором, охлаждаемым воздухом. Многолетний опыт показал, что турбогенераторы серий ТВ, ТВ2 и ТВФ дороги в эксплуатации и требуют сложного вспомогательного оборудования. Поэтому настоящее время на новом техническом уровне возобновлено проектирование турбогенераторов с воздушным охлаждением, имеющих значительно более простую конструкцию. Это связано также с тем, что появились новые виды изоляции с улучшенными свойствами. Считается целесообразным изготовление таких генераторов мощностью до 200 МВт. Некоторыми фирмами за рубежом уже изготовлены и эксплуатируются турбогенераторы с воздушным охлаждением мощностью 75 - 95 МВт.

На электрических станциях страны продолжают эксплуатироваться турбогенераторы, выпущенные много лет тому назад, техническое состояние которых вполне удовлетворительное и замена их на новые машины нецелесообразна. С экономической точки зрения более приемлемым является модернизация таких машин. Модернизация позволяет продлить срок службы еще на 10-20 лет. Наиболее существенной модернизации подвергаются турбогенераторы серий ТВ и ТВ2 мощностью до 150 МВт. Использование передовых технических решений с целью модернизации действующих турбогенераторов типа ТВ позволяет обеспечить их перевод на воздушное.

В связи с этим, в предлагаемом дипломном проекте турбогенератор ТВ-50-2 переведен с водородного охлаждения на воздушное, и заменен традиционная терморезистивная изоляция обмотки статора турбогенератор: на новую полиимидную изоляцию алициклического строения.

1 Описание конструкции турбогенератора

В турбогенераторе, как и в любой другой электрической машине, различают активные и конструктивные части. К активным частям, непосредственно участвующим в процессе преобразования механической энергии в электрическую, относятся сердечник статора с трехфазной обмоткой и ротор с обмоткой возбуждения.

Главным фактором, определяющим особенности конструкции турбогенераторов, является высокая частота вращения, вызывающая большие механические напряжения в роторе. Поэтому ротор выполняется цельнокованным из высоколегированной стали, обладающей большой механической прочностью. Из – за отсутствия на роторе явно выраженных полюсов турбогенераторы относят к неявнополюсным машинам. Турбогенераторы представляют собой вытянутую в длину электрическую машину с отношением длины бочки ротора к ее диаметру, составляющим от 2 до 6. Обмотка возбуждения расположена в радиальных пазах ротора. Лобовые части обмотки возбуждения удерживаются от перемещения под действием центробежных сил бандажным кольцом из высокопрочной стали.

Корпус статора с сердечником и обмоткой – наиболее громоздкая часть турбогенератора, масса которой в крупных машинах может превышать 300 тонн. Корпуса машин мощностью более 200 МВт выполняются составными.

В качестве охлаждающих агентов широкое распространение получили воздух, водород, дистиллированная вода и трансформаторное масло. По принципу охлаждения все турбогенераторы делятся на генераторы с косвенным (поверхностным) охлаждением, непосредственным охлаждением проводников обмоток статора и ротора и со смешанным охлаждением.

В турбогенераторах с воздушным охлаждением потери на трение вращающегося ротора о воздух и вентиляционные потери составляют 25—35 % общих потерь. Быстрое увеличение потерь на трение с увеличением размеров бочки ротора (пропорционально диаметру ротора в четвертой степени) является одним из основным факторов, ограничивающих рост единичной мощности турбогенераторов с воздушным охлаждением. Использование в качестве охлаждающей среды водорода позволяет снизить указанные выше потери почти в 10 раз и повысить КПД генератора на 0,6—1,2%. Мощность машины при переводе ее с воздушного на водородное охлаждение можно увеличить примерно на 20 % при сохранении главных размеров. Косвенное водородное охлаждение целесообразно применять для турбогенераторов мощностью 30—100 МВт. Наибольшая реализованная мощность генератора с косвенным водородным охлаждением составляет 150 МВт. Для машин мощностью ниже 30 МВт затраты на специальное оборудование не оправдываются преимуществами водородного охлаждения.

В турбогенераторах с водородным охлаждением стандартом предусматривается обязательное избыточное давление в корпусе не менее

$0,5 \cdot 10^5$ Па. Чистота водорода у турбогенераторов с косвенным охлаждением должна быть не ниже 97%, у турбогенераторов с непосредственным охлаждением – не ниже 98%. Утечка водорода за сутки из корпуса при номинальном давлении в нем должна быть не более 7–12 м³ для турбогенераторов мощностью 30 – 800 МВт и 18 м³ для турбогенераторов мощностью свыше 800 МВт. Так же при водородном охлаждении отсутствуют загрязнения машины, и становится возможным применение роторных обмоток с неизолированными лобовыми частями, что недопустимо для турбогенераторов с воздушным охлаждением. Наряду с перечисленными преимуществами система водородного охлаждения обладает и существенными недостатками, прежде всего из-за взрывоопасной смеси водорода и воздуха. Наибольшего значения (около 0,6 МПа) давление внутри корпуса генератора достигает при взрыве гремучей смеси, состоящей из 28 % водорода и 72 % воздуха. Взрывобезопасность турбогенератора с водородным охлаждением обеспечивается следующими мерами:

- внутри корпуса поддерживается давление водорода, превышающее атмосферное, что предотвращает попадание воздуха внутрь машины;

- корпус статора рассчитывают на испытательное давление до 1 МПа, чтобы взрыв при самых неблагоприятных условиях не повредил машины.

Это приводит к почти двойному увеличению массы корпуса и наружных щитов турбогенератора с водородным охлаждением по сравнению с турбогенератором, охлаждаемым воздухом. Образование гремучей смеси в генераторе может быть лишь в процессе заполнения его водородом. Чтобы это предотвратить, применяют промежуточное заполнение машины углекислым газом. Так как статор выполняют взрывостойким и газоплотным, то практически без конструктивных изменений можно применять водород с повышенным давлением. При этом его плотность увеличивается и, следовательно, возрастает объемная теплоемкость. Коэффициент теплоотдачи с поверхности также возрастает, но несколько слабее, чем по линейной зависимости. Избыточное давление водорода в турбогенераторах различных типов составляет 0,05—0,5 МПа. При больших давлениях потери от трения вращающегося ротора о газ возрастают быстрее, чем убывают потери на подачу водорода. В генераторах серий ТВ и ТВ2 избыточное давление составляет 0,005—0,1 МПа. Первая серия турбогенераторов с водородным охлаждением (ТВ) была спроектирована на базе машин серии Т2 и включала в себя генераторы мощностью 25, 30, 50, 60 и 100 МВт. Затем был осуществлен выпуск турбогенераторов серии ТВ2 мощностью 30, 60, 100 и 150 МВт. Давление водорода в генераторах этой серии было повышено в дальнейшем до 0,1 МПа.

Все генераторы с водородным охлаждением имеют газоохладители, встроенные в корпус машины. Установка газоохладителей вне машины неприемлема с конструктивной точки зрения, так как в этом случае пришлось бы выполнять взрывобезопасными и стенки всех газоподводящих каналов.

1.1 Расчет турбогенератора

Исходные данные

| | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Номинальная мощность | $P_H := 50 \cdot 10^6 \text{ Вт}$ |
| Номинальное линейное напряжение | $U_{1H} := 10.5 \cdot 10^3 \text{ В}$ |
| Номинальный коэффициент мощности | $\cos\phi_H := 0.8$ |
| Отношение короткого замыкания | $\text{ОКЗ} := 0.549$ |
| Частота вращения | $n := 3000 \text{ об/мин}$ |
| Номинальная частота тока | $f_1 := 50 \text{ Гц}$ |
| Серия турбогенератора | ТВ-50-2 |

1. Полная номинальная мощность

$$S_H := \frac{P_H}{\cos\phi_H};$$

$$S_H := 6.25 \times 10^7 \text{ ВА}.$$

2. Предварительно определяем внутренний диаметр статора [1]:

$$D_{1H} := 1.075.$$

3. Для заданного типа охлаждения и номинальной полной мощности выбираем линейную нагрузку A и магнитную индукцию при холостом ходе B_δ (ориентировочные значения) [1];

$$A := 8 \cdot \frac{10^4 \text{ А}}{\text{м}};$$

$$B_\delta := 0.8 \text{ Тл}.$$

4. Отношение короткого замыкания:

$$\text{ОКЗ} = 0.549.$$

5. Немагнитный зазор (предварительно):

$$\delta := 6.95 \cdot \text{ОКЗ} \cdot \frac{A \cdot D_{1H}^{1.5}}{B_\delta} \cdot 10^{-7}.$$

Округляем δ с точностью до 0.005 м, получим $\delta := 0.04 \text{ м}$

6. Диаметр бочки ротора (предварительно):

$$D_{2H} := D_{1H} - 2\delta;$$

$$D_{2H} := 0.995 \text{ м.}$$

7. Выбираем диаметр бочки ротора из нормализованного ряда роторов:

$$D_2 := 1.00 \text{ м.}$$

8. Уточняем внутренний диаметр статора:

$$D_1 := D_2 + 2 \cdot \delta;$$

$$D_1 = 1.08 \text{ м.}$$

9. Определяем предварительно длину магнитопровода (сердечника) статора где $K_{01} := 0.92$ обмоточный коэффициент, угловая скорость:

$$\Omega := \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60};$$

$$\Omega = 314.159 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$L_{1H} := \frac{0.9 \cdot S_H}{k_{01} \cdot \Omega \cdot D_1^2 \cdot A \cdot B_\delta};$$

$$L_{1H} = 2.607 \text{ м.}$$

Округляем $L_{1H} := 3.1 \text{ м.}$

10. Определяем длину бочки ротора (предварительно):

$$L_{2H} := L_{1H} + 0.15;$$

$$L_{2H} = 3.25 \text{ м.}$$

11. Проверяем отношения:

$$\lambda_1 := \frac{L_{1H}}{D_1};$$

$$\lambda_1 = 2.87.$$

$$\lambda_2 := \frac{L_{2H}}{D_2};$$

$$\lambda_2 = 3.25.$$

Отношение λ_1 , согласно [1], находится в допустимых пределах.

1.2 Статор, зубцовая зона и ярмо ротора

12. Номинальное фазное напряжение при соединении обмотки в звезду:

$$U_{1H\phi} := \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}},$$

$$U_{1H\phi} = 6.062 \times 10^3 \text{ В.}$$

13. Номинальный ток фазы статора:

$$I_{1H\phi} := \frac{S_H}{3 \cdot U_{1H\phi}};$$

$$I_{1H\phi} = 3.437 \times 10^3 \text{ А.}$$

14. Принимаем число параллельных ветвей обмотки статора, [1]:

$$a = 2.$$

15. Число эффективных проводом (стержней) в пазу (по высоте):

$$u_{\Pi 1} := 2.$$

16. Объём тока в пазу статора: предварительно:

$$I_{\Pi} := I_{1H\phi} \cdot \frac{u_{\Pi 1}}{a};$$

$$I_{\Pi} = 3.437 \times 10^3 \text{ А.}$$

17. Пазовое зубцовое деление статора предварительно:

$$t_1 := 0.0471 \text{ м.}$$

18. Число пазов (зубцов) статора предварительно:

$$Z_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{t_1};$$

$$Z_1 = 72.037.$$

$$p := 1 ; m := 3.$$

Принимаем по [1] $Z_1 := 72$, тогда: $q := \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m}$ $q = 12$.

19. Уточняем пазовое деление статора:

$$t_1 := \pi \cdot \frac{D_1}{Z_1} ; \quad t_1 = 0.047.$$

20. Проверяем отношение:

$$\frac{\delta}{t_1} = 0.849; \quad 0.849 > 0.5.$$

21. Число последовательно соединенных витков фазы статора:

$$\omega_1 := \frac{p \cdot q \cdot u_{\text{П1}}}{a}; \quad \omega_1 = 12.$$

22. Полусное деление, выраженное числом пазовых делений:

$$\tau := \frac{Z_1}{(2 \cdot p)}; \quad \tau = 36.$$

23. Принимаем ускорение шага $\beta = 0.83$. Шаг обмотки по пазам $y := \beta \cdot \tau$ пазовых делений $y = 29.88$

Принимаем

действительное значение: $\beta := \frac{y}{\tau}$.

24. Коэффициент укорочение обмотки:

$$k_{y1} := \sin\left(\frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right); \quad k_{y1} = 0.966.$$

25. Коэффициент распределения обмотки:

$$k_{p1} := \frac{0.5}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}; \quad k_{p1} = 0.955.$$

26. Обмоточный коэффициент статора:

$$k_{01} := k_{y1} \cdot k_{p1}; \quad k_{01} = 0.923.$$

27. Уточняем линейную нагрузку:

$$A := \frac{6 \cdot \omega_1 \cdot I_{1H\phi}}{\pi \cdot D_1}; \quad A = 7.923 \times 10^4 \frac{A}{m}$$

Полученное значение А близко к выбранному в п.3.

28. Магнитный поток основной гармонической при холостом ходе:

$$\Phi := \frac{U_{1H\phi}}{4.44 \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{01}}; \quad (1.8)$$

$$\Phi = 2.466 \text{ Вб.}$$

29. Уточняем предварительную длину сердечника статора:

$$L_{1H} := \frac{\Phi}{(D_1 \cdot B_\delta)};$$

$$L_{1H} = 2.854.$$

Принимаем $L_{1H} := 3.1$, что близко к полученному в п.9.

30. Принимаем длину одного пакета стали статора $L_{\text{пак}} := 0.0385$ м, длину вентиляционного канала между пакетами $b_k := 0.01$ м.

Число пакетов в сердечнике статора:

$$n_{\text{п}} := \frac{L_{1H}}{(L_{\text{пак}} + b_k)}; \quad n_{\text{п}} = 63.918.$$

Число $n_{\text{п}}$ округляем до ближайшего целого и принимаем: $n_{\text{п}} := 64$.

31. Длина стали сердечника статора (без каналов):

где $L_{\text{пак.кр}} := 0.275$ м – длина крайнего пакета,

$$L_c := (n_{\text{п}} - 2) \cdot L_{\text{пак}} + 2 \cdot L_{\text{пак.кр}}; \quad L_c = 2.442 \text{ м.}$$

32. Полная длина сердечника статора:

$$L_1 := L_c + b_k \cdot (n_{\text{п}} - 1); \quad L_1 = 3.072 \text{ м.}$$

33. Сердечник статора выполняем из холоднокатаной стали. Ориентируем направление прокатки поперек зубца (вдоль спинки). Принимаем по [1] магнитную индукцию в коронке зубца при холостом ходе $B_{z1} := 1.885$ Тл.

Определяем предварительно ширинку коронки зубца:

$$b'_{z1} := \frac{\Phi}{\left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot 3 \cdot q \cdot B_{z1} \cdot L_c \cdot K_c}; \quad b'_{z1} = 0.025 \text{ м.}$$

где $k_c \equiv 0.93$ – коэффициент заполнения сердечника сталью при толщине листа 0.5 мм.

34. Ширина паза статора (предварительно):

$$b'_{п1} := t_1 - b'_{z1}; \quad b'_{п1} = 0.022 \text{ м.}$$

35. Общий размер двусторонней толщины изоляции, прокладок и зазора на укладку по ширине паза без учета изоляции элементарного проводника для напряжения 10.5 кВ:

$$\delta_{ш} := 0.0043 \text{ м.}$$

36. Ширина изолированного элементарного проводника (предварительно), при двух столбцах элементарных проводников в пазу:

$$b'_{и} := \frac{(b'_{п1} - b_{ш})}{2}; \quad b'_{и} = 8.843 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

37. Ширина голого элементарного проводника, где $\delta_э$ – двухсторонняя толщина изоляции элементарного проводника по меньшей стороне $a_э$, [1]:

$$b'_{э} := b'_{и} - b_э; \quad b'_{э} = 8.703 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

$$b_э \equiv 0.00014 \text{ м.}$$

38. Стержень обмотки статора при косвенном воздушном охлаждении из отдельных элементарных проводников, образующих по условию транспозиции два одинаковых вертикальных столбца. Поэтому число элементарных проводников в стержне всегда должно быть четным. Выбираем размеры голого элементарного сплошного проводника $b_э$, [1]:

$$b_э := 0.0087 \text{ м.}$$

39. Уточняем ширину паза статора:

$$b_{п1} := 2 \cdot (b_э + \delta_э) + \delta_{ш}; \quad b_{п1} = 0.022 \text{ м.}$$

40. Уточняем ширину коронки зубца и магнитную индукцию в коронах зубцов статора:

$$b_{z1} := t_1 - b_{п1} ;$$

$$b_{z1} = 0.025 \text{ м.}$$

$$B_{z1} := \frac{\Phi}{\left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot 3 \cdot q \cdot b_{z1} \cdot L_c \cdot k_c} ;$$

$$B_{z1} = 1.885 \text{ Тл.}$$

Магнитная индукция находится в пределах значений, рекомендуемых в [1].

41. Плотность тока в стержне обмотки статора при косвенном воздушном охлаждении (предварительно):

$\theta_{и} := 45^\circ\text{C}$ - допустимый перепад температур в пазовой изоляции;

$\gamma_{\theta} := 4.6 \cdot 10^7 \text{ 1/Омм}$ – удельная электропроводность меди при расчетной температуре 75°C ,

$\lambda_{и} := 0.1 \text{ Вт/м град}$ – удельная теплопроводность терморезистивной изоляции при воздушном охлаждении,

$k_{\phi} := 1.33$ – коэффициент вытеснения тока (коэффициент Филльда),

$$b_{м1} := 2 \cdot b_{\text{э}} ;$$

$$b_{м1} = 0.017.$$

где $b_{м1}$ – суммарный размер элементарных проводников без изоляции по ширине паза для стержня из двух стобцов,

$$\Delta_1 := 1.6 \times 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Плотность тока находится в пределах значений, рекомендуемых в [1].

42. Площадь сечения меди эффективного проводника (стержня) (предварительно):

$$s'_{r1} := \frac{I_{1H\phi}}{a \cdot \Delta_1} ;$$

$$s'_{r1} = 1.074 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

43. Число элементарных проводников в стержне. Выбираем размеры сплошного проводника,[1]:

$$a_{\text{э}} := 0.0014 \text{ м;}$$

$$b_{\text{э}} := 0.008 \text{ м.}$$

$$s_{\text{э}} := 10.99 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

$$m_{\text{э}} := \frac{s'_{r1}}{s_{\text{э}}} ;$$

$$m_{\text{э}} := 97.72.$$

Полученное значение округляем до ближайшего четного числа и принимаем $m_3 := 98$.

44. Уточняем сечение стержня, плотность тока и коэффициент k_ϕ :

$$s_1 := s_3 \cdot m_3; \quad s_1 := 1.077 \times 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$\Delta_1 := \frac{I_{1нф}}{(a \cdot s_1)}; \quad \Delta_1 := 1.595 \times 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

Полученное значение Δ_1 близко к определенному предварительно в п. 41 и не выходит за рекомендуемые пределы,

$$k_{\phi 1} := 1 + \left[10.7 \cdot \left(\frac{b_{m1} \cdot m_3}{b_{п1}} \right)^2 \cdot a_3^4 \cdot 10^6 \right]; \quad k_{\phi 1} = 1.247.$$

45. Высоту клина $h_{кл1}$ выбираем в зависимости от ширины и глубины паза в пределах:

$$h_{кл} = (0.6 - 1.1)b_{п1};$$

$$h_{кл} := 0.6 \cdot b_{п1}; \quad h_{кл} = 0.013 \text{ м}.$$

46. Высота всех изолированных элементарных проводников одного стержня:

$$a_{и} := a_3 + b_3; \quad a_{и} = 1.54 \times 10^{-3}.$$

$$m_{эв} := \frac{m_3}{2}; \quad m_{эв} = 49.$$

где $m_{эв}$ – число элементарных проводников по высоте одностержня,

$$h_{и} := a_{и} \cdot (m_{эв} + 1); \quad h_{и} = 0.077 \text{ м}.$$

47. Высота паза или зубца статора при двух одинаковых стержнях, размещенных в пазу:

δ_h - общий размер толщины изоляции в пазу, прокладок и зазора на укладку для напряжения 10.5 кВ, по высоте,

$$\delta_h := 20 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$h_{п1} := (2 \cdot h_{и}) + \delta_h + (2 \cdot 0.02 \cdot m_{эв} \cdot 10^{-3}) + h_{кл1}.$$

$$h_{п1} = 0.189 \text{ м.}$$

48. Проверяем соотношения:

$$\frac{h_{п1}}{b_{п1}} = 8.605.$$

$$\frac{h_{п1}}{D_1} = 0.175;$$

В соответствие с [1] и проведенными расчетами делаем в масштабе чертеж заполненного паза статора (рис 1.1)

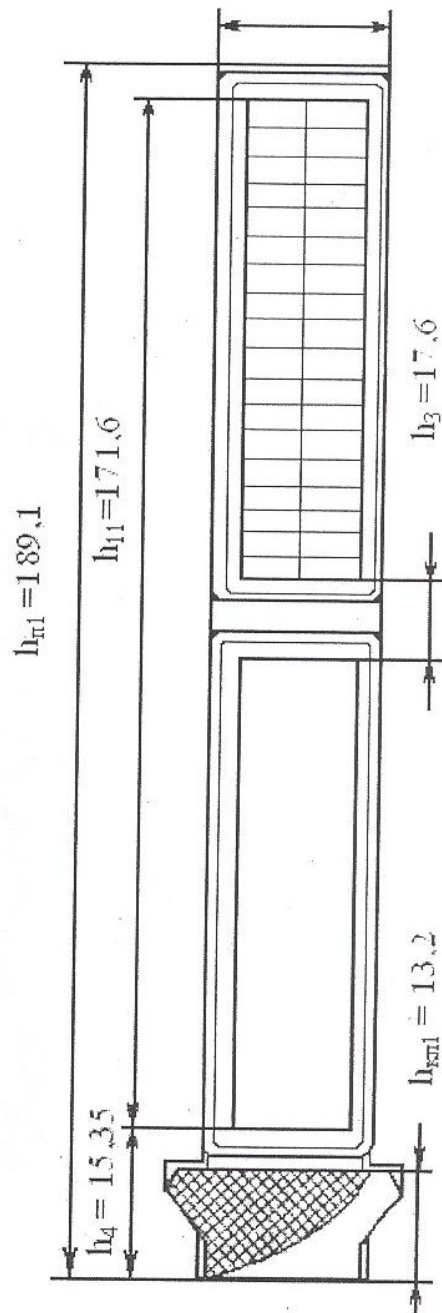


Рисунок 1.1 – Паз статора турбогенератора 50 МВт с воздушным охлаждением

49. Магнитопровод (сердечник) статора выполнен из холоднокатаной листовой электротехнической стали марки 3413 толщиной 0.5 мм. Направление прокатки совпадает с направлением магнитного потока в ярме (спинке) сегментов сердечника статора (поперек зубцов).

50. Высота ярма ротора:

где $B_{a1} := 1.5$ Тл – значение индукции в ярме статора при холостом ходе [1],

$$h_{a1} := \frac{\Phi}{2 \cdot L_c \cdot k_c \cdot B_{a1}}; \quad h_{a1} = 0.362 \text{ м.}$$

51. Внешний диаметр сердечника статора:

$$D_a := D_1 + 2 \cdot (h_{a1} + h_{п1}); \quad D_a = 2.182 \text{ м.}$$

Округляем внешний диаметр до $D_a := 2.2$ м и уточняем высоту ярма статора:

$$h_{a1} := \frac{D_a - D_1 - 2 \cdot h_{п1}}{2};$$

$$h_{a1} = 0.371 \text{ м.}$$

$$\frac{D_a}{D_1} = 2.037.$$

Соотношение D_a/D_1 находится в пределах значений указанных в [1].

52. Длина витка обмотки статора:

$$L_{л1} := 2.5 \cdot D_1; \quad L_{л1} = 2.7 \text{ м.}$$

где $L_{л1}$ – длина лобовой части полувитка,

$$L_{в1} := 2 \cdot (L_1 + L_{л1}); \quad L_{в1} = 11.544 \text{ м.}$$

53. Активное сопротивление фазы обмотки статора постоянному току при температуре 75°C :

$$r_{175} := \frac{\omega_1 \cdot L_{в1} \cdot 10^{-6}}{46 \cdot a \cdot s_1}; \quad r_{175} = 1.398 \times 10^{-3} \text{ Ом.}$$

В относительных единицах:

$$r_{175x} := r_{175} \cdot \frac{I_{1\text{н}\phi}}{U_{1\text{н}\phi}}; \quad r_{175x} = 7.926 \times 10^{-4} \text{ о. е.}$$

где r_{175} – входит в интервал (0,003. . .0,001).

54. Индуктивное сопротивление пазового рассеяние с учетом рассеяния по коронкам зубца (о.е):

$$n_k := n_{\Pi} - 1; \quad n_k = 63.$$

где n_k – число вентиляционных каналов сердечника статора,

$$L_{\sigma 1} := L_1 - 0.2 \cdot b_k \cdot n_k; \quad L_{\sigma 1} = 2.946 \text{ м.}$$

где $L_{\sigma 1}$ – расчетная длина поля пазового рассеяния с учетом вентиляционных каналов,

$$h_4 := 0.01535 \text{ м}; \quad h_{11} := 0.1716 \text{ м.}$$

Размеры взяты по рис 1.1

$$x_{1\text{пх}} := 0.47 \cdot \left(\frac{\omega_1}{10}\right)^2 \cdot \frac{L_{\sigma 1} \cdot I_{1\text{н}\phi}}{Z_1 \cdot U_{1\text{н}\phi}} \cdot \frac{3 \cdot \beta + 1}{4} \cdot \left(\frac{h_{11} + 3 \cdot h_4}{3 \cdot b_{\text{п1}}} + \frac{\delta}{2 \cdot t_1 + \frac{\delta}{2}} + 0.2\right). \quad (1.15)$$

$$x_{1\text{пх}} = 0.053.$$

55. Индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей обмотки (о.е.) при немагнитных бандажах ротора:

$$x_{л1x} := 3.23 \cdot \left(\frac{\omega_1 \cdot k_{01}}{10}\right)^2 \cdot \frac{I_{1\text{н}\phi}}{U_{1\text{н}\phi}} \cdot L_{л1} \cdot 10^{-2}; \quad x_{л1x} = 0.061.$$

56. Индуктивное сопротивления взаимной индукции (о.е.):

где $k'_{\delta} := 1.1$ – предварительное значения коэффициента воздушного зазора, полюсного деления:

$$\tau_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{2}; \quad \tau_1 = 1.696 \text{ м.}$$

$$x_{\text{адх}} := \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \frac{k_{01}}{k'_{\delta}} \cdot \frac{\tau_1}{\delta} \cdot \frac{A}{B_{\delta}}; \quad x_{\text{адх}} = 1.835.$$

57. Индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния обмотки статора (о.е.):

$$X_{\text{диф1x}} := 0.375 \cdot \frac{\delta \cdot t_1}{q \cdot b_{\text{м1}} \cdot \tau_1} \cdot x_{\text{адx}}; \quad X_{\text{диф1x}} = 3.661 \times 10^{-3}.$$

58. Индуктивное сопротивления рассеяния (о.е.):

$$X_{\sigma 1x} := X_{1\text{пх}} + X_{\text{л1x}} + X_{\text{диф1x}}; \quad X_{\sigma 1x} = 0.117.$$

59. Длина бочки ротора:

$$L_2 := L_1 + 0.15; \quad L_2 = 3.222 \text{ м.}$$

60. Возможное число пазовых давлений:

$$Z'_2 := 48 \cdot D_2; \quad Z'_2 = 48.$$

61. Число реальных (обмотанных) пазов и отношение γ :

$$Z_2 := \gamma \cdot Z'_2 = (0.667 - 0.75) \cdot 48 = 32.016 - 36.$$

По [1] для $Z'_2 = 48$ принимаем:

$$Z_2 := 36; \quad \gamma := 0.75.$$

62. Принимаем (предварительно), [1]:

$$\frac{h_{\text{п2}}}{D_2} = 0.17; \quad \frac{b_{\text{п2}}}{b'_{z2}} = 2.16.$$

63. Определяем глубину паза ротора (предварительно):

$$h_{\text{п2}} := 0.17 \cdot D_2; \quad h_{\text{п2}} = 0.17.$$

64. Пазовое деление в основании зубцов ротора:

$$t'_2 := \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{\text{п2}})}{Z'_2}; \quad t'_2 = 0.043 \text{ м.}$$

65. Выбираем паз ротора с параллельными стенками. Предварительную ширину паза определяем из следующих соотношений:

$$b'_{z2} = b_{\text{п2}}/2.6.$$

$$t'_2 = b_{п2} + b'_{z2} = b_{п2} + \frac{b_{п2}}{2.6} = 0.0432.$$

отсюда ширина паза ротора:

$$b_{п2} := 0.0432 \cdot \frac{2.6}{3.6}; \quad b_{п2} = 0.031 \text{ м.}$$

66. Ширина зубца в наиболее узком месте (в основании):

$$b'_{z2} := t'_2 - b_{п2}; \quad b'_{z2} = 0.012 \text{ м.}$$

что допустимо по условию [1].

67. Ориентируем ширина проводника обмотки возбуждения:

$$\delta_{ш2} := 0.032 \text{ м.}$$

где $\delta_{ш2}$ – двусторонняя толщина изоляции по ширине паза,

$$b'_2 := b_{п2} - \delta_{ш2}; \quad b'_2 = 0.028 \text{ м.}$$

68. Выбираем провод прямоугольного сечения [1]:

$$b_2 := 0.028 \text{ м.}$$

69. Уточняем ширину паза ротора:

$$b_{п2} := b_2 + b_{ш2}; \quad b_{п2} = 0.031 \text{ м.}$$

70. Проверяем ширину зубца в наиболее узком месте:

$$b'_{z2} := t'_2 - b_{п2}; \quad b'_{z2} = 0.012 \text{ м.}$$

удовлетворяет условию, [1].

1.3 Электромагнитный расчет ротора

71. Расчетные площади сечений зубцов ротора на высоте $0,2h_{п2}$ и $0,7h_{п2}$ от их основания:

$$D_{z0.2} := D_2 - 1.6 \cdot h_{п2}; \quad D_{z0.2} = 0.728 \text{ м.}$$

$$D_{z0.7} := D_2 - 0.6 \cdot h_{п2}; \quad D_{z0.7} = 0.898 \text{ м.}$$

$$k_{\text{шп}} := \frac{1 - \cos\left(\gamma \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{Z_1'}\right)}; \quad k_{\text{шп}} = 9.439.$$

Паз имеет параллельные стенки, поэтому :

$$b_{\text{п}0.2} := 0.0312 \text{ м}; \quad b_{\text{п}0.7} := 0.0312 \text{ м}.$$

$$S_{z0.2} := (D_{z0.2} - b_{\text{п}0.2} \cdot k_{\text{шп}}) \cdot L_2; \quad S_{z0.2} = 1.397 \text{ м}^2.$$

$$S_{z0.7} := (D_{z0.7} - b_{\text{п}0.7} \cdot k_{\text{шп}}) \cdot L_2; \quad S_{z0.7} = 1.945 \text{ м}^2.$$

72. Ширина зубца статора в расчетном сечении:

$$D_{z13} := D_1 + \left(\frac{2}{3}\right) \cdot h_{\text{п}1}; \quad D_{z13} = 1.206 \text{ м},$$

где D_{z13} – диаметр расчетного сечения,

$$b_{z13} := \frac{\pi \cdot D_{z13}}{Z_1} - b_{\text{п}1}; \quad b_{z13} = 0.031 \text{ м}.$$

73. Расчетная площадь сечения стали зубцов статора на полюсном делении t_9 эквивалентной явнополюсной машины:

$$S_{z13} := \frac{Z_1}{\pi} \cdot b_{z13} \cdot L_c \cdot k_c; \quad S_{z13} = 1.595 \text{ м}^2.$$

74. Расчетная площадь сечения немагнитного зазора на полюсном делении t_9 эквивалентной явнополюсной машины:

$$k_\gamma := (1 - 0.5 \cdot \gamma) \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right); \quad k_\gamma = 0.982.$$

где k_γ – поправочный коэффициент, учитывающий при расчете магнитной индукции, что в реальной машине форма магнитного поля близка к равнобокой трапеции,

$$S_\delta := (D_2 + \delta) \cdot (L_1 + 2 \cdot \delta) \cdot k_\gamma; \quad S_\delta = 3.218 \text{ м}^2.$$

75. Площадь сечения стали ярмо статора:

$$S_{a1} := L_c \cdot h_{a1} \cdot k_c; \quad S_{a1} = 0.842 \text{ м}^2.$$

76. Площадь сечения ярмо ротора:

$$D_0 := 0.12 \cdot D_2 ; \quad D_0 = 0.12 \text{ м}^2.$$

где D_0 – диаметр центрального отверстия в бочке ротора,

$$S_{a2} := \frac{D_2 - 2 \cdot h_{п2} - D_0}{2} \cdot L_2 ; \quad S_{a2} = 0.87 \text{ м}^2.$$

После определения площадей сечений пяти участков магнитной цепи находим магнитные индукции, напряженности магнитного поля и магнитные напряжения участков при холостом ходе и номинальном напряжении:

$$E_{10} := U_{1нф} \text{ или } E_{10x} := \frac{E_{10}}{U_{1нф}} ; \quad E_{10x} = 1.$$

77. Магнитный поток в немагнитном зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении:

$$C_1 := \frac{1}{4.44 \cdot f_1 \cdot \omega \cdot k_{01}} ; \quad C_1 = 4.068 \times 10^{-4}.$$

$$\Phi_1 := C_1 \cdot E_{10} ; \quad \Phi_1 = 2.466 \text{ Вб}.$$

78. Магнитная индукция в немагнитном зазоре:

$$B_\delta := \frac{\Phi_1}{S_\delta} ; \quad B_\delta = 0.766 \text{ Тл}; \quad S_\delta = 3.218.$$

79. Магнитная индукция в расчетном сечении зубцов статора:

$$B_{z13} := \frac{\Phi_1}{S_{z13}} ; \quad B_{z13} := 1.546 \text{ Тл}; \quad S_{z13} = 1.595.$$

80. Расчетное значение магнитной индукции в ярме статора:

$$C_3 := \frac{18 - 10 \cdot \gamma}{18 - 9 \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{2 \cdot S_{a1}} ; \quad C_3 = 0.554.$$

$$B'_{a1} := C_3 \cdot \Phi_1 ; \quad B'_{a1} = 1.367 \text{ Тл}.$$

81. Напряженность магнитного поля в зубцах статора при $B_{z13} < 1.8$ Тл для холоднокатановой стали с направлением потока поперек проката находим по [1]. При $B_{z13} < 1.8$ Тл определяем коэффициент, учитывающий ответвление потока в паз:

$$H_{z13} := 5400 \frac{\text{А}}{\text{м}};$$

$$k_{п13} := \frac{(b_{п1} + b_{z13}) \cdot L_1}{b_{z13} \cdot L_c \cdot k_c} - 1; \quad k_{п13} = 1.323.$$

82. Напряженность магнитного поля в ярме статора с направлением потока вдоль проката, [1]:

$$H'_{a1} := 305 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

83. Магнитное напряжение немагнитного зазора:
где коэффициент, учитывающий зубчатость статора:

$$k_{\delta z1} := 1 + \frac{b_{п1}^2}{t_1 \cdot (5 \cdot \delta + b_{п1}) - b_{п1}^2}; \quad k_{\delta z1} = 1.048 \text{ м.}$$

Коэффициент, учитывающий зубчатость бочки ротора:

$$t_2 := \pi \cdot \frac{D_2}{Z'_2}; \quad t_2 = 0.065 \text{ м.}$$

$$k_{\delta z2} := 1 + \frac{b_{п2}^2}{t_2 \cdot (5 \cdot \delta + b_{п2}) - b_{п2}^2} \cdot \frac{\gamma}{2}; \quad k_{\delta z2} = 1.026.$$

Коэффициент, учитывающий радиальные вентиляционные каналы сердечника статора:

$$k_{\delta B} := 1 + \frac{b_k^2}{(L_{пак} + b_k) \cdot (5 \cdot \delta + b_k) - b_k^2}; \quad k_{\delta B} = 1.01.$$

Коэффициент, учитывающий рифление поверхности ротора:

Принимаем шаг рифления $t_p := 0.028$ м.

Ширина канавки рифления $b_p := 0.5 \cdot t_p$; $b_p = 0.014$ м.

$$k_{\delta p} := 1 + \frac{b_p^2}{t_p \cdot (5 \cdot \delta + b_p) - b_p^2} ; \quad k_{\delta p} = 1.034.$$

Коэффициент, учитывающий ступенчатость крайних пакетов сердечник статора:

$$k_{\delta CT} := 1 + \frac{7 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\delta \cdot (L_1 + L_2)}} ; \quad k_{\delta CT} = 1.014.$$

Коэффициент, учитывающий срезы зубцов ротора перед отверстиями в клиньях пазов для забора и выпуска газа:

$$k_{\delta cp} := 1 + 0.25 \cdot \frac{\gamma}{\delta} \cdot 10^{-3} ; \quad k_{\delta cp} = 1.005.$$

Результирующий коэффициент немагнитного зазора:

$$k_{\delta} := 1 + (k_{\delta z1} - 1) + (k_{\delta z2} - 1) + (k_{\delta B} - 1) + (k_{\delta p} - 1) + (k_{\delta CT} - 1);$$

$$k_{\delta} = 1.132.$$

Магнитное напряжение немагнитного зазора:

$$C_2 := \frac{\delta \cdot k_{\delta}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} ; \quad C_2 = 3.603 \times 10^4.$$

$$F_{\delta} := C_2 \cdot B_{\delta} ; \quad F_{\delta} = 2.761 \times 10^4.$$

84. Магнитное напряжение зубцов статора:

$$h_{\pi 1} = 0.189 ;$$

$$F_{z1} := h_{\pi 1} \cdot H_{z13} ;$$

$$F_{z1} = 1.021 \times 10^3;$$

85. Магнитное напряжение ярмо статора:

$$L_{a1} := \gamma \cdot \frac{\pi \cdot (D_a - h_{a1})}{4 \cdot p} ; \quad L_{a1} = 1.077 \text{ м.}$$

где L_{a1} – расчетная средняя длина индукционных магнитных линий ярма статора,

$$F_{a1} := L_{a1} \cdot H'_{a1}; \quad F_{a1} = 328.624 \text{ А.}$$

86. Магнитное напряжение немагнитного зазора, зубцов и ярма статора:

$$F_{\delta ZC} := F_{\delta} + F_{z1} + F_{a1}; \quad F_{\delta ZC} = 2.896 \times 10^4 \text{ А.}$$

87. Коэффициент магнитной проводимости для потока пазового рассеяния ротора при прямоугольном пазе, $h_{кл2} = b_{п2} = 0.0312$, высоту подклиновой прокладки принимаем:

$$h_{кл2} := b_{п2}; \quad h_{кл2} = 0.031 \text{ м.}$$

$h_{и1} := 0.008$ м – подклиновая прокладка из стеклотекстолита
 $\Sigma\delta_{п} := 0.002$ м – общая толщина гильзы и прокладок на дне паза.

$$h_{22} := h_{кл2} + h_{и1}; \quad h_{22} = 0.039 \text{ м;}$$

$$h_{21} := h_{п2} - h_{22} - \Sigma\delta_{п}; \quad h_{21} = 0.129 \text{ м;}$$

$$\lambda_{п2} := \frac{h_{21}}{2 \cdot b_{п2}} + \frac{h_{22}}{b_{п2}}; \quad \lambda_{п2} = 3.321 \text{ м.}$$

88. Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяние по коронкам зубцов ротора:

$$\lambda_{к2} := \frac{\delta}{(2 \cdot t_2)} + 0.2; \quad \lambda_{к2} = 0.506.$$

89. Магнитный поток пазового рассеяния и по коронкам зубцов ротора:

$$C_4 := \frac{L_2}{Z_2} \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{к2}) \cdot 10^{-5}; \quad C_4 = 3.424 \times 10^{-6};$$

$$\Phi_{\sigma ПК2} := C_4 \cdot F_{\delta ZC}; \quad \Phi_{\sigma ПК2} = 0.099 \text{ Вб.}$$

90. Поток лобового рассеяния пренебрегаем, так как бандажные кольца будут выполнены из немагнитной стали. Полный магнитный поток рассеяния ротора:

$$\Phi_{\sigma Л2} := 0;$$

$$\Phi_{\sigma 2} := \Phi_{\sigma \text{ПК}2} + \Phi_{\sigma \text{Л}2};$$

$$\Phi_{\sigma 2} = 0.099 \text{ Вб.}$$

91. Полный магнитный поток в роторе при холостом ходе:

$$\Phi_2 := \Phi_1 + \Phi_{\sigma 2}; \quad \Phi_2 = 2.565 \text{ Вб.}$$

92. Магнитные индукции в расчетных сечениях зубцов ротора:

$$B_{z0.2} := \frac{\Phi_2}{S_{z0.2}}; \quad B_{z0.2} = 1.837 \text{ Тл}; \quad S_{z0.2} = 1.397.$$

$$B_{z0.7} := \frac{\Phi_2}{S_{z0.7}}; \quad B_{z0.7} = 1.319 \text{ Тл}; \quad S_{z0.7} = 1.945.$$

Магнитная индукция $B_{z0.2}$ в зубах ротора в расчетном сечении на расстоянии $0.2h_{\text{п}2}$ от их основания не превосходит значений, рекомендуемых в [1].

93. Магнитная индукция в ярме ротора:

$$B_{a2} := \frac{\Phi_2}{2 \cdot S_{a2}}; \quad B_{a2} = 1.474 \text{ Тл}; \quad S_{a2} = 0.87.$$

94. Напряженности магнитных полей для значений магнитных индукций в роторе, определяют по кривой намагничивания роторных поковок турбогенераторов с $D2 > 0.814$ м, приведенной в [1]:

$$H_{a2} := 3000 \text{ А/м.}$$

Для магнитных индукций в зубах ротора, превышающих 1.8 Тл, следует учесть ответвление потока в паз с помощью коэффициентов:

$$b_{z0.2} := \frac{\pi \cdot D_{z0.2}}{Z'_2} - b_{\text{п}0.2}; \quad b_{z0.2} = 0.016 \text{ м};$$

$$b_{z0.7} := \frac{\pi \cdot D_{z0.7}}{Z'_2} - b_{\text{п}0.7}; \quad b_{z0.7} = 0.028 \text{ м};$$

$$k_{\text{п}0.2} = 1.897; \quad k_{\text{п}0.7} := \frac{b_{\text{п}0.7}}{b_{z0.7}}; \quad k_{\text{п}0.7} = 1.132$$

Напряженность магнитного поля в зубцах ротора при $B_z > 1.8$ Тл, определяем по [1] с учетом рассчитанных коэффициентов $k_{п0.2}$, $k_{п0.7}$.

95. Магнитные напряжения зубцов ротора:

$$H_{z0.2} := 15700 \text{ А/м};$$

$$H_{z0.7} := 1849 \text{ А/м};$$

$$F_{z2} := h_{п2} \cdot \frac{H_{z0.2} + H_{z0.7}}{2};$$

$$F_{z2} = 1.492 \times 10^3 \text{ А};$$

$$h_{п2} = 0.17.$$

96. Магнитное напряжение ярмо ротора:

$$L_{a2} := \frac{(D_2 - 2 \cdot h_{п2})}{2};$$

$$L_{a2} = 0.33 \text{ м},$$

где L_{a2} – расчетная длина индукционных линий в ярме ротора,

$$F_{a2} := L_{a2} \cdot H_{a2};$$

$$F_{a2} = 990 \text{ А};$$

97. МДС обмотки возбуждения при холостом ходе и номинальном напряжении:

$$F_2 := F_{\delta ZC} + F_{z2} + F_{a2};$$

$$F_2 = 3.144 \times 10^4 \text{ А};$$

$$F_{20} := F_2;$$

$$F_{20} = 3.144 \times 10^4 \text{ А};$$

Аналогично проводим расчеты для других значений напряжения характеристики холостого хода, и заносим в таблицу 1.1.регхарак

Таблица 1.1 – Результаты расчета характеристики холостого хода

| $E_{10} *$ | о.е | 0.6 | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 |
|-----------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| E_{10} | В | 3637.3 | 6062.2 | 6668.4 | 7274.6 | 7880.8 | 8487.1 |
| Φ | Вб | 1.482 | 2.47 | 2.717 | 2.964 | 3.211 | 3.458 |
| B_{δ} | Тл | 0.4598 | 0.7663 | 0.8429 | 0.9196 | 0.9962 | 1.0728 |
| $B_{z1/3}$ | Тл | 0.9277 | 1.5462 | 1.7008 | 1.8554 | 2.0101 | 2.1647 |
| B'_{a1} | Тл | 0.8199 | 1.3665 | 1.5032 | 1.6398 | 1.7765 | 1.9131 |
| $H_{z1/3}$ | А/м | 225 | 5400 | 11100 | 26400 | 43500 | 4200 |
| H'_{a1} | А/м | 134 | 305 | 390 | 610 | 1316 | 38815 |
| F_{δ} | А | 16635 | 27725 | 30498 | 33270 | 36043 | 38815 |
| F_{z1} | А | 42.547 | 1021 | 2099 | 4992 | 8226 | 15600 |
| F_{a1} | А | 144 | 329 | 420 | 657 | 1418 | 4526 |
| $F_{\delta ZC}$ | А | 16820 | 29075 | 33020 | 38920 | 45690 | 58940 |

Продолжение таблицы 1.1

| | | | | | | | |
|-------------------|------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| $\Phi_{\delta 2}$ | Вб | 0.058 | 0.1001 | 0.114 | 0.134 | 0,157 | 0.203 |
| Φ_2 | Вб | 1.538 | 2.5664 | 2.827 | 3.094 | 3.364 | 3.656 |
| $B_{z(0.2)}$ | Тл | 1.101 | 1.8374 | 2.024 | 2.215 | 2,408 | 2,617 |
| $B_{z(0.7)}$ | Тл | 0.791 | 1.3198 | 1.454 | 1.591 | 1,73 | 1,88 |
| B'_{a2} | Тл | 0.884 | 1.4751 | 1.625 | 1.778 | 1,993 | 2,101 |
| $H_{z(0.2)}$ | А/м | 1440 | 15700 | 35000 | 93000 | 141000 | 200000 |
| $H_{z(0.7)}$ | А/м | 1161 | 1852 | 28000 | 4820 | 9000 | 22000 |
| H_{a2} | А/м | 1242 | 3130 | 5900 | 11400 | 39500 | 178000 |
| F_{z2} | А | 221.09 | 1491.9 | 3213 | 8315 | 12750 | 18870 |
| F_{a2} | А | 409.86 | 1032.9 | 1947 | 3762 | 13040 | 58740 |
| F_2 | А | 17450 | 31600 | 38180 | 51000 | 71470 | 136600 |
| F_2^* | о.е. | 0.552 | 1 | 1.208 | 1.614 | 2,262 | 4,321 |

98. МДС обмотки возбуждения (о.е.) при других значениях напряжения:

$$F_{2x} := \frac{F_2}{F_{20}};$$

99. МДС обмотки статора на один полюс при номинальном токе якоря:

$$F_{1н} := 1.35 \cdot I_{1н\phi} \cdot \frac{\omega_1 \cdot k_{01}}{p}; \quad F_{1н} = 5.137 \times 10^4 \text{ А};$$

100. Коэффициент приведения по первой гармонике магнитного поля МДС якоря к условиям обмотки возбуждения:

$$k_a := \frac{\pi^2 \cdot \gamma}{8 \cdot \text{ьшт} \left(\gamma \cdot \frac{\pi}{2} \right)}; \quad k_a = 1.002.$$

101. Приведенная МДС обмотки якоря при номинальной нагрузке к условиям обмотки возбуждения:

$$F'_{1н} := F_{1н} \cdot k_a; \quad F'_{1н} = 5.145 \times 10^4 \text{ А}.$$

В относительных единицах:

$$F'_{1нх} := \frac{F'_{1н}}{F_{20}}; \quad F'_{1нх} = 1.636.$$

102. Индуктивное сопротивление рассеяния Потье:

$$x_{px} := x_{\sigma 1x} + 0.025;$$

$$x_{px} = 0.142;$$

$$x_{\sigma 1x} = 0.117.$$

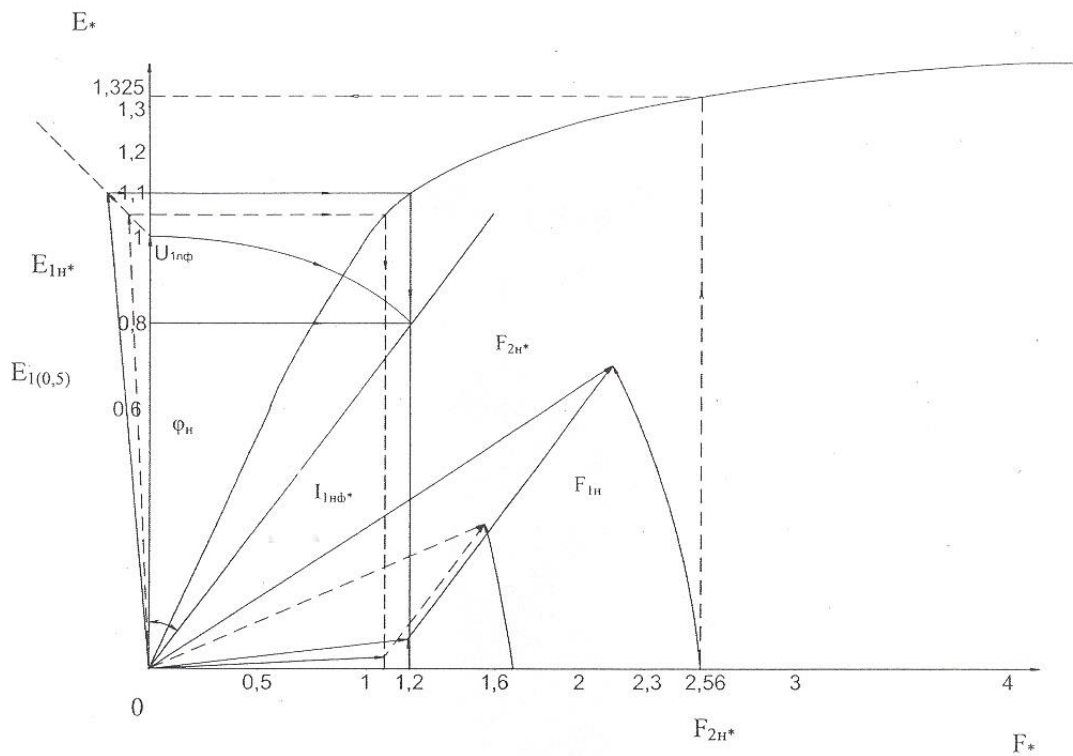


Рисунок 1.2 – Диаграмма Потье

103. Для определения МДС обмотки возбуждения при номинальной нагрузке с помощью $F'_{1н}$ и x_{p1} на характеристике холостого хода строим векторную диаграмму, которая указана на рисунке 1.3 и с помощью которого определяем $F_{2н}^*$:

$$F_{2нх} := 2.31 \text{ о. е.}$$

В именованных единицах:

$$F_{2н} := F_{2нх} \cdot F_{20};$$

$$F_{2н} = 7,263 \times 10^4.$$

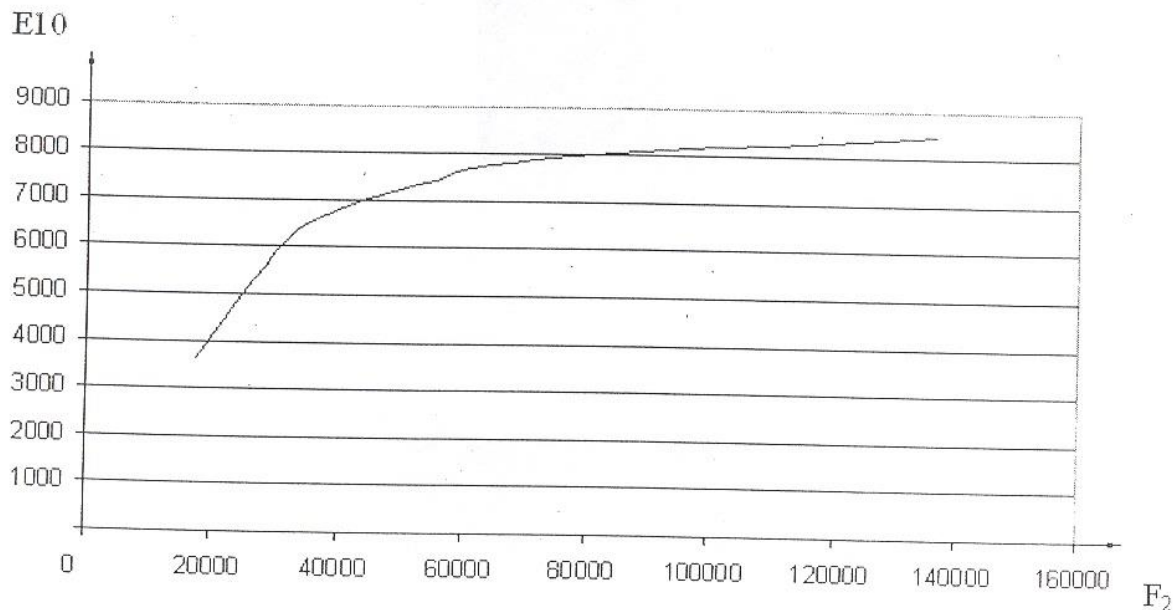


Рисунок 1.3 – Характеристика холостого хода

104. ЭДС обмотки статора при $F_2 = F_{2н}$:

$$E_{10x} := 1.29 \text{ о. е.}$$

105. Изменение напряжение (%) при сбросе нагрузки от номинальной до нуля:

$$\Delta U := (E_{10x} - 1) \cdot 100; \quad \Delta U = 29\%.$$

106. Регулировочную характеристику строим для точек нагрузки, соответствующих $I_1 / I_{1н} = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$. Например, рассмотрим при 0,5 к вектору напряжения, прибавляют вектор падения напряжения (перпендикулярно напряжению тока):

$$0,5 \cdot x_{px} = 0,071.$$

и находим ЭДС $E_{1(0,5)}^*$, для которой определяем результирующих МДС $F_{p(0,5)}^*$. К результирующей МДС параллельно вектору тока прибавляем:

$$F_{10,5x} := 0,5 \cdot F'_{1нx}; \quad F_{10,5x} = 0,818;$$

и находим МДС $F_{2(0,5)}^* = 1,8$:

$$F_{205x} := 1,8.$$

Результаты расчета регулировочной характеристики сведены в таблицу 1.2, а характеристика построена на рисунке 1.4.

Таблица 1.2 – Регулировочная характеристика

| | | | | | | |
|---------|---|------|------|------|------|------|
| I_1^* | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.25 |
| I_2^* | 1 | 1.3 | 1.69 | 2.1 | 2.56 | 2.95 |

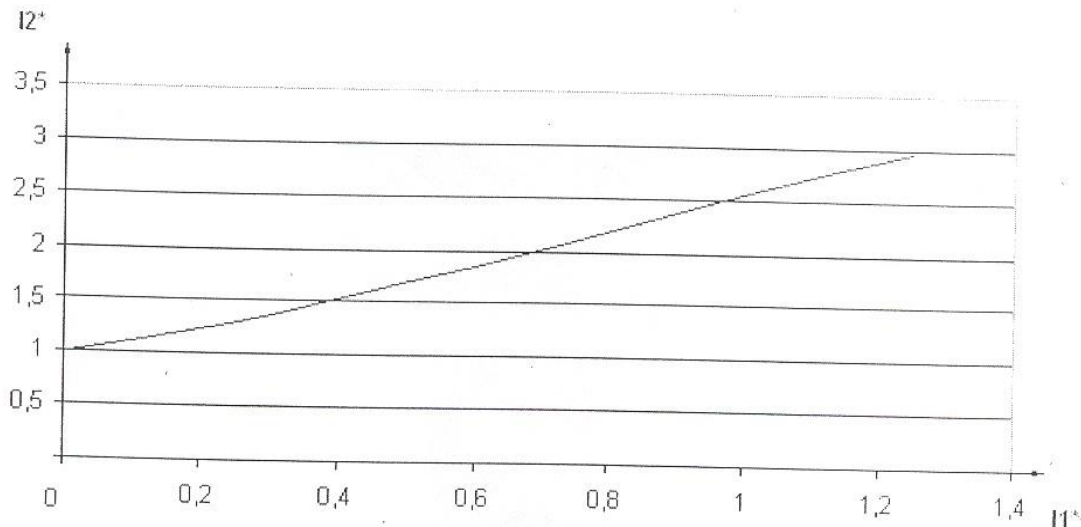


Рисунок 1.4 – Регулировочная характеристика

107. Охлаждение обмотки ротора – непосредственное воздушное по принципу многоструйной самовентилиации. за расчетную температуру обмотки ротора принимаем 120°C . Удельное сопротивление меди с присадкой серебра при температуре 15°C :

$$\rho_{\text{M15}} := \frac{10^{-6}}{55} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

при температуре 120°C :

$$\rho_{\text{M120}} := 1.42 \cdot \frac{10^{-6}}{55};$$

$$\rho_{\text{M120}} = 2.582 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

108. Определяем среднюю длину витка.

Средняя длина лобовой части полувитка возбуждения:

$$C_2 := 0.08;$$

$$C'_2 := 0.025;$$

$$R_B := 0.035;$$

$$D_{\text{всп}} := D_2 - 2 \cdot h_{22} - h_{21}; \quad D_{\text{всп}} = 0.793 \text{ м},$$

где $D_{\text{всп}}$ – диаметр окружности, на которой расположена лобовая часть среднего витка обмотки возбуждения,

$$q_2 := \frac{Z_2}{4}; \quad q_2 = 9,$$

где q_2 – число катушек на полюс,

$$L_{\text{л2}} := 2 \cdot C'_2 + b_2 \cdot q_2 + C'_2 \cdot (q_2 - 1) + k_\gamma \cdot D_{\text{всп}} - 0.86 \cdot \left(R_b + \frac{b_2}{2} \right);$$

$$L_{\text{л2}} = 1.238 \text{ м}.$$

Средняя длина витка:

$$L_{\text{в2}} := 2 \cdot (L_2 + L_{\text{л2}}); \quad L_{\text{в2}} = 8.92 \text{ м}.$$

109. Предварительная площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки возбуждения:

$$U_{2\text{н}} := 250 \text{ В},$$

где $U_{2\text{н}}$ – номинальное напряжение обмотки возбуждения по [1] (предварительно):

$$S'_2 := \rho_{\text{м120}} \cdot \frac{2.2 \cdot F_{2\text{н}} \cdot L_{\text{в2}}}{U_{2\text{н}}}; \quad S'_2 = 1.472 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

110. По [1] выбираем два элементарных проводника с размерами $b_2 = 0.028 \text{ мм}$, $a_{2\text{э}} := 0.01 \text{ м}$, $S_{2\text{э}} := 248.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Площадь сечения эффективного проводника:

$$S_2 := 2 \cdot S_{2\text{э}}; \quad S'_2 = 4.962 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Высота эффективного проводника:

$$a_2 := 2 \cdot a_{2Э}; \quad a_2 = 0.02 \text{ м.}$$

111. Число эффективных проводников по высоте паза ротора (предварительно):

$\delta_{\text{ИВ}} := 0.001$ м – витковая изоляция (прокладки) на 1 виток по [1],

$$u'_{\text{п2}} := \frac{h_{21}}{(a_2 + \delta_{\text{ИВ}})}; \quad u'_{\text{п2}} = 6.133.$$

Принимаем:

$$u'_{\text{п2}} = 6.$$

112. Уточняем высоту паза ротора с учетом данных [1]:

$$h_{\text{п2}} := u_{\text{п2}} \cdot a_2 + (u_{\text{п2}} - 1) \cdot \delta_{\text{ИВ}} + \Sigma \delta_{\text{п}} + h_{\text{и1}} + h_{\text{кл2}}$$

$$h_{\text{п2}} = 0.166 \text{ м}$$

113. Уточняем размеры:

$$h_{21} := u_{\text{п2}} \cdot a_2 + (u_{\text{п2}} - 1) \cdot \delta_{\text{ИВ}}; \quad h_{21} = 0.125 \text{ м;}$$

$$h_{22} := h_{\text{и1}} + h_{\text{кл2}}; \quad h_{22} = 0.039 \text{ м.}$$

114. Число витков обмотки возбуждения на один полюс:

$$\omega_2 := \frac{Z_2}{4} \cdot u_{\text{п2}}; \quad \omega_2 = 54.$$

115. Номинальный ток возбуждения:

$$I_{2Н} := \frac{F_{2Н}}{\omega_2}; \quad I_{2Н} = 1.345 \times 10^3 \text{ А.}$$

116. Ток возбуждения при холостом ходе:

$$I_{20} := \frac{F_2}{\omega_2}; \quad I_{20} = 582.264 \text{ А.}$$

117. Число отсеков ротора при одинаковой их длине:

$$n'_0 := \frac{L_2}{0.47}; \quad n'_0 = 6.855.$$

Принимаем: $n'_0 := 7$.

Длина среднего отсека:

$$L_0 := \frac{L_2}{n'_0}; \quad L_{\text{окр}} = 0.921 \text{ м.}$$

Всего отсеков:

$$n_0 := n'_0 - 2; \quad n_0 = 5,$$

из них выпускных пов=3, заборных поз=2.

118. Расстояние между осями вентиляционных каналов.

Число вентиляционных каналов с одной стороны принимаем $n_k := 7$:

$$t_{\text{вк}} := \frac{L_0}{n_k}; \quad t_{\text{вк}} = 0.066 \text{ м.}$$

Вентиляционные каналы имеют размеры:

$$a_1 := 0.005 \text{ м}; \quad b := 0.016 \text{ м.}$$

119. Длина вентиляционного канала по одной боковой стороне катушки:

$$h := \sqrt{(0.5 \cdot L_0)^2 + h_{21}^2}; \quad h = 0.262 \text{ м.}$$

120. Длина выреза на поверхности проводника со стороны клина:

$$b' := b \cdot \frac{h}{h_{21}}; \quad b' = 0.034 \text{ м.}$$

121. Площадь поперечного сечения эффективного проводника,[1]:

$$S_{\text{м2А}} := a_2 \cdot (b_2 - a_1); \quad S_{\text{м2А}} = 4.6 \times 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{м2В}} := a_2 \cdot (b_2 - 2a_1); \quad S_{\text{м2В}} = 3.6 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

122. Коэффициент приведения площади поперечного сечения проводника в пазовой части:

$$k_{\pi} := \frac{1}{\left(2 - \frac{2 \cdot b'}{t_{\text{BK}}}\right) \cdot \frac{S_2}{S_{\text{M2A}}} + \left(\frac{2 \cdot b'}{t_{\text{BK}}} - 1\right) \cdot \frac{S_2}{S_{\text{M2B}}}}; \quad k_{\pi} = 0.922.$$

123. Эквивалентная площадь поперечного сечения меди эффективного проводника в пазовой части ротора:

$$S_{\text{M2}\pi} := S_2 \cdot k_{\pi}; \quad S_{\text{M2}\pi} = 4.575 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

124. Площадь поперечного сечения меди полого эффективного проводника в лобовой части. Принимаем размеры вентиляционного канала:

$$b_k := 0.014 \text{ м}; \quad R_k := 0.0035 \text{ м};$$

$$S_{k2} := (b_k - 2 \cdot R_k) \cdot 2 \cdot R_k + \pi \cdot R_k^2; \quad S_{k2} = 8.748 \times 10^{-5} \text{ м}^2.$$

где S_{k2} – площадь поперечного сечения канала,

$$S_{\text{M2л}} := S_2 - S_{k2}; \quad S_{\text{M2л}} = 4.807 \times 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где $S_{\text{M2л}}$ – площадь поперечного сечения меди полого эффективного проводника в лобовой части.

Отношение:

$$\frac{S_{k2}}{S_{\text{M2л}}} = 0.214 \text{ находится в пределах } (0.2 - 0.4).$$

125. Плотность тока в пазовой части обмотки ротора при номинальном возбуждении:

$$\Delta_{2\pi} := \frac{I_{2\text{H}}}{S_{\text{M2}\pi}}; \quad \Delta_{2\pi} = 2.94 \times 10^6 \text{ А/м}^2.$$

126. Плотность тока в лобовой части ротора при номинальном возбуждении:

$$\Delta_{2л} := \frac{I_{2\text{H}}}{S_{\text{M2л}}}; \quad \Delta_{2л} = 3.291 \times 10^6 \text{ А/м}^2.$$

127. Сопротивление обмотки возбуждения при 15,75 и 120°C:

$$r_{215} := 4 \cdot p_{m15} \cdot \omega_2 \cdot \left(\frac{L_2}{S_{M2П}} + \frac{L_{Л2}}{S_{M2Л}} \right); \quad r_{215} = 0.04 \text{ Ом};$$

$$r_{275} := 1.24 \cdot r_{215}; \quad r_{275} = 0.049 \text{ Ом};$$

$$r_{2120} := 1.42 \cdot r_{215}; \quad r_{2120} = 0.056 \text{ Ом}.$$

128. Номинальное напряжение обмотки возбуждения:

$$U_{2Н} := I_{2Н} \cdot r_{2120}; \quad U_{2Н} = 75.549 \text{ В}.$$

129. Номинальное напряжение возбuditеля:

$$U_{2НВ} := U_{2Н} + 2; \quad U_{2НВ} = 77.549 \text{ В}.$$

130. Номинальная мощность возбuditеля:

$$P_{2Н} := U_{2НВ} \cdot I_{2Н}; \quad P_{2Н} = 1.043 \times 10^5 \text{ Вт}.$$

1.4 Параметры и постоянные времени, статическая перегружаемость и токи короткого замыкания, потери мощности и коэффициент полезного действия

131. Индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси:

$$x_{адx} := \frac{k_a \cdot F_{1Н}}{F_\delta}; \quad x_{адx} = 1.85.$$

132. Индуктивное сопротивление взаимной индукции по поперечной оси:

$$x_{аqx} := \frac{x_{адx}}{1 + (k_{\delta z2} - 1) \cdot \frac{2}{\gamma}}; \quad x_{аqx} = 1.731.$$

133. Синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям соответственно:

$$x_{dx} := x_{адx} + x_{\sigma 1x}; \quad x_{dx} = 1.986;$$

$$x_{qx} := x_{аqx} + x_{\sigma 1x}; \quad x_{qx} = 1.849.$$

134. Коэффициент рассеяния обмотки ротора (для прямоугольных пазов ротора):

$$\lambda_{п2ф} := \frac{h_{21} + 3 \cdot h_{22}}{3 \cdot b_{п2}}; \quad \lambda_{п2ф} = 2.592;$$

$$\sigma_{2f} := 1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot k_a \cdot F_\delta \cdot L_2}{\Phi_1 \cdot Z_2} \cdot \lambda_{п2ф} \cdot 10^{-6} + 0.02; \quad \sigma_{2f} = 1.053.$$

135. Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения переменному току при отсутствии короткозамкнутых обмоток или контуров на статоре и роторе:

$$x_{2fx} := \sigma_{2f} \cdot x_{adx}; \quad x_{2fx} = 1.948.$$

136. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения:

$$x_{\sigma 2x} := x_{2fx} - x_{adx}; \quad x_{\sigma 2x} = 0.098.$$

137. Переходные индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси:

$$x'_{dx} := x_{\sigma 1x} + \frac{1}{\frac{1}{x_{adx}} + \frac{1}{x_{\sigma 2x}}}; \quad x'_{dx} = 0.21.$$

138. Сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям:

$$x''_{dx} := x_{\sigma 1x} + 0.025; \quad x''_{dx} = 0.142;$$

$$x''_{qx} := 1.5 \cdot x''_{dx}; \quad x''_{qx} = 0.213.$$

139. Синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря для токов обратной последовательности:

$$x_{c2x} := 1.225 \cdot x''_{dx}; \quad x_{c2x} = 0.174.$$

140. Синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря токам нулевой последовательности при $b = y/t = 32/39 = 0.82 > 2/3$:

$$h_3 := 0.0158 \text{ м};$$

$$a := 0.47 \cdot \left(\frac{\omega_1}{10}\right)^2 \cdot \frac{I_{1\text{нф}} \cdot L_1}{U_{1\text{нф}} \cdot Z_1 \cdot b_{\text{п1}}} \cdot \left[(3 \cdot \beta - 2) \cdot h_4 + (9 \cdot \beta - 5) \cdot \frac{h_{11}}{12} - (9 \cdot \beta - 8) \cdot \frac{h_3}{12} \right];$$

$$b := 1.57 \cdot x_{\text{adx}} \cdot \left(\beta - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{1}{k_a \cdot k_{01}^2} \cdot \left[\left(\frac{2}{Z_1}\right)^2 + 0.037 + 0.39 * \left(\beta - \frac{2}{3}\right) - \left(\beta - \frac{2}{3}\right)^2 \right];$$

$$x_{\text{c0x}} := a + b; \quad x_{\text{c0x}} = 0.075.$$

141. Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора с учетом действия вихревых токов в массивной бочке ротора:

142. Постоянная времени затухания переходной составляющей тока якоря при внезапном трехфазном коротком замыкании обмотки:

где $k_{02} := 0.801$ – обмоточный коэффициент основной волны МДС ротора, [1],

$$T_{\text{d0}} := \frac{2 \cdot \omega_2^2 \cdot k_{02} \cdot \sigma_{2f} \cdot \Phi_1}{0.75 \cdot r_{275} \cdot F_8}; \quad T_{\text{d0}} = 11.85 \text{ с.}$$

143. Постоянная времени затухания переходной составляющей тока якоря при внезапном трехфазном коротком замыкании обмотки:

$$T'_{\text{d3}} := T_{\text{d0}} \cdot \frac{x'_{\text{dx}}}{x_{\text{dx}}}; \quad T'_{\text{d3}} = 1.266 \text{ с.}$$

144. Постоянная времени затухания сверхпереходной составляющей тока якоря при внезапном трехфазном коротком замыкании обмотки:

$$T''_{\text{d3}} := \frac{1}{8} T'_{\text{d3}}; \quad T''_{\text{d3}} = 0.158 \text{ с.}$$

145. Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока якоря при внезапном трехфазном коротком замыкании:

$$T_{\text{a3}} := \frac{x_{\text{c2x}}}{314 \cdot r_{175x}}; \quad T_{\text{a3}} = 0.7 \text{ с};$$

$$T_{a3} := 04798 \text{ с.}$$

146. Отношение короткого замыкания:

$E'_{10x} := 1.11$ – находим по прямолинейной части х.х.х:

$$\text{ОКЗ} := \frac{E'_{10x}}{X_{dx}}; \quad \text{ОКЗ} = 0.564;$$

$$\text{ОКЗ} := 0.7.$$

147. Кратность установившегося тока трехфазного короткого замыкания при номинальном возбуждении:

$$I_{кнх} := \text{ОКЗ} \cdot F_{2нх}; \quad I_{кнх} = 1.617.$$

148. Кратность установившегося тока двухфазного короткого замыкания:

при $F_{2x}=F_{20x}=1$,

$$I_{к2x} := \frac{\sqrt{3} \cdot E'_{10x}}{X_{dx} + X_{c2x}}; \quad I_{к2x} = 0.898,$$

при $F_{2x}=F_{2нх}=2.31$,

$$I_{к2нх} := I_{к2x} \cdot F_{2нх}; \quad I_{к2нх} = 2.074.$$

149. Кратность установившегося тока однофазного короткого замыкания:

$$I_{к1x} := \frac{3 \cdot E'_{10x}}{X_{dx} + X_{c2x} + X_{c0x}}; \quad I_{к1x} = 1.502,$$

при $F_{2x}=F_{20x}=1$, а при номинальном токе возбуждения:

$$I_{к1нх} := I_{к1x} \cdot F_{2нх}; \quad I_{к1нх} = 3.469.$$

150. Кратность ударного тока:

$$i_{уд} := 1.8 \cdot \frac{1.05}{X''_{dx}}; \quad i_{уд} = 13.294.$$

151. Статическая перегружаемость:

$$W_{\Pi} := \text{OKЗ} \cdot \frac{F_{2\text{HX}}}{\cos\phi_{\text{H}}}; \quad W_{\Pi} = 2.021,$$

где $W_{\Pi} > 1.7$, что удовлетворяет требованиям ГОСТ.

152. Масса меди обмотки статора:

$$G_{\text{M1}} := 3 \cdot 8900 \cdot a_9 \cdot \omega_1 \cdot L_{\text{B1}} \cdot s_1; \quad G_{\text{M1}} = 5.577 \text{ кг.}$$

153. Масса меди обмотки ротора:

$$G_{\text{M2}} := 4 \cdot 8900 \cdot \omega_2 \cdot (L_2 \cdot S_{\text{M2П}} + L_{\text{Л2}} \cdot S_{\text{M2Л}}); \quad G_{\text{M2}} = 3.81 \times 10^3 \text{ кг.}$$

154. Масса меди обмоток статора и ротора:

$$G_{\text{M}} := G_{\text{M1}} + G_{\text{M2}}; \quad G_{\text{M}} = 3.815 \times 10^3 \text{ кг.}$$

155. Масса стали ярма статора:

$$G_{\text{a1}} := \frac{\pi}{4} \cdot 7600 \cdot L_c \cdot k_c \cdot [D_a^2 - (D_1 + 2 \cdot h_{\text{П1}})^2];$$

$$G_{\text{a1}} = 3.678 \times 10^4 \text{ кг.}$$

156. Масса стали зубцов статора:

$$G_{\text{z1}} = 7600 \cdot h_{\text{П1}} \cdot L_c \cdot k_c \cdot [\pi \cdot (D_1 + h_{\text{П1}}) - Z_1 \cdot b_{\text{П1}}];$$

$$G_{\text{z1}} := 7.85 \times 10^3 \text{ г.}$$

157. Полная масса электротехнической стали статора:

$$G_c := G_{\text{a1}} + G_{\text{z1}}; \quad G_c = 4.463 \times 10^4 \text{ кг.}$$

158. Расход активных материалов:

для меди:

$$g_{\text{M}} := \frac{G_{\text{M}}}{S_{\text{H}}}; \quad g_{\text{M}} = 6.104 \times 10^{-5},$$

для электротехнической стали:

$$g_c := \frac{G_c}{S_{\text{H}}}; \quad g_c = 7.141 \times 10^{-4}.$$

1.4.1 Потери мощности при коротком замыкании

159. Основные электрические потери в обмотке якоря при 75°C:

$$P_{\text{э0}} := 3 \cdot (I_{1\text{нф}}^2 \cdot r_{175}); \quad P_{\text{э0}} = 4.953 \times 10^4.$$

160. Коэффициент вытеснения тока при комбинированном стержне по пункту 44:

$$k_{\text{фк}} := k_{\text{ф1}}; \quad k_{\text{фк}} = 1.247.$$

161. Добавочные потери мощности в обмотке якоря:

$$P_{\text{эд}} := (k_{\text{фк}} - 1) \cdot P_{\text{э0}}; \quad P_{\text{эд}} = 1.225 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

162. Добавочные потери мощности в зубцах P_{zvk} и ярме P_{avk} от высших гармонических МДС обмотки возбуждения при коротком замыкании:

$$P_{r150} := 0.23 \text{ Вт/кг.}$$

где P_{r150} – удельные потери в стали на гистерезис и вихревые токи, [1],

$$P_{\text{в150}} := 0.62 \text{ Вт/кг,}$$

$$\phi_1 := 0.0117,$$

$$\phi_2 := 0.139,$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – поправочные коэффициенты, [1],

$$P_{\text{zvk}} := (1.3 \cdot \phi_1 \cdot P_{r150} + 1.5 \cdot \phi_2 \cdot P_{\text{в150}}) \cdot \left(\frac{B_{\text{z13}}}{\text{ОКЗ}} \right)^2 \cdot G_{\text{z1}};$$

$$P_{\text{zvk}} = 5.085 \times 10^3 \text{ Вт,}$$

$$k' := 1.1;$$

$$P_{\text{avk}} := 1.7 \cdot k' \cdot (1.2 \cdot \phi_1 \cdot P_{r150} + 1.7 \cdot \phi_2 \cdot P_{\text{в150}}) \cdot \left(\frac{B_{\text{a1}}}{\text{ОКЗ}} \right)^2 \cdot G_{\text{a1}};$$

$$P_{avk} = 4.729 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

163. Добавочные потери мощности в зубцах статора от зубцовых гармонических МДС обмотки возбуждения при коротком замыкании:

$$\frac{\delta \cdot k_{\delta}}{t_1} = 0.967 < 1, \text{ добавочные потери } P_{zvkl} \text{ и } P_{zzk} \text{ можно не учитывать.}$$

164. Добавочные потери мощности на поверхности ротора от высших гармонических МДС статора при коротком замыкании:

$$\phi_4 := 1.6;$$

$$P_{2vk} := \phi_4 \cdot \left(\frac{A}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^6} \right)^2 \cdot D_1^5 \cdot L_2 \cdot 10^3;$$

$$P_{2vk} = 1.938 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

165. Добавочные потери мощности на поверхности ротора от зубцовых гармонических МДС обмотки статора при коротком замыкании при $D \cdot k_d / t_1 > 0.7$ можно не учитывать.

166. Добавочные потери мощности в торцевых частях турбогенератора при коротком замыкании:

$$P_{тк} := 50 \cdot A^2 \cdot D_1^2 \cdot 10^{-7};$$

$$P_{тк} = 3.102 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

167. Полные потери мощности при коротком замыкании и номинальном токе статора:

$$P_{кн} := P_{\text{э0}} + P_{\text{эд}} + P_{zvkl} + P_{avk} + P_{2vk} + P_{тк};$$

$$P_{кн} = 1.646 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

168. Потери мощности в стали ярма и зубцов статора:

$$k_{да} := 1.3;$$

$$k_{дз} := 1.5,$$

где $k_{да}$ и $k_{дз}$ – коэффициенты, учитывающие увеличение потерь в стали,

$$p_{150B} := 0.8 \text{ Вт/кг};$$

$$p_{150П} := 1.5 \text{ Вт/кг}.$$

где p_{150B} и $p_{150П}$ – удельные потери в стали, [1],

$$P_{ca} := k_{да} \cdot k' \cdot p_{150B} \cdot (B_{a1})^2 \cdot G_{a1};$$

$$P_{ca} = 9.468 \times 10^4 \text{ Вт};$$

$$P_{z1} := k_{дз} \cdot k' \cdot p_{150П} \cdot (B_{z13})^2 \cdot G_{z1};$$

$$P_{z1} = 4.645 \times 10^4 \text{ Вт}.$$

169. Основные потери мощности в стали при холостом ходе:

$$P_{co} := P_{ca} + P_{z1};$$

$$P_{co} = 1.411 \times 10^5 \text{ Вт}.$$

170. Добавочные потери мощности в магнитопроводе статора от высших гармонических МДС обмотки возбуждения при холостом ходе:

$$P_{1v0} := OK3^2 \cdot (P_{zvк} + P_{avк});$$

$$P_{1v0} = 2.567 \times 10^4 \text{ Вт}.$$

171. Добавочные потери мощности в магнитопроводе статора от зубцовых гармонических МДС обмотки возбуждения при холостом ходе:

$$P'_{zvк} := 0;$$

$$P'_{zv0} := OK3^2 \cdot P'_{zvк};$$

$$P'_{zv0} = 0 \text{ Вт}.$$

172. Добавочные пульсационные потери мощности в зубцах статора от зубчатости ротора при холостом ходе:

$$P_{zzк} := 0;$$

$$P_{zz0} := p_{150П} \cdot \gamma \cdot \left[\frac{0.5 \cdot \delta \cdot \left(\frac{b_{п2}}{\delta}\right)^2}{t_1 \cdot \left(5 + \frac{b_{п2}}{\delta}\right)} \cdot B_{z13} \right]^2 \cdot (Z'_2)^2 \cdot G_{z1} + OK3^2 \cdot P_{zzк};$$

$$P_{zz0} = 9.708 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

173. Добавочные потери мощности на поверхности ротора от зубчатости статора при холостом ходе:

$$u := \frac{b_{п1}}{2 \cdot \delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_{п1}}{2 \cdot \delta}\right)^2};$$

$$u = 1.312;$$

$$\beta_c := \frac{1 + u^2 - 2 \cdot u}{2(1 + u^2)};$$

$$\beta_c = 0.018;$$

$$P_{2z0} := \frac{5}{\sqrt{Z_1}} (B_\delta \cdot k_\delta \cdot \beta_c)^2 \cdot D_1^3 \cdot L_1 \cdot 10^7;$$

$$P_{2z0} = 5.553 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

174. Добавочные потери мощности при холостом ходе в торцевых частях:

$$P_{то} := OK3^2 \cdot P_{тк};$$

$$P_{то} = 1.52 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

175. Сумма потерь мощности встали при холостом ходе:

$$P_c := P_{co} + P_{1v0} + P'_{zv0} + P_{zz0} + P_{2z0} + P_{то};$$

$$P_c = 2.846 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

1.4.2 Потери мощности на возбуждение

176. Потери мощности на возбуждение при номинальной нагрузке и температуре 75°C:

где $\Delta U_{щ} := 2 \text{ В}$ – падение напряжения в щеточном контакте,

$\eta := 0.9$ – КПД возбудителя,

$$P_{2H75} := \frac{I_{2H}^2 \cdot r_{275} + \Delta U_{щ} \cdot I_{2H}^2}{\eta};$$

$$P_{2H75} = 1.028 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

1.4.3 Механические потери мощности

177. Потери мощности на трение в двух подшипниках скольжения: G_p

$$G_p := 1.4 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 7850 \cdot D_2^2 \cdot L_2;$$

$$G_p = 2.781 \times 10^4 \text{ кг,}$$

где G_p – масса ротора.

Диаметр и длина шейки вала (цапфы) $L_{ц} = 1.2 \cdot d_{ц}$;

$$p_{уд} := 1.2 \times 10^6$$

$$d_{ц} := \sqrt{\frac{10 \cdot G_p}{1.2 \cdot 2 \cdot p_{уд}}};$$

$$d_{ц} = 0.311 \text{ м;}$$

$$L_{ц} = 1.2 \cdot d_{ц};$$

$$L_{ц} = 0.373 \text{ м;}$$

$$P_{п} := 8.06 \cdot 10^3 \cdot d_{ц}^2 \cdot \sqrt{\frac{G_p \cdot L_{ц}}{(2 \cdot d_{ц})}};$$

$$P_{п} = 1.005 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

178. Потери мощности на трение вращающегося ротора о газ при давлении водорода в корпусе:

$$P_H := 3 \cdot 10^5 \text{ Па;}$$

$$P_{pH} := 57.3 \cdot 10^3 \cdot D_2^4 \cdot L_2 \cdot P_H \cdot 10^{-6};$$

$$P_{\text{рн}} = 5.539 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

179. Потери мощности на трение двух бандажных колец о газ:

$$C1 := 1.065; \quad \text{для } 0.95 < D2 < 1.1 \text{ м.}$$

$$C2 := 0.57$$

Размеры бандажных колец:

$$D_{\text{бк}} := C1 \cdot D_2;$$

$$D_{\text{бк}} = 1.065 \text{ м;}$$

$$L_{\text{бк}} := C2 \cdot D_2;$$

$$L_{\text{бк}} = 0.57 \text{ м;}$$

$$P_{\text{бкн}} := 57.3 \cdot 10^3 \cdot D_{\text{бк}}^4 \cdot L_{\text{бк}} \cdot P_{\text{н}} \cdot 10^{-6};$$

$$P_{\text{бкн}} = 1.261 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

180. Потери на трение торцевых поверхностей канавок рифления о газ:

$$n_{\text{риф}} := 118;$$

$$h_{\text{риф}} := 0.006 \text{ м,}$$

число канавок рифления принимаем равным:

где $h_{\text{риф}}$ – глубина канавок рифления

$$P_{\text{рифн}} := 2.7 \cdot n_{\text{риф}} \cdot \left[D_2^5 - (D_2 - 2 \cdot h_{\text{риф}})^5 \right] \cdot 10^3 \cdot P_{\text{н}} \cdot 10^{-6};$$

$$P_{\text{рифн}} = 5.599 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

181. Потери на трение щеток о контактные кольца:

$\mu_{\text{т}} := 0.12$ – коэффициент трения при скольжении щеток по кольцу,

$P_{\text{д}} := 0.2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – удельное давление щеток на кольцо,

$\Delta_{\text{щ}} := 8 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$ – средняя плотность тока под щетками,

$D_{\text{к}} := 0.46 \text{ м}$ – наружный диаметр контактного кольца,

$$S_{\text{щ}} := \frac{I_{2\text{н}}}{\Delta_{\text{щ}}};$$

$$S_{\text{щ}} = 0.017 \text{ м}^2;$$

$$P_{\text{тщ}} := 98.1 \cdot \mu_{\text{т}} \cdot P_{\text{д}} \cdot S_{\text{щ}} \cdot D_{\text{к}};$$

$$P_{\text{тщ}} = 5.751 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

1.4.4 Потери мощности на вентиляцию

181. Отводимые газом потери мощности:

$$P' := P_{\text{с}} + P_{\text{кн}} + P_{2\text{н}75} + P_{\text{рн}} + P_{\text{бкн}} + P_{\text{рифн}};$$

$$P' = 6.255 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

182. Расход газа (воздуха) принимаем:

$$\theta_{\text{г}} := 25^{\circ}\text{C};$$

$$\theta'_{\text{г}} := 5 \cdot p_{\text{н}} \cdot 10^{-6};$$

$$\theta'_{\text{г}} = 1.5;$$

$$v_{\text{г}} := \frac{P'}{11 \cdot (\theta_{\text{г}} - \theta'_{\text{г}}) \cdot p_{\text{н}} \cdot 10^{-3}};$$

$$v_{\text{г}} = 8.066 \text{ м}^3/\text{с.}$$

183. Потери мощности на вентиляцию:

$$H_{\text{г}} := 6 \cdot p_{\text{н}} \cdot 10^{-3};$$

$$H_{\text{г}} = 1.8 \times 10^3 \text{ Па};$$

$$\eta_{\text{вент}} := 0.5;$$

$$P_{\text{вент}} := \frac{v_{\text{г}} \cdot H_{\text{г}}}{\eta_{\text{вент}}};$$

$$P_{\text{вент}} = 2.904 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

184. Полные механические потери мощности, включая потери на вентиляцию и не учитывая потери на водяное охлаждение:

$$P_{\text{мех}} := P_{\text{п}} + P_{\text{рн}} + P_{\text{бкн}} + P_{\text{рифн}} + P_{\text{тщ}} + P_{\text{вент}};$$

$$P_{\text{мех}} := 2.089 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

185. Сумма потерь мощности при номинальной нагрузке:

$$P_{\Sigma\text{н}} := P_{\text{кн}} + P_{\text{с}} + P_{2\text{н}75} + P_{\text{мех}};$$

$$P_{\Sigma\text{н}} = 7.609 \times 10^5.$$

186. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке (%):

$$\eta_{\text{н}} := \left(1 - \frac{P_{\Sigma\text{н}}}{P_{\text{н}} + P_{\Sigma\text{н}}}\right) \cdot 100;$$

$$\eta_{\text{н}}\% = 98.9.$$

Зависимость КПД от нагрузки достаточно построить для:

$$P = (0.25; 0.5; 0.75; 1.0; 1.25) P_{\text{н}}.$$

Для определения КПД при нагрузках, отличных от номинальной, следует найти следующие потери.

187. Постоянные потери мощности, не зависящие от нагрузки:

$$P_0 := P_{\text{с}} + P_{\text{мех}};$$

$$P_0 = 4.935 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

188. Потери мощности короткого замыкания:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{кн}}(I_1/I_{1\text{н}})^2;$$

$$P_{\text{к}} := 4.0347 \times 10^5 \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1\text{н}}}\right)^2 \text{ Вт};$$

где $I_1/I_{1\text{н}} = P/P_{\text{н}} = 0.25; 0.5; 0.75; 1.0; 1.25$.

189. Потери мощности на возбуждение:

$$P_2 := 4.3858 \times 10^5 \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2\text{н}}}\right)^2 \text{ Вт},$$

здесь I_2 – по регулировочной характеристике для соответствующей нагрузки.

190. КПД при любой нагрузке %:

$$h = (1 - PS/P + PS;$$

$$\eta := \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{P + P_{\Sigma}}\right) \cdot 100.$$

Результаты расчета сведены в таблицу 1.3, а зависимость кривой $h = f(P/P_H)$ показана на рисунке 1.5.

Таблица 1.3 – Зависимость КПД от нагрузки

| КПД | | | | | |
|--------------------------------|------------------|----------|------------|----------|-------------|
| Мощность и составляющие потерь | P/P _H | | | | |
| | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.25 |
| P, Вт | 12500000 | 25000000 | 37500000 | 50000000 | 62500000 |
| P ₀ , Вт | 642814 | 642814 | 642814 | 642814 | 642814 |
| P _к , Вт | 1621.846 | 25949.53 | 103798.125 | 184530 | 288328.125 |
| P ₂ | 48057.12 | 81216.53 | 125403.488 | 185071 | 247465.7257 |
| P _Σ | 692493 | 749980.1 | 872015.613 | 1012400 | 1178607.851 |
| P + P _Σ | 13192493 | 25749980 | 38372015.6 | 51012400 | 63678607.85 |
| η, % | 96.7 | 97.09 | 99 | 98.9 | 98.7 |

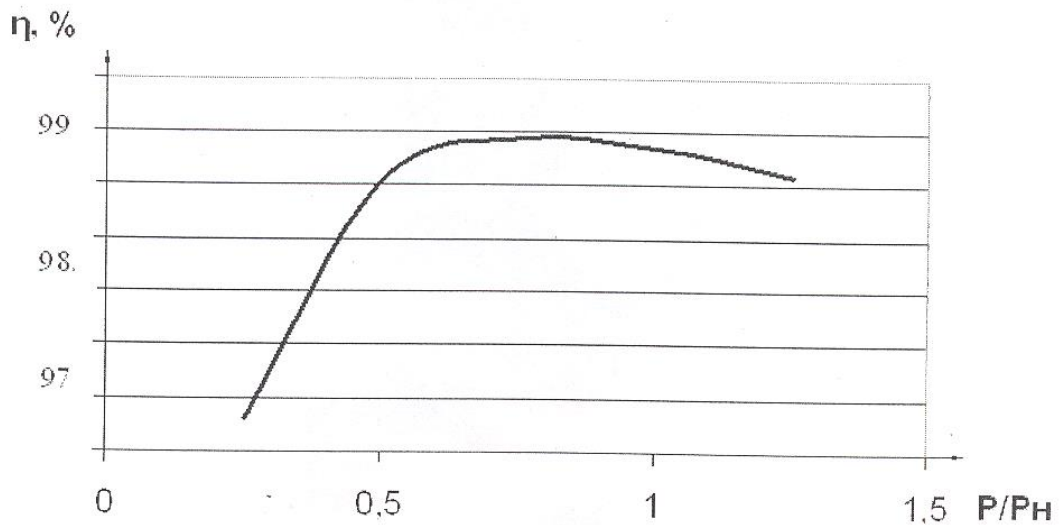


Рисунок 1.5 – Зависимость КПД от нагрузки

2 Тепловой расчет

1. Геометрические размеры расчетного элемента:
ширина элементов на уровне ярма

$$b_a := \frac{\pi}{2 \cdot Z_1} \cdot (D_a + D_1 + 2 \cdot h_{п1});$$

$$b_a = 0.08 \text{ м.}$$

Средняя ширина зубца:

$$b_{z1} := \frac{\pi}{Z_1} \cdot (D_1 + h_{п1}) - b_{п1}; \quad b_{z1} = 0.033 \text{ м.}$$

2. Потери в расчетном элементе:
потери в меди обмотки

$$q_m := \frac{1}{Z_1 \cdot n_{п}} \cdot \left(P_{\varepsilon 0} \cdot \frac{L_1}{L_1 + L_{л1}} + P_{\varepsilon д} \right);$$

$$q_m = 8.381 \text{ Вт,}$$

где $P_{\varepsilon 0} = 4.953 \times 10^4 \text{ Вт}$ – основные,

$P_{\varepsilon д} = 1.225 \times 10^4 \text{ Вт}$ – добавочные потери в меди обмотки статора.

Потери в стали ярма:

где

$$P_a := P_{ca} + P_{avk} \cdot (1 + OK3^2);$$

$$P_a = 1.562 \times 10^5 \text{ Вт;}$$

$$q_a := \frac{P_a}{Z_1 \cdot n_{п}};$$

$$q_a = 33.903 \text{ Вт.}$$

- полные потери в стали ярма; потери в стали зубцов:
здесь

$$P_z := P_{z1} + P_{zvк} \cdot (1 + OK3^2) + P_{zz0};$$

$$P_z = 1.501 \times 10^5 \text{ Вт;}$$

$$q_z := \frac{P_z}{(Z_1 \cdot n_{\text{п}})};$$

$$q_z = 32.584 \text{ Вт.}$$

- полные потери в стали зубцов.

3. Сопротивление теплопроводности пазовой изоляции обмотки статора. Пазовая изоляция обладает удельной теплопроводностью $\lambda_{\text{и}} := 0.24$ Вт/(м·град). При толщине газовой прослойки между стержнем обмотки и стенкой паза $\delta_{\text{н}} := 0.0002$ м, теплопроводности газовой смеси, равной $\lambda_{\text{н}} := 0.2$ Вт/(м·град), и односторонней толщине корпусной изоляции $\delta_{\text{и}} := 0.065$ м эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции:

$$\lambda_{\text{иэ}} := \frac{(\delta_{\text{и}} + \delta_{\text{н}}) \cdot \lambda_{\text{и}} \cdot \lambda_{\text{н}}}{\delta_{\text{и}} \cdot \lambda_{\text{н}} + \delta_{\text{н}} \cdot \lambda_{\text{и}}};$$

$$\lambda_{\text{эи}} = 0.24 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)};$$

тепловое сопротивление изоляции в пазу:

$$R_{\text{и}} := \frac{\delta_{\text{и}}}{2 \cdot \lambda_{\text{иэ}} \cdot h_{\text{п2}} \cdot L_{\text{пак}}};$$

$$R_{\text{и}} = 21.176 \text{ град/Вт.}$$

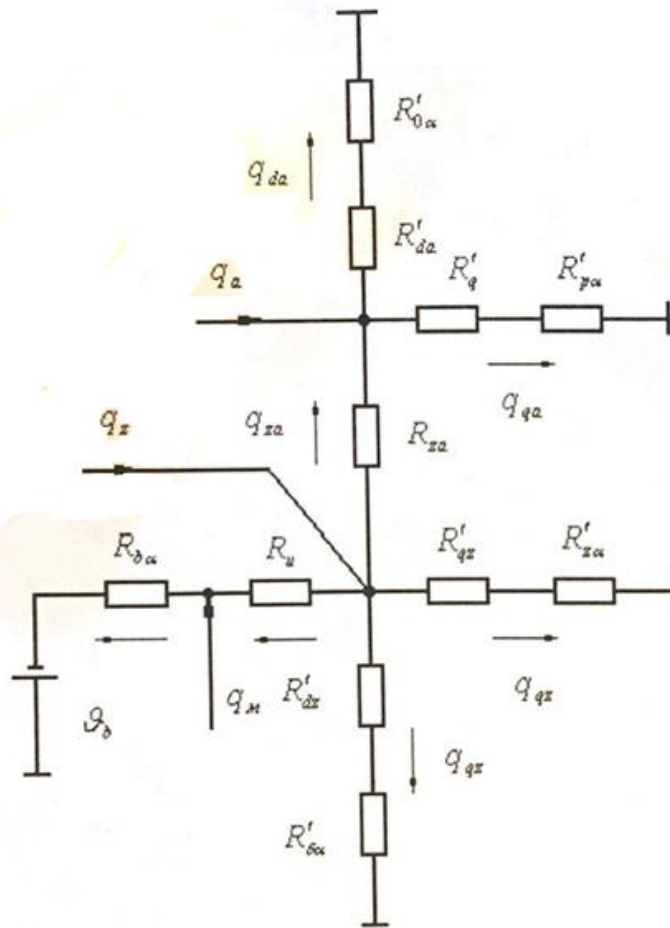
4. Тепловые сопротивления для стали зубца. По [1] принимаем теплопроводность вдоль листов $\lambda_{\text{д}} := 25$ Вт/(м · град), поперек листов $\lambda_{\text{q}} := 3.75$ Вт/(м · град):

$$R'_{\text{dz}} := \frac{h_{\text{п1}}}{2 \cdot b_{\text{z1}} \cdot L_{\text{пак}} \cdot \lambda_{\text{д}}};$$

$$R'_{\text{dz}} = 3.908 \text{ град/Вт};$$

$$R'_{\text{qz}} := \frac{L_{\text{пак}}}{4 \cdot b_{\text{z1}} \cdot h_{\text{п1}} \cdot \lambda_{\text{q}}};$$

$$R'_{\text{qz}} = 0.54 \text{ град/Вт.}$$



q_i – потери в меди обмотки (на зубцовом шаге по длине одного пакета сердечника статора);

q_z – потери в зубце пакета на зубцовом шаге;

q_a – потери в ярме пакета на один зубцовый шаг;

Тепловые сопротивления:

R_e – изоляции обмотки в пакете;

R'_e – изоляции в обмотки в радиальном канале;

R'_{ea} – теплоотдачи с поверхности обмотки в канале;

R'_{dz} – зубца вдоль листов стали;

$R'_{\delta\alpha}$ – теплоотдачи зубца в воздушный зазор;

R'_{qz} – зубца поперек листов стали;

R'_{za} – вдоль листов стали между зубцом и ярмом;

R'_{qa} – ярма поперек листов стали;

R'_{pa} – теплоотдачи ярма в канале;

R'_{da} – ярма вдоль листов стали;

R'_{0a} – ярма с наружной поверхности.

Рисунок 2.1 – Тепловая схема замещения статора с косвенным охлаждением меди обмотки.

5. Тепловые сопротивления для стали ярма:

$$R'_{da} := \frac{h_{a1}}{2 \cdot b_a \cdot L_{\text{пак}} \cdot \lambda_d};$$

$$R'_{da} = 2.414 \text{ град/Вт};$$

$$R'_{qa} := \frac{L_{\text{пак}}}{4 \cdot b_a \cdot h_{a1} \cdot \lambda_q};$$

$$R'_{qa} = 0.087 \text{ Граж/Вт},$$

сопротивление между ярмом и зубцом

$$R_{za} := R'_{dz} + R'_{da};$$

$$R_{za} = 6.322 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $P_{\Sigma} := 2132 \text{ МВт}$ – разность суммарных потерь в турбогенераторе и потерь в меди, так как предполагается, что последние уносятся водой полностью; $c_V := 4200 \text{ Дж/м}^3$ – теплоемкость газа при давлении 0.4 МПа.

6. Уточняем полный расход газа через статор:

$$V := \frac{P_{\Sigma}}{c_V \cdot \theta_r};$$

$$V = 0.02 \text{ м}^3/\text{с}.$$

7. Расход газа на один вентиляционный канал:

$$V_k := \frac{V}{(n_{\text{п}} - 1)};$$

$$V_k = 3.223 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с};$$

8. Скорость газа в зоне зубцового слоя статора:

$$u_{\text{кп}} := \frac{V_k}{[\pi \cdot (D_1 + h_{\text{п1}}) - Z_1 \cdot b_{\text{п1}}] \cdot b_k};$$

$$u_{\text{кп}} = 9.574 \times 10^{-3} \text{ км/с}.$$

9. Скорость газа в зоне ярма:

$$v_{ка} := \frac{V_k}{\pi \cdot (D_1 + h_{п1}) + h_{a1}} \cdot b_k;$$

$$v_{ка} = 4.468 \times 10^{-3} \text{ м/с.}$$

10. Скорость газа в зоне внешней поверхности ярма принимает $u_1 := 6 \text{ м/с}$.

11. Скорость газа в зазоре при средней аксиальной скорости газа $u_a := 40 \text{ м/с}$:

$$v_R := \pi \cdot 1.075 \cdot 50;$$

$$v_\delta := \sqrt{v_R^2 + u_a^2};$$

$$v_\delta = 173.534 \text{ м/с.}$$

12. Поправочный множитель, учитывающий давление водородной смеси:

$$k_{\alpha H} := 6.31 \cdot p^{0.8};$$

$$k_{\alpha H} = 6.31.$$

13. Коэффициенты теплоотдачи [Вт/(м² · град)]:
в зазоре

$$\alpha_\delta := 22.2 \cdot (1 + 0.125 \cdot v_\delta) \cdot k_{\alpha H};$$

$$\alpha_\delta = 3.179 \times 10^3,$$

в каналах близи зубцовой зоны

$$\alpha_{кп} := 22.2 \cdot (1 + 0.24 \cdot v_{кп}) \cdot k_{\alpha H};$$

$$\alpha_{кп} = 140.404,$$

в каналах в зоне ярма

$$\alpha_{ка} := 22.2 \cdot (1 + 0.24 \cdot v_{ка}) \cdot k_{\alpha H};$$

$$\alpha_{ка} = 140.232,$$

в зоне внешней поверхности ярма

$$\alpha_1 = 22.2 \cdot (1 + 0.24 \cdot v_1) \cdot k_{\alpha H};$$

$$\alpha_1 = 341.8.$$

14. Сопротивление теплоотдачи (град/Вт):
для зазора

$$R'_{\delta\alpha} := \frac{1}{b_{z1} \cdot L_{\text{пак}} \cdot \alpha_{\delta}};$$

$$R'_{\delta\alpha} = 0.325,$$

для зубца в канале

$$R'_{z\alpha} := \frac{1}{2 \cdot b_{z1} \cdot h_{п1} \cdot \alpha_{\text{кп}}};$$

$$R'_{z\alpha} = 0.325,$$

для ярма в канале

$$R'_{p\alpha} := \frac{1}{b_a \cdot h_{a1} \cdot \alpha_{\text{ка}}};$$

$$R'_{p\alpha} = 0.12,$$

для внешней поверхности ярма

$$R'_{o\alpha} := \frac{1}{b_a \cdot L_{\text{пак}} \cdot \alpha_1};$$

$$R'_{o\alpha} = 0.952.$$

15. Сопротивления в схеме замещения (град/Вт):

$$R_{dz} := R'_{dz} + R'_{\delta\alpha}; \quad R_{dz} = 4.233;$$

$$R_{qz} := R'_{qz} + R_{za}; \quad R_{qz} = 6.861;$$

$$R_{da} := R'_{da} + R'_{o\alpha}; \quad R_{da} = 3.366;$$

$$R_{qa} := R'_{qa} + R'_{pa}; \quad R_{qa} = 0.207;$$

$$R_z := \frac{R_{dz} \cdot R_{qz}}{R_{dz} + R_{qz}}; \quad R_z = 2.618;$$

$$R_a := \frac{R_{da} \cdot R_{qa}}{R_{da} + R_{qa}}; \quad R_a = 0.195;$$

$$R_1 := \frac{R_z \cdot R_{za}}{R_z + R_a + R_{za}}; \quad R_1 = 1.812;$$

$$R_2 := \frac{R_a \cdot R_{za}}{R_z + R_a + R_{za}}; \quad R_2 = 0.135;$$

$$R_3 := \frac{R_z \cdot R_a}{R_z + R_a + R_{za}}; \quad R_3 = 0.056.$$

16. Температуропроводность воды (при начальной температуре воздуха в системе охлаждения 60°C):

$$c_p := 1007 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}); \quad \lambda := 0.0288 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град});$$

$$\rho := 1.060 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$a := \frac{\lambda}{(c_p \cdot \rho)}; \quad a = 2.698 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с},$$

критерий Прандтля:

$$v := 15.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$Pr := \frac{v}{a}; \quad Pr = 0.571,$$

периметр отверстия полого проводника:

$$\pi := 2 \cdot (a + b_k); \quad \pi = 0.028 \text{ м};$$

гидравлический диаметр:

$$S := a \cdot b_k;$$

$$d := 4 \cdot \frac{S}{\Pi}; \quad d = 5.386 \times 10^{-5} \text{ м};$$

критерий Рейнольдса при скорости воды в каналах 2 м/с:

$$Re := \frac{2 \cdot d}{\nu}; \quad Re = 6.995;$$

коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_B := 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4};$$

$$\alpha_B = 45.587 \text{ Вт/м}^2 \text{ град},$$

сопротивление теплоотдачи в каналах обмотки статора:

$$R_{B\alpha} := \frac{1}{\Pi_B \cdot L_{\text{пак}} \cdot \alpha_B};$$

$$R_{B\alpha} = 0.078 \text{ град/Вт}.$$

16. Поток теплоты от зубцов к меди при подогреве воздуха на 25°C
 $\theta_B := 25$.

$$q_{zm} := \frac{q_z \cdot (R_1 + R_3) + q_a \cdot R_3 - q_M \cdot R_{B\alpha} - \theta_B}{R_{\text{и}} + R_1 + R_3 + R_{B\alpha}};$$

$$q_{zm} = 1.605 \text{ Вт}.$$

17. Перегревы:
зубцов

$$\theta_z := q_{zm} \cdot (R_{\text{и}} + R_{B\alpha}) + q_M \cdot R_{B\alpha} + \theta_B + \frac{1}{2} \cdot \theta_r;$$

$$\theta_z = 72.254^\circ\text{C},$$

меди обмотки

$$\theta_M := (q_{zm} + q_M) \cdot R_{B\alpha} + \theta_B + \frac{1}{2} \cdot \theta_r;$$

$$\theta_M = 38.275^\circ\text{C},$$

стали ярма

$$\theta_B := q_a \cdot (R_2 + R_3) + (q_z - q_{zm}) \cdot R_3 + \frac{1}{2} \cdot \theta_r \cdot \theta_a = 20.708^\circ\text{C}.$$

Разность температур между медью и сталью зубцов статора $38.275 - 20.708 = 17.567^\circ\text{C}$, что значительно ниже допустимого значения. Оценка температуры меди ротора.

18. Окружная скорость на поверхности ротора:

$$v_2 := \pi \cdot D_2 \cdot \frac{n}{60}; \quad v_2 = 157.08 \text{ м/с}.$$

Скорость газа в каналах охлаждения ротора принимаем равной 0.4 от скорости на поверхности ротора, т. е. $0.4 \cdot 157.08 = 62.832 \text{ м/с}$.

19. Гидравлический диаметр каналов:

$$d := \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)}; \quad d = 5.393 \times 10^{-5} \text{ м}.$$

20. Находим коэффициент теплоотдачи, температуропроводность водяной смеси при 60°C :

$$a := \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}; \quad a = 2.698 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с},$$

критерий Прандтля

$$\nu := 15.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$Pr := \frac{\nu}{a}; \quad Pr = 0.571,$$

критерий Рейнольдса при скорости воды в каналах 2 м/с

$$Re := \frac{62.832 \cdot d}{\nu}; \quad Re = 220.025,$$

коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_2 := 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4};$$

$$\alpha_2 = 734.297 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \text{ град}).$$

21. Общая площадь каналов на половине длины отсека:

$$S_k := n_{\pi} \cdot h \cdot (2 \cdot a + b); \quad S_k = 0.715 \text{ м}^2.$$

22. Сопротивление теплоотдачи:

$$R_{\alpha 2} := \frac{1}{S_k \cdot \alpha_2}; \quad R_{\alpha 2} = 1.905 \times 10^{-3} \text{ град}/\text{Вт}.$$

23. Мощность потерь, выделяемых на расчетном участке длины ротора, $1_{\text{отс}} := 0.52$.

$$q_2 := \frac{P_{2\text{н}} \cdot 1_{\text{отс}}}{2 \cdot Z_2 \cdot (L_2 + L_{л2})};$$

$$q_2 = 170.706 \text{ Вт}.$$

24. Перегрев меди обмотки ротора:

$$\theta_{\text{м2}} := q_2 \cdot R_{\alpha 2} + \frac{1}{2} \cdot \theta_r;$$

$$\theta_{\text{м2}} = 12.825^\circ\text{C}.$$

3 Механический расчет

1. Угол между осями зубца и паза:

$$\gamma := \frac{180}{Z'_2}; \quad \gamma = 3.75 \text{ град}.$$

2. Диаметр по основанию клина:

$$h_{2k} := 0;$$

$$D_{\text{кл}} := D_2 - 2 \cdot (h_{\text{кл2}} + h_{2k}); \quad D_{\text{кл}} = 0.938 \text{ м}.$$

3. Диаметр по дну паза:

$$D_{\pi} := D_2 - 2 \cdot h_{\pi 2}; \quad D_{\pi} = 0.668 \text{ м}.$$

4. Шаг по верху зубцов:

$$t := \pi \cdot \frac{D_2}{Z'_2}; \quad t = 0.065 \text{ м.}$$

5. Шаг по основанию клина:

$$t_k := \pi \cdot \frac{D_{\text{кл}}}{Z'_2}; \quad t_k = 0.061 \text{ м.}$$

6. Шаг по дну паза:

$$t_{\text{п}} := \pi \cdot \frac{D_{\text{п}}}{Z'_2}; \quad t_{\text{п}} = 0.044 \text{ м.}$$

7. Размеры зубца на трех уровнях:

$$b_{z1} := t_{\text{п}} - b_{\text{п}2}; \quad b_{z1} = 0.012 \text{ м;}$$

$$b_{\text{кл}} := 0.0432;$$

$$b_{z2} := t_k - b_{\text{кл}}; \quad b_{z2} = 0.018 \text{ м;}$$

$$b_{z3} := t - b_{\text{п}2}; \quad b_{z3} = 0.034 \text{ м.}$$

8. Радиусы центров тяжести:

Меди и изоляции:

$$h_{\text{икл}} := 0.01;$$

$$R_{\text{м}} := \frac{1}{2} \cdot [D_2(h_{\text{п}2} + h_{\text{кл}2} + h_{2k} + h_{\text{икл}})];$$

$$R_{\text{м}} = 0.396 \text{ м.}$$

Клина:

$$R_{\text{к}} := \frac{1}{2} \cdot [D_2 - (2 \cdot h_{2k} + h_{\text{кл}2})];$$

$$R_{\text{к}} = 0.484.$$

Головки зубца:

$$R_r := \frac{1}{2} \cdot [D_2 - (h_{2k} + h_{кл2})];$$

$$R_r := 0.484.$$

Зубца с головкой:

$$R_{zr} := \frac{D_2}{2} - \frac{(b_{z3} + 2 \cdot b_{z1})}{3 \cdot (b_{z3} + b_{z1})};$$

$$R_{zr} = 0.078.$$

9. Массы материалов:

площадь сечения меди в пазу ротора (проводник выполнен из двух элементарных):

$$F_M := a_1 \cdot b_2 \cdot u_{п2}; \quad F_M = 8.4 \times 10^{-4} \text{ м}^2,$$

масса меди в пазу

$$G_M := 8.9 \cdot 10^3 \cdot F_M; \quad G_M = 7.476 \text{ кг},$$

масса изоляции в пазу

$$G_{и} := [b_{п2} \cdot (h_{п2} - h_{кл2} - h_{к2})];$$

$$G_{и} = 4.212 \times 10^{-3} \text{ кг},$$

масса головки зубца:

$$G_r := b_{z3} \cdot (h_{кл2} + h_{2k}); \quad G_r = 1.069 \times 10^{-3},$$

масса части клина (дюралюминиевого), соответствующей ширине паза

$$G_k := h_{кл2} \cdot b_{п2} \cdot \gamma_k; \quad G_k = 2.726 \text{ кг},$$

масса зубца, включая головку,

$$G_z := \frac{b_{z3} + b_{z1}}{2} \cdot h_{п2} \cdot 7.85 \cdot 10^3; \quad G_z = 30.493 \text{ кг}.$$

10. Центробежные силы:

Квадрат угловой скорости (разгонной) при частоте вращения $n_p := 3600$ об/мин:

$$\omega_p := \sqrt{1.1 \cdot 10^{-2} \cdot n_p^2}; \quad \omega_p^2 = 1.426 \times 10^5 \text{ с}^{-2}.$$

Центробежные силы меди, изоляции и клина

$$c_1 := \omega_p^2 \cdot [(G_M + G_{И}) \cdot R_M + G_K \cdot R_K];$$

$$c_1 = 6.108 \times 10^5 \text{ Н}.$$

Сила, действующая на зубец $\beta := \frac{\pi}{4}$, $\gamma := \frac{\pi}{48}$)

$$c_2 := c_1 \cdot \frac{\cos(\beta - \gamma)}{\cos(\beta)}; \quad c_2 = 6.495 \times 10^5 \text{ Н}.$$

Сила, действующая на головку зубца

$$c_3 := \omega_p^2 \cdot G_r \cdot R_r; \quad c_3 = 73.793 \text{ Н}.$$

Центробежная сила зубца с головкой

$$c_4 := \omega_p^2 \cdot G_z \cdot R_{zr}; \quad c_4 = 3.372 \times 10^5 \text{ Н}.$$

11. Напряжения:

в сечении зубца на уровне клина

$$\sigma_{z2} := \frac{c_2 + c_3}{b_{z2}}; \quad \sigma_{z2} = 3.576 \times 10^7 \text{ Па},$$

в основании зубца:

$$\sigma_{z1} := \frac{c_2 + c_4}{b_{z2}}; \quad \sigma_{z1} = 5.431 \times 10^7 \text{ Па},$$

на периферии бочки ротора за счет внешней нагрузки:

$$\sigma_{6z} := \frac{c_2 + c_4}{t_{\Pi}}; \quad \sigma_{6z} = 2.258 \times 10^7 \text{ Па},$$

на периферии бочки ротора за счет собственной массы:

$$\sigma_{6p} := 7.85 \cdot 10^3 \cdot \omega_p^2 \cdot (0.5 \cdot D_{\Pi})^2; \quad \sigma_{6p} = 1.247 \times 10^8 \text{ Па},$$

отношение диаметра отверстия в теле бочки ротора к диаметру по дну пазов:

$$\alpha := \frac{D_0}{D_{\Pi}}; \quad \alpha = 0.18,$$

коэффициенты напряжений:

$$k := \frac{2}{(1 - \alpha^2)}; \quad k = 2.067,$$

$$T_1 := 0.825 \cdot (1 + 0.212 \cdot \alpha^2); \quad T_1 = 0.831,$$

тангенциальные напряжения на поверхности внутреннего отверстия ротора:

$$\sigma_0 := k \cdot \sigma_{\sigma z} + T_1 \cdot \sigma_{\sigma p}; \quad \sigma_0 = 1.502 \times 10^8 \text{ Па.}$$

3.1 Расчет напряжений в клине

12. Задаемся размерами клина по высоте:

$$h_{к0} := 0.012; \quad h_{к1} := 0.006; \quad h_{к2} := 0.013.$$

Находим:

$$\varepsilon_1 := \frac{h_{к1}}{(h_{к1} + h_{к2})}; \quad \varepsilon_1 = 0.316.$$

По значению ε_1 и углу $\beta := 45^\circ$ находим $B_1 := 0.537$.

13. Коэффициент ослабления клина:

$$k_{\text{осл}} := \frac{0.7 \cdot 1}{1 - 2 \cdot L_k}; \quad k_{\text{осл}} = 1.23,$$

где шаг вентиляционных отверстий в клине равен $1 \equiv 0.0743$ м при размере отверстий по оси ротора $L_k \equiv 0.016$ м.

14. Максимальное напряжение в хвосте клина с учетом ослабления вентиляционными отверстиями:

$$\sigma_{кx} := B_1 \cdot \frac{c_1}{h_{к1} + h_{к2}} \cdot k_{\text{осл}}; \quad \sigma_{кx} = 2.123 \times 10^7 \text{ Па.}$$

Находим размер D:

$$D := 3 \cdot b_{п2} + 3 \cdot h_{к1} \cdot \cos\left(\frac{\beta \cdot \pi}{180}\right) + (4 \cdot h_{к0} + h_{к1} - 2 \cdot h_{к2}) \cdot \tan\left[\frac{(\beta - 8) \cdot \pi}{180}\right] - 1.5 \cdot b_2;$$

$$D = 0.091 \text{ м.}$$

Напряжения в середине клина с учетом ослабления:

$$\sigma_{к0} := D \cdot \frac{c_1}{2 \cdot h_{кл2}^2} \cdot K_{осл}; \quad \sigma_{к0} = 3.499 \times 10^7 \text{ Па.}$$

Коэффициенты запаса:

для клина

$$\sigma_{тк} := 32 \cdot 10^7 \text{ Па;}$$

$$k_{зк} := \frac{\sigma_{тк}}{\sigma_{к0}}; \quad k_{зк} = 9.146,$$

для зубца

$$\sigma_{TZ} := 60 \cdot 10^7;$$

$$k_{зз} := \frac{\sigma_{TZ}}{\sigma_{z1}}; \quad k_{зз} = 11.047,$$

для бочки ротора:

$$\sigma_{тб} := 60 \cdot 10^7;$$

$$k_{зб} := \frac{\sigma_{тб}}{\sigma_0}; \quad k_{зб} = 3.993.$$

3.2 Оценка напряжений в бандаже

Размеры бандажа: внешний диаметр $D_{бк} := 1.14$ м, внутренний диаметр $D_{б0} := 0.983$ м, длина бандажа $l_{бк} := 0.6$ м, средний вылет лобовой части обмотки возбуждения $l_0 := 0.3$ м.

15. Отношение внешнего диаметра ко внутреннему:

$$\alpha := \frac{D_{б0}}{D_{бк}}; \quad \alpha = 0.862.$$

16. Квадрат линейной скорости на среднем диаметре бандажа:

$$v_6 := 0.0625 \cdot \omega_p^2 \cdot (D_{60} + D_{6к})^2; \quad v_6 = 4.016 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

17. Напряжения в бандаже от собственной массы:

$$\sigma_{66} := 6.47 \cdot 10^3 \cdot v_6^2 \cdot (1 + 0.212 \cdot \alpha^2); \quad \sigma_{66} = 1.208 \times 10^3 \text{ Па.}$$

18. Площадь сечения бандажа:

$$S_6 := 1_{6к} \cdot 0.5 \cdot (D_{6к} - D_{60}); \quad S_6 = 0.047 \text{ м}^2.$$

19. Средняя длина лобовой части обмотки возбуждения:

$$1_{л2} := 2 \cdot 1_0 + 0.785 \cdot (D_{п} + h_{21}) \cdot \left(2 - \frac{Z_2}{Z'_2}\right);$$

$$1_{л2} = 1.378 \text{ м.}$$

Масса меди лобовой части обмотки возбуждения:

$$G_{л} := 5450 \cdot a_2 \cdot b_2 \cdot 1_{л2} \cdot u_{п2} \cdot Z_2; \quad G_{л} = 908.249 \text{ кг.}$$

20. Центробежная сила лобовой части:

$$F_{л} := G_{л} \cdot \omega_p^2 \cdot (D_{п} + h_{21}) \cdot 0.5; \quad F_{л} = 5.131 \times 10^7 \text{ Н.}$$

21. Напряжения от давления лобовых частей:

$$\sigma_{6л} := \frac{F_{л}}{2 \cdot \pi \cdot S_6}; \quad \sigma_{6л} := 1.734 \times 10^8 \text{ Па.}$$

22. Суммарные напряжения в бандаже:

$$\sigma_6 := \sigma_{66} + \sigma_{6л}; \quad \sigma_6 = 1.208 \times 10^{13} \text{ Па.}$$

23. Коэффициент запаса при пределе текучести бандажа $\sigma_{6т} := 90 \cdot 10^7$:

$$k_{з6} := \frac{\sigma_{6т}}{\sigma_6}; \quad k_{з6} = 7.451 \times 10^{-5}.$$

3.3 Оценка критических частот

24. Вес ротора:

$$P_p := 9.81 \cdot G_p; \quad P_p = 2.728 \times 10^5 \text{ Н.}$$

25. Момент инерции:

где

$$a := \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{Z_2 \cdot \pi}{Z'_2}\right)}{Z_2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z'_2}\right)}; \quad a = 0.301;$$

$$J_p := \frac{\pi \cdot (D_2^2 - D_0^2)}{64} - \frac{Z_2 \cdot b_{п2} \cdot h_{п2}}{8} \cdot (D_2 - h_{п2})^2 \cdot (1 - a);$$
$$J_p = 0.037 \text{ м}^4.$$

26. Прогиб ротора от собственного веса $E := 2.2 \cdot 10^{11}$:

$$f_p := \frac{p_p \cdot 1_p^3}{48 \cdot E \cdot J_p}; \quad f_p = 6.565 \times 10^{-4} \text{ м,}$$

Здесь длина ротора между центрами подшипников $1_p = 9.8$ м взята из чертежа.

27. Критическая частота вращения (первая):

$$n_{k1} := \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{9.81}{f_p}}; \quad n_{k1} = 1.167 \times 10^3 \text{ об/мин.}$$

Вторая критическая частота:

$$n_{k2} := 3.50 \cdot n_{k1}; \quad n_{k2} = 4.086 \times 10^3 \text{ об/мин.}$$

Обе частоты более чем на 20% отличаются от основной частоты 300 об/мин.

4 Технология изготовления полиимидной статорной изоляции

4.1 Полиимидная статорная изоляция

Полиимиды обладают высокой термостойкостью и термостойкостью, химической стойкостью к действию агрессивных реагентов, устойчивостью к облучению, хорошей электроизоляционной способностью, что приводит к их практическому значению в сочетании с физиологической безвредностью в рабочих условиях. Они могут производить высокопрочных термостойких покрытий, пленок, волокон, лаков, клеев.

Степень наполнения канав проволокой или пленкой при использовании полиимидной пленки в качестве изоляции канав электрических машин позволила увеличить скорость использования активных материалов и улучшить теплоотделение и уменьшить толщину изоляции.

Срок службы проволоки полиимидной изоляции и пленок при 250°C превышает две тысячи часов и более шестисот часов при 257°C соответственно. Большое преимущество полиимидных изоляционных проводов и пленок — их огнестойкость. Использование их для изоляции спирали и изоляции сердечника обеспечивает большую мощность в той же массе и размерах.

При производстве полиимидных пленок с ароматической структурой сложность образования толстой пленки возникает до 200 мкм, поэтому обычно получают многослойные пленки. В свою очередь, полиимиды алициклической структуры обладают хорошими свойствами фильма, которые позволяют формировать фильмы различной толщины в диапазоне от 2 до 200 мкм, которые связаны с использованием полимеров уже сформированными имидными циклами, что облегчает технологию производства пленочных материалов в декаде.

При необходимости материал достаточной толщины, обеспечивающий необходимые электроизоляционные свойства пленок этой толщины, проявляет особый интерес к декомпозиции фундамента, межфазной и желобовой изоляции.

При проектировании изоляции корпуса на основе полиимидно-фторпластических пленок, отвечающих рабочим требованиям электрических машин, необходимо обеспечить следующие условия:

- монолитность изоляции от достижения высоких физических и механических и электрических параметров;
- хорошая изоляционная адгезия на провода должна гарантировать высокую изоляционную эластичность и многократную виброустойчивость в сочетании с исходным требованием;
- способность покрытия поверхности изоляции к пропитанным или цементировочным составам.

Эти проблемы могут быть решены как с двусторонней, так и односторонней изоляцией стержней из полиимидно-фторпластической

пленки, что может обеспечить надежную сварку этих пленок при термообработке.

В этом случае двухсторонняя пленка применяется непосредственно на стержне, а односторонняя - внутри наружного слоя применяется изоляция фторопластом, наружный полиимид.

Из-за покрытия фторопласта пленка сваривается между собой и приклеивается к проволоке, а декомпозиция корпуса из чистого полиимида сохраняет способность цементировать в упаковке.

4.2 Технология изготовления полиимидной статорной изоляции

Комбинированная термостойкая пленка достигается на основе алициклической структурной полимер - пленки толщиной 40-200 мкм с двусторонним покрытием толщиной 10 мкм в сторону сополимера тетрафторэтилена и гексафторпропилена ПИ_{АБ+ДАДФЭ}.

Для получения этих пленок полиимидная пленка помещается в воду в пятикратное превышение фторопластов, после чего просушивается воздухом при комнатной температуре для удаления влаги в течение двадцати минут. Ранее этот фильм получил бренд планшета Bang.

Декабрь проводился при установке двух смежных пленок с односторонним подогревом декадентного сварочного материала, сварочным электродом в температурном диапазоне от 180 до 400°C, с периодичностью от пяти до сорока секунд и давлением от 0,5 до 5 кгс/см³. Следующий оптимальный режим: температура сварки-250-260 ° С, время сварки двух пленок толщиной 40 мкм-каждые двадцать секунд, толщина 200 мкм-сто пятьдесят секунд. В обоих случаях давление считалось 2 кг/см².

При проведении испытаний на макетах - медные шины сечением 60x30 мм было принято 10 слоев по 200 мкм толщиной и 190 мкм слои фторопласта между пленками. Изолирование проводилось в 1/2 нахлеста. Толщина изоляции после термопрессования составила 2,19 мм на сторону. При температуре прогрева 260°C монолитное покрытие хорошего качества получилось при времени двенадцать- четырнадцать минут.

Пленки ПИФ_{АБ}, сваренные по такому режиму, имеют прочность нахлесточных сварных соединений, равную ~ 100% прочности пленки.

В таблице 4.1 приведены данные электрофизических характеристик пленки ПИФ_{АБ}.

Таблица 4.1 - Электрофизические характеристики пленки ПИФ_{АБ}

| Электрофизические характеристики | Значения |
|--|---------------------|
| Удельное объемное сопротивление, Ом · м | $2.1 \cdot 10^{16}$ |
| Удельное поверхностное сопротивление, Ом · м | $2.2 \cdot 10^{15}$ |

| | |
|---|-----------|
| Электрическая прочность, МВ/м | 200 – 220 |
| Диэлектрическая проницаемость при 50 Гц | 1.8 – 2.1 |

Продолжение таблицы 4.1

| | |
|---|------------------------|
| Тангенс угла диэлектрических потерь | 0.0003 |
| Предел прочности при растяжении, МПа | 180 – 200 |
| Относительное удлинение при разрыве, % | 45 |
| Адгезионная прочность, Н/м | 240 |
| Модуль упругости, МПа | 3400 |
| Коэффициент теплопроводности, Дж · м/м ² · с · К | 0.142 |
| Удельная теплоемкость, Дж/кг · К | 1.01 · 10 ³ |
| Влагопоглощение, %, при 25°С: | 1.1 |
| при 50% относительной влажности в воде | 2.2 |

4.3 Технология получения полиимидно-фторпластовой пленочной изоляции стержней

По иностранным данным [14], [15], [16] в настоящее время основное применение полиимидно-фторпластической пленки на основе ароматических диангидридов является электрической изоляцией электрических машин, силовых кабелей и проводов большого сечения, работающих в чрезвычайных ситуациях.

Упаковка такого вида пленки может быть продана на традиционном оборудовании или вручную с помощью спиральной обмотки лент и продольного покрытия лент. Основная масса обмоток построена в соответствии с принципом вращения роликов или катушек с пленкой вокруг передвижной трансмиссивной катушки или стержня, например, когда она изолирована тепловой реактивной изоляцией. Наиболее важной частью ленточных упаковочных машин является упаковка, которая в основном обеспечивает качество пленочного изоляционного покрытия. Для изоляции изоляционных стержней, преимущественно из полимерной пленки, применяются обмотки косвенного или полуприцепного типа.

В последнее время на плоских участках катушек и стержней большое внимание уделяется технологии продольного покрытия изоляции ленты. Это связано с высокой производительностью продольных покрытий пленочной изоляции, отсутствием вращающихся узлов, простотой прикладного технологического оборудования.

На основе лент из полиимидно-фторпластических пленок применяется монолитный и герметичный процесс термообработки изоляции.

Традиционным методом термической обработки является обеспечение наружного тепла, как муфельные печи путем конвективного радиационного теплообмена.

Термическая обработка инсайера с нагревом проводных вен индукцией ожидается токами высокой частоты в поперечном магнитном поле индуктора цикла. В этом случае на петли с водяным охлаждением индуктор подается на напряжение 66 кГц. Для достижения изоляции монолитной пленки из полиимидно-фторпластических лент допускается применение комбинированного отопления.

Поскольку технология изоляции пленочных ленточных проволок аналогична изоляции стержней, основой для изоляции стержней электрических машин для перестановки данной технологии является толстая изоляция стержней и отличие от режима изоляции и замены печей.

В существующей полуавтоматической линии для производства теплостойких обмоточных проводов с пленочной изоляцией [17], можно совместить операции обмотки токопроводящей жилы лентами полиимидно-фторопластовой пленки и их термообработки с целью получения монолитной изоляции. Изоляция состоит из одной или двух пленок, при применении двух пленок одинаковой ширины накладывается в одну или другую сторону с одинаковым коэффициентом покрытия. Есть даже две центральные моталки. Комбинированный метод нагрева используется для термической обработки проволоки. Для улучшения условий сварки пленки и достижения монолитной изоляции линия оснащена резиновыми зажимными роликами, выполняющими изоляцию отжима стержня в процессе термообработки для малых и больших сторон стержня. Для предотвращения прилипания изоляции в термопластических условиях вытяжное устройство использует водяное охлаждение. Не более одной минуты при скорости производства 3-4 м/мин от момента закрытия пленки до момента термообработки [17].

Длина стержня составляет около 15 м (для нашего турбогенератора) при температуре 260°C, толщина для двухслойной пленки составляет 200 мкм, необходимое для сварки время составляет два с половиной минуты (сто пятьдесят секунд).

Для достижения наружной изоляции корпуса толщиной 3 мм требуется фторопластом толщиной 10 мкм с двухсторонним покрытием толщиной, с четырнадцатью слоями полиимидной пленки толщиной 200 мкм и односторонним покрытием толщиной 10 мкм. Время изготовления такой изоляции составляет приблизительно тридцать пять-тридцать семь с половиной минут.

В этом случае не требуется водяное охлаждение, так как наружный изоляционный слой не покрывается фторопластом, а значит -нет слипания изоляции к деталям станка.

4.4 Цементация стержней при изолировании полиимидно-фторопластовыми пленками

Цементирование ядра турбогенератора при изоляции полиимидно-фторопластических пленок может производиться как при изоляции стекловолокном лентами, эпоксидными соединениями или сополимерами. В этом случае технология цементирования сердечника предполагает цементирование сердечника, подобного термореактивной изоляции.

Медные изолированные медные шины, изолированные полиимидно-фторопластическими пленками, изготавливают смесь ЭД-20 с любым амином, наиболее распространенным триэтиламин, прежде всего, с прошивающим агентом в десяти соотношениях.

Эта смесь поддерживается при комнатной температуре в течение тридцати пяти-сорока минут для начала перекрестной реакции с триэтиламин олигомером макромолекулой. Эта смесь затем погружается в образцы. Толщина полиимидно-фторопластических пленок составляет от 45-50 до 100-200 мкм. декомпозиция полиимидно-фторопластических пленок

Пропитанные образцы первоначально хранятся при комнатной температуре в течение 20-25 минут.

Затем плотно прижимаются друг к другу и получают пакет. Этот пакет помещают под нагрузку 0.2 кг/см^2 и выдерживают при температуре $25-40^\circ\text{C}$ течение пятнадцати часов. или $60-70^\circ \text{C}$ в течение трех-четырёх часов. Контроль завершения реакции осуществляется по ИК-спектрам образцов, в которых отсутствуют полосы, характерные для амидокислотных и оксиановых групп.

Преимущества полиимидной изоляции:

1) в отличие от изоляции в термореактивных связях, они, конечно, могут быть включены в полиимидно-фторопластическую пленку на эпоксидном связующем пластификат, который, безусловно, не подвергается пластической деформации в процессе упаковки в твердую и канавку, например, трифенилфосфат, дающий пластическую изоляцию монолитного.

2) так что, прежде чем правильно изолировать геометрическую форму, тоже не нужно добавлять планку.

3) производственный процесс вторичной пластической изоляции полиимидно-ф не сопровождается высвобождением токсичных газов и не требует герметически закрытого оборудования.

Полиимидная изоляция чрезвычайно стойка к тепловому удару. Она не растрескивается на местах изгиба проводников при резком нагреве до 500 C и при отрицательных температурах вплоть до -195 C . Изоляция обладает хорошей сплошностью: сплошность полиимидной эмаль-пленки на проводе, изогнутом вокруг стержня диаметром, равным диаметру провода, не нарушается при тепловом ударе до 400 C .

Полиимидная пленка показывают хорошую стойкость термостойкость, соответствуют высоким показателям электроизоляционных характеристик с отличными механическими свойствами на сегодняшний день.

5 Безопасность жизнедеятельности

5.1 Анализ уровня шума турбогенератора

В турбинном цеху расположены три турбогенератора, которые являются источниками шума. Источники шума расположены на расстоянии $r_1 = 7$ м; $r_2 = 12$ м; $r_3 = 18$ м; от расчетной точки, которая расположена на высоте 1,5 м от пола. Расположение турбогенераторов в цеху изображено на рисунке 6.2.

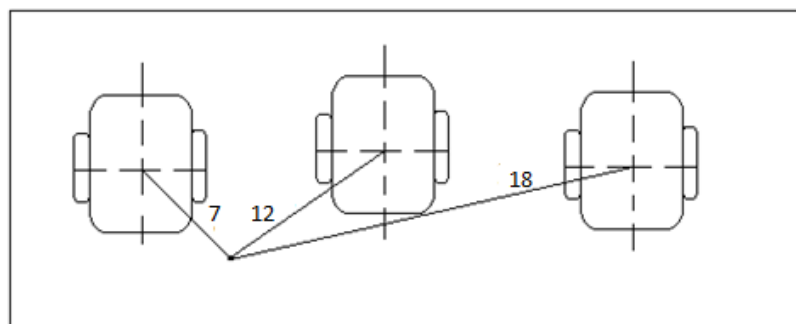


Рисунок 5.1 – Нахождение расчетных точек турбогенераторов

3 источника шума одного типа расположены в турбинном помещении, объем которого составляет 14400 м^3 . Уровни звуковой мощности турбогенераторов приведены в таблице.

Таблица 5.1 – Уровень звуковой мощности гидрогенераторов

| Величина, дБ | Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц. | | | | | | | |
|-----------------|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| L_{p1} | 94 | 88 | 83 | 79 | 76 | 74 | 71 | 70 |

Максимальный размер любого рассматриваемого источника не превышает $L_{\text{max}} = 1,4$ м.

Для последующего определения уровня шума в помещении применяется приведенная формула.

$$L = 10 \lg \left(\sum_{i=0}^m \frac{\Delta_i \cdot \chi_i \cdot \Phi_i}{S_i} + \frac{4\psi}{B} \sum_{i=0}^n \Delta_i \right) \quad (5.1)$$

где $\Delta_i = 10^{0,1L_{pi}}$;

m – число источников шума, близких к расчетной точке ($r_i < 3 r_{\text{min}}$);

n – суммарное число источников шума в помещении.

В данном случае минимальное расстояние от расчетной точки до акустического центра и ближайшего к ней источника $r_{\text{min}} = 7$ м, $3 \cdot r = 21$ м.

Общее число источников шума, берущихся в расчет и расположенных близко к расчетной точке, будет равняться 3.

χ - коэффициент, учитывающий влияние ближайшего акустического поля и принимаемый в зависимости от отношения r_i/l_{\max} ;

l_{\max} – больший физический размер из числа источников шума.

Величина $r_i/l_{\max} = 7/1,4 = 5 \Rightarrow$ принимаем $\chi = 1$.

lg – Коэффициент направленности источника шума, определяется по экспериментальным данным;

Φ – фактор направленности источника шума;

S – площадь воображаемой поверхности, имеющий правильную геометрическую форму, окружающей источник и проходящей через расчетную точку.

Для всех источников выполняется условие:

$$\begin{aligned} 2 \cdot l_{\max} < r; \\ 2 \cdot 1,4 \text{ м} < 8 \text{ м}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Вследствие этого можно принять $S_i = 2 \pi r_i^2$;

ψ – значение, учитывающее нарушение диффузности акустического поля в помещении.

V – постоянная помещения.

$$V = V_{1000} \cdot \mu, \quad (5.3)$$

где V_{1000} – постоянная величина помещения на значении среднегеометрической частоты 1000 Гц;

μ – частотный множитель;

Из таблицы выбираем тип помещения, определяем постоянную помещения V_{1000} ; Выбираем тип помещения I – с небольшим количеством людей (металлообрабатывающие цехи, вентиляционные камеры, машинные залы, генераторные, испытательные стенды), при котором значение k равно 20.

$$\begin{aligned} V_{1000} &= V/k_1 \\ V_{1000} &= \frac{V}{20} = \frac{14400}{20} = 720. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Таблица 5.2 – Значения частотного множителя μ

| Частотные множители μ в октавных полосах с средне геометрическими частотами, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|---|-----|-----|------|-----|------|------|------|------|
| $V > 1000$ | 0,5 | 0,5 | 0,55 | 0,7 | 1 | 1,6 | 3 | 6 |

Приведем значения частотного множителя μ в таблицу 5.2 для помещения, объем которого составляет 14400м^3 .

Общее количество принимаемых в расчет источников шума расположенных вблизи расчетной точки, для которых $\gamma_i < 3\gamma_{\min}$.

Таблица 5.3 – Допустимые уровни звукового давления для турбинного помещения

| № | Величина | Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц | | | | | | | |
|----|---------------------------------|--|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| 1 | L_{p1} | 92 | 86 | 81 | 77 | 74 | 72 | 69 | 68 |
| 2 | $\Delta_1=10^{0.1L_{p1}}$ | $16 \cdot 10^8$ | $4 \cdot 10^8$ | $1.2 \cdot 10^8$ | $5 \cdot 10^7$ | $2.5 \cdot 10^7$ | $1.6 \cdot 10^7$ | $8 \cdot 10^6$ | $6.3 \cdot 10^6$ |
| 3 | S | 25,12 | 25,12 | 25,12 | 25,12 | 25,12 | 25,12 | 25,12 | 25,12 |
| 4 | $10^{0.1L_{p1}}/S$ | $6.3 \cdot 10^6$ | $1.5 \cdot 10^6$ | $4 \cdot 10^5$ | $1.9 \cdot 10^5$ | $9 \cdot 10^4$ | $6 \cdot 10^4$ | $3 \cdot 10^3$ | $2.5 \cdot 10^3$ |
| 5 | B_{1000} | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 13,3 |
| 6 | μ | 0,65 | 0,62 | 0,64 | 0,75 | 1,5 | 2,4 | 4,2 | 7,8 |
| 7 | B | 8,6 | 8,2 | 8,5 | 10 | 20 | 32 | 56 | 104 |
| 8 | $4\psi/B$ | 0,32 | 0,34 | 0,33 | 0,28 | 0,14 | 0,08 | 0,05 | 0,02 |
| 9 | Строки 8*2 | $5 \cdot 10^8$ | $1.4 \cdot 10^8$ | $0.4 \cdot 10^8$ | $1.4 \cdot 10^7$ | $3.5 \cdot 10^6$ | $1 \cdot 10^6$ | $4 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^5$ |
| 10 | Строки 4+9 | $5.06 \cdot 10^8$ | $1.42 \cdot 10^8$ | $4 \cdot 10^7$ | $1.4 \cdot 10^7$ | $3.5 \cdot 10^6$ | $1.1 \cdot 10^6$ | $4 \cdot 10^5$ | $1.02 \cdot 10^5$ |
| 11 | $L=10\lg(\text{строки } 10)$ | 87 | 82 | 76 | 72 | 65 | 60 | 56 | 50 |
| 12 | B | 360 | 360 | 396 | 504 | 720 | 1152 | 2160 | 4320 |
| 13 | $4\psi/B$ | $11 \cdot 10^{-2}$ | $11 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-2}$ | $8 \cdot 10^{-3}$ | $5.5 \cdot 10^{-3}$ | $3.4 \cdot 10^{-3}$ | $1.8 \cdot 10^{-3}$ | $9.2 \cdot 10^{-4}$ |
| 14 | $3 \cdot 10^{0.1 \cdot L_{p1}}$ | $48 \cdot 10^8$ | $12 \cdot 10^8$ | $3.6 \cdot 10^8$ | $15 \cdot 10^7$ | $7.5 \cdot 10^7$ | $4.8 \cdot 10^7$ | $24 \cdot 10^6$ | $18.9 \cdot 10^6$ |
| 15 | Строки 13*14 | $5.28 \cdot 10^8$ | $1.32 \cdot 10^8$ | $3.6 \cdot 10^6$ | $1.2 \cdot 10^6$ | $4.1 \cdot 10^5$ | $1.6 \cdot 10^5$ | $4.2 \cdot 10^4$ | $1.73 \cdot 10^4$ |
| 16 | Строки 9+15 | $5.3 \cdot 10^8$ | $1.34 \cdot 10^8$ | $4.2 \cdot 10^6$ | $1.32 \cdot 10^6$ | $5.3 \cdot 10^5$ | $2.37 \cdot 10^5$ | $8.1 \cdot 10^4$ | $4.73 \cdot 10^4$ |
| 17 | $L_{\text{доп}}=L_H$ | 92 | 86 | 81 | 77 | 74 | 72 | 69 | 68 |
| 18 | $\Delta L_{\text{тр общ}}$ | - | - | - | - | - | - | - | - |

Определяем требуемое снижение шума ΔL_{TP} , приняв нормативные уровни звукового давления в расчетной точке .

Рабочие места – постоянные рабочие места и рабочие зоны в производственных помещениях и на территории предприятий.

$$\Delta L_{TP} = L_{\text{общ}} - L_{\text{доп}}, \text{ дБ}, \quad (5.5)$$

где $L_{\text{общ}}$ – октавный уровень звукового давления в расчетной точке от всех источников шума, дБ.

$L_{\text{доп}}$ – указаны в таблице 5.3

Из расчета видно, что уровни звукового давления в расчетной точке не превышают нормативного.

5.2 Разработка мер электрической безопасности турбогенератора

Для безопасности при эксплуатации электрооборудования, оборудования и электроустановок необходимо принять ряд организационных и технических мер для защиты людей от поражения электрическим током.

Система этих мер включает следующие мероприятия:

- Меры предосторожности для организации работы и бесперебойной работы электрооборудования в соответствии с инструкциями и правилами;
- Техническое описание деятельности;
- Организационные мероприятия, в том числе административные;
- Обеспечение персонала средствами электрозащиты.

Корпоративные требования к электробезопасности

В организации управления всеми видами электротехники (т. е. в каждой организации) содержание должно быть надлежащим образом представлено. Ответственность за это является инженером по безопасности труда или специалистом, выполняющим функции безопасности труда.

Работа этого оборудования должна выполняться в соответствии с инструкциями, правилами и правилами безопасности, требованиями безопасности труда и другими документами. Техническое обслуживание, ремонт, профилактические испытания, техническое обслуживание и другие виды должны своевременно проходить и обеспечивать бесперебойную работу.

Допускается лицам, имеющим группу электробезопасности, необходимую для работы на электрооборудовании, прошедшим медицинский осмотр и не имеющим противопоказаний к состоянию здоровья, по которым были сданы правила эксплуатации и безопасности. Компания не имеет соответствующих инструкций для обучения, безопасности и безопасности труда, а также для разработки всех электрических и неэлектрических работников. Персонал, занятый на электрооборудовании, должен быть снабжен электрозащитой и спецодеждой, а сами электроустановки должны быть оборудованы средствами защиты и всеми необходимыми средствами пожаротушения.

Проверка предприятий на соответствие этим требованиям, чиновники энергонадзора, государственного надзора и другие работы.б. осуществляется.

Организационные меры по обеспечению корпоративной электробезопасности

Мероприятия по предупреждению нанесения вреда людям с электрическим током состоят из фехтования и изоляции любой части электрооборудования и энергетических установок. Он также должен регулироваться с применением небольшого напряжения на возможных предприятиях и в соответствии с необходимыми правилами и правилами. Обязательная мера-заземление или загрязнение всех металлических конструкций и кабелей, а также использование средств индивидуальной и коллективной защиты. Кроме того, организационные мероприятия включают в себя мероприятия, позволяющие специалистам работать с электроэнергией и наблюдением при работе в электроустановках.

Заземление или полирование относятся к следующим конструкциям и элементам:

- металлический корпус технических средств и оборудования;
- электрические приводы;
- вторичные трансформаторы обмотки;
- контрольные щиты, шкафы и т. д. б.;
- мобильные электропроводки и оборудование;
- прочие кабельные и металлические конструкции.

После установки заземления и заделки, при пуске, по крайней мере 1 раз в год и после ремонта должны проходить через набор тестов.

Обеспечение мер электробезопасности на предприятии регламентируется Правилами ПОТ Р О-95120-001-94, межотраслевыми правилами охраны труда, Правилами устройства электроустановок и другими нормативными актами, утвержденными государственными органами.

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

где $X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC)$ - емкостное сопротивление, Ом

Сети с изолированной нейтралью в нормальном режиме сети при равенстве сопротивлений и емкостей фаз относительно земли, что имеет место по условию, ток, протекающий через тело человека, определяется по формуле:

$$I_h = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{X_C}{3}\right)^2}} \quad (5.7)$$

где $X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC)$ - емкостное сопротивление, Ом.

$$I_h = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{800^2 + \left(\frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.5 \cdot 10^{-6} \cdot 3}\right)^2}} = 7,22 \text{ мА.}$$

При аварийном режиме работы сети с *изолированной нейтралью*, когда имеет место замыкание фазы на землю через малое активное сопротивление, ток, протекающий через тело человека, прикоснувшийся к другой фазе, определяется отношением:

$$I_h = \frac{U_H}{R_h + R_{3M}}, \quad (5.8)$$

$$I_h = \frac{5780}{800 + 30} = 696,38 \text{ мА.}$$

Определяем ток проходящей через тело человека при его прикосновении к корпусу электроустановки, в которой произошло замыкание на корпус. Сопротивление фаз относительно земли $r_1 = 53$ Ом, $r_2 = 515$ Ом $r_3 = 490$ Ом. Удельное сопротивление земли равно 230 Ом·м. Человек стоит на расстоянии 15 м от заземлителя. Сопротивление обуви человека принимаем равным 0.

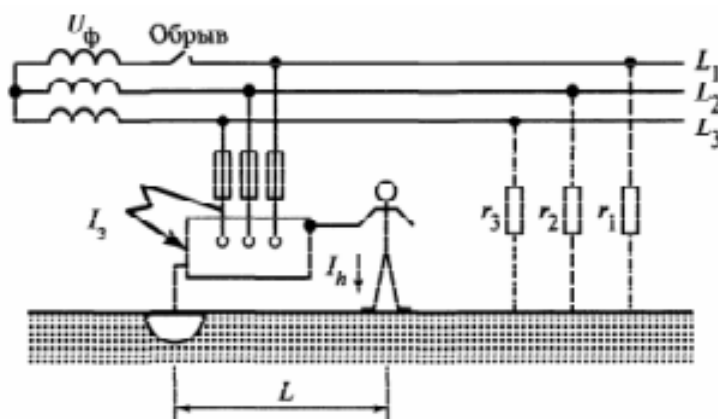


Рисунок 5.2 – Включение в сеть человека через корпус электроустановки, при коротком замыкании на корпус

На рисунке 5.2 представлена схема включения человека в сеть с изолированной нейтралью при коротком замыкании на корпус.

Рассчитываем сопротивление основания, на котором стоит человек по формуле:

$$R_{осн} \cong 1.5 \cdot \rho \cong 1.5 \cdot 230 \cong 345 \text{ Ом.} \quad (5.9)$$

Ток проходящий через сопротивления R_h и r_3 :

$$I_{h-3} = \frac{U_{\text{л}}}{r_2 + R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{10000}{515 + 49,4} = 17,7 \text{ мА.}$$

Напряжение прикосновения определяем по следующей формуле:

$$U_{\text{пр}} = I_{h-3} \cdot R_{\text{ЭКВ}} = 17,7 \cdot 49,4 = 875,2 \text{ В.} \quad (5.10)$$

Ток проходящие через тело человека:

$$I_h = \frac{U_{\text{пр}}}{R_h + R_{\text{очн}}} = \frac{875,2}{800 + 345} = 76,4 \text{ мА.} \quad (5.11)$$

Таблица 5.4 - Результат вычислений

| I _h в ЭУ с изолированной нейтралью, | | |
|--|-----------------|---------------|
| Нормальный режим | Аварийный режим | КЗ на корпус |
| 7,22 мА | 696 мА | 76,4 мА |
| неотпускающий | фибрилляционный | неотпускающий |

Самым опасным является сеть с изолированной нейтралью в аварийном режиме, а наименее опасным – сеть с изолированной нейтралью в нормальном режиме. В связи с опасностью, нам необходимо разработать защитное устройство, а именно контурное заземление.

5.3 Проверочный расчет заземления устройств

Расчет производится для турбогенератора со стороны 10 кВ.

В качестве естественного заземлителя используем систему трос-опоры двух подходящих у подстанции воздушных ЛЭП 35 кВ на металлических опорах.

Расчетный ток замыкания на землю на стороне на стороне 10 кВ, на стороне 10 кВ – 40 А.

Находим сопротивление естественного заземлителя для двух линий R_e :

$$R_e = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{оп}} \cdot 0,15 \cdot l}{s \cdot n}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot 0,15 \cdot 250}{40 \cdot 1}} = 1,67 \text{ Ом.} \quad (5.12)$$

Таблица 5.5 – Исходные данные

| Напряжение установки U , кВ | Форма вертикальных электродов | Размеры вертикальных электродов ℓ , м: d или $\ell_{\text{в.м}}$ | Глубина заложения t_0 , м | Площадь заземлителя, м ² | Удельные сопротивл. верхнего и нижнего слоев земли, Ом·м | Толщина верхнего слоя земли, | Климатическая зона | Тип заземляющего устройства | Длина пролета ЛЭП, м | Сечение троса, мм ² | Сопротивление заземления, Ом | Количество опор на линии |
|-------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------|-------------------------------------|--|------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 35 | Стержень | $\ell=5$ $d=0,1$ | 0,8 | 490 0 | $\rho_1=230$ $\rho_2=80$ | 3 | IV | По контуру | 250 | 40 | 12 | 20 |

Требуемое сопротивление искусственного заземлителя $R_{\text{н}}$:

$$R_{\text{н}} = \frac{R_{\text{с}} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{с}} - R_{\text{н}}} = \frac{1,67 \cdot 0,5}{1,67 - 0,5} = 0,71 \text{ Ом.} \quad (5.13)$$

Делаем первоначальную схему заземления подстанции в виде клетки из горизонтальных и вертикальных стержней. Вертикальные стержни находятся по размерам заземлительного контура.

По первоначальной схеме находим длину горизонтальных и количество вертикальных электродов. $L_{\text{г}}=1520$ м, $n=46$ шт.

В ОРУ трансформаторы сооружают на фундаментах. Контурное заземление под основанием не сооружаются. Соответственно, согласно рисунку 5.2, от общей длины горизонтального заземлителя убираем 500 м.

$$L_{\text{г}}=1520-500=1020 \text{ м.}$$

Суммарная длина вертикальных электродов:

$$L_{\text{в}}=46 \cdot 5=230 \text{ м.}$$

Относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов

$$t_{\text{отн}} = \frac{(L_{\text{в}}+t_0)}{\sqrt{S}} = \frac{(5+0,8)}{\sqrt{4900}} = 0,06. \quad (5.14)$$

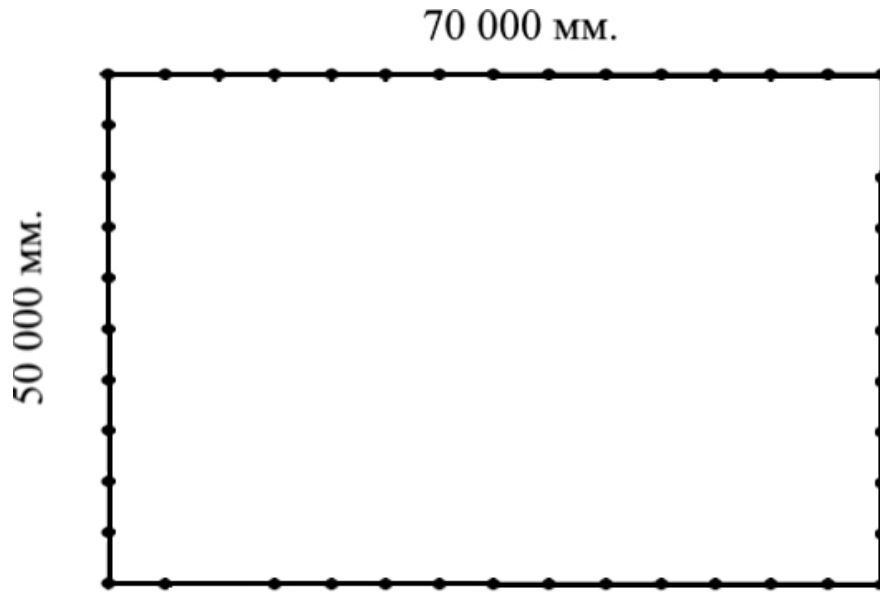


Рисунок 5.3 – Расчетная модель контурного заземлителя

Относительная длина :

$$L_{\text{отн}} = \frac{(h_1 - t_B)}{L_B} = \frac{(3 - 0,7)}{5} = 0,46. \quad (5.15)$$

Определяем эквивалентное удельное сопротивление грунта $p_э$:

$$p_э = p_2 \sqrt{\frac{p_1}{p_2}}^k = 80 \sqrt{\frac{230}{80}}^{0.34} = 114 \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (5.16)$$

Для определения $p_э$, находим k :

$$k = 0.43 \cdot \left(L_{\text{отн}} + 0.272 \cdot \ln \frac{a \cdot \sqrt{2}}{L_B} \right) = 0.43 \cdot \left(0.46 + 0.272 \cdot \ln \frac{11,7 \cdot \sqrt{2}}{5} \right) = 0.34.$$

Вычисляем расчетное сопротивление искусственного заземлителя :

$$R = A \cdot \frac{p_э}{\sqrt{S}} + \frac{p_э}{L_B + L_T}. \quad (5.17)$$

Определяем коэффициент A :

$$A = 0,444 + 0,84 \cdot t_{\text{отн}} = 0,5.$$

$$R=0,5 \cdot \frac{114}{\sqrt{4900}} + \frac{114}{1020+230} = 0,91 \text{ Ом.}$$

Общее заземление подстанции:

$$R_3 = \frac{R_e \cdot R}{R_e + R_i} = \frac{1,67 \cdot 0,91}{1,67 + 0,91} = 0,58 \text{ Ом.} \quad (5.18)$$

Определяем потенциал заземляющего устройства в аварийный период:

$$\Phi_{3,y} = I_3 \cdot R_3 = 2160 \cdot 0,5 = 1080 \text{ В.} \quad (5.19)$$

Полученный потенциал допустим, так как он меньше 10 кВ.

6 Экономическая эффективность проекта

6.1 Экономический расчет статора турбогенератора ТВ-50-2 с новой изоляцией

Выбранный турбогенератор: тип ТВ-50-2, рассчитывается номинальное напряжение $U_{1н} := 10.5 \text{ кВ}$; номинальную мощность $P_n = 50 \text{ МВт}$; номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_n = 0.8$. Отношение короткого замыкания $okz=0,549$. Число пазов $z=72$. Линейная нагрузка $A=729 \cdot 10 \text{ А/м}$. Размер паза: ширина паза $b=8 \text{ мм}$, высота элементарного проводника $a_s = 1.4 \text{ мм}$, число параллельных ветвей, $a=2$, число эффективных проводников $u_{n1}=2$, длина сердечника статора $l=3,072 \text{ м}$, диаметр статора $D=1,08 \text{ м}$.

В соответствии с поставленной задачей меняем пазовую изоляцию рассчитываемого турбогенератора:

- миканит гибкий ГФС на полиимидную пленку ПИ_{АВ}, $h=0,125 \text{ мм}$;
- прокладку между полустержнями из стеклянной ткани, пропитанной эпоксиэфенольным лаком на пленку ПИ_{АВ} $h=0,25 \text{ мм}$;
- изоляцию от корпуса: ленту стеклослюдинитовую ЛТСС вполнахлеста и ленту стеклянную на ленты полиимидные разных толщин ($h=0,125$ и $h=0,1$)

При применении новой пазовой изоляции двусторонняя толщина изоляции стержня изменилась по ширине; по высоте. Общий размер толщины изоляции в пазу, прокладок и зазора на укладку изменились: по ширине, по высоте. Сравнительные размеры (а) - терморреактивной изоляции «слюдотерм» пазовой части стержневых одновитковых двухслойных обмоток статоров и (б) - изоляции на основе алициклических полиимидов показаны в таблице 6.1.

Расчетные данные паза:

Высота паза $h_{n1} = 189.1 \text{ мм}$;

Высота клина $h_{кл} = 13.2 \text{ мм}$;

Ширина паза $b_{n1} = 22$ мм;
 $h_{n1} - h_{кл}$ -высота без клина,

$$h_{n1} - h_{кл} = 189.1 - 13.2 = 175.9.$$

Сечение паза без клина:

$$S_{n-кл} = 175.9 \times 22 = 3870 \text{ мм}^2.$$

Сечение стержня с изоляцией:

$$S_{снш} = 3870 \div 2 = 1935 \text{ мм}^2$$

Таблица 6.1 – Сравнительные размеры изоляции обмоток статоров

| Наименование | Материал (старый) | Толщин а, мм (старый) | Материал (новый) | Толщин а, мм (новый) |
|-------------------------------|--|---|---|---|
| Изоляция переходов | Миканит гибкий ГФС или ГМС $h = 0.2$ мм | 0.4 | Полимерная пленка ПИАБ $h=0.0125$ мм | 0.25 |
| Прокладка между полустержнями | Ткань, стеклянная, проп. эпоксидно-фенольным лаком | 0.5 | Полиимидная пленка ПИАБ | 0.3 |
| Полупроводящее покрытие | Лента стеклянная промазанная лаком ЭПП-58 | 0.3 | Лента стеклянная промазанная лаком ЭПП-58 | 0.3 |
| Изоляция от корпуса | Лента стеклослюдинитовая ЛТСС вполнахлеста толщиной 0.17 мм. Лента стеклянная толщиной 0.1 мм впритык | 50 слоев по 0.17 мм 40 слоев по 0.1 мм итого 12.5 | Лента полиимидная наполненная стеклослюдинитом $h=0.125$ мм Лента полиимидная $h=0.1$ мм | 20 \times 0.125 = 2.5 20 \times 0.1 = 2 Итого 4.5 |
| Полупроводящее покрытие | Лента асболовсановая впритык (покрытая п/п лаком) | 1 | Лента асболовсановая впритык (покрытая п/п лаком) | 1 |

Продолжение таблицы 6.1

| | | | | |
|--|----------------------------|------|----------------------------|------|
| Двусторонняя толщина изоляции стержня | | 14.5 | | 6.25 |
| Прокладка на дно паза | Электронит | 1 | Электронит | 1 |
| Прокладка между стержнями | Стеклотекстолит СТЭФ II | 5 | Стеклотекстолит СТЭФ II | 5 |
| Прокладка под клин | Стеклотекстолит СТЭФ I | 1 | Стеклотекстолит СТЭФ I | 1 |
| Зазор на укладку | | 0.5 | | 0.5 |
| Общий размер толщины изоляции в пазу, прокладок и зазоров на укладку | | 15 | | 6.75 |
| | | 40.7 | | 24.4 |

Ширина меди в пазу с проводниковой изоляцией:

$$12.6 + 2\delta_{и} \text{ или } 2(b_{э} + \delta_{и}) = 2(11.2 + 0.14) = 22.68 \text{ мм.}$$

Сечение меди с проводниковой изоляцией I стержня:

$$h_{и} = 77 \text{ мм,}$$

$$22.68 \times h_{и} = 22.68 \cdot 77 = 1746.36 \text{ мм}^2.$$

Сечение изоляции I стержня:

$$S_{из} = 1935 - 1746.36 = 188.64 \text{ мм}^2.$$

Вес стержня пазовой изоляции:

$$G = 3 \cdot \gamma \cdot w_1 \cdot L_{1В} \cdot S_{из} \cdot 10^{-6},$$

$$G = 3 \cdot 1420 \cdot 1 \cdot 12 \cdot 11.544 \cdot 1100 \cdot 10^{-6} = 649.14 \text{ кг.}$$

Масса меди обмотки статора:

$$G_M = 3 \cdot 8900 \cdot a_1 \cdot \omega_1 \cdot L_{b1} \cdot (S_i \cdot 10^{-6}),$$

$$G_M = 3 \cdot 8900 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 11.544 \cdot 1100 \cdot 10^{-6} = 8137 \text{ кг.}$$

I Стоимость меди:

$$\text{Стоим} = G_M \cdot C_M = 8137 \cdot 3900 = 31734300 \text{ тенге.}$$

II Стоимость изоляции:

$$\text{Стоим} = G_{из} \cdot C_{из} = 649.14 \cdot 5538 = 3594162 \text{ тенге.}$$

III Общая стоимость равна 35328462 тенге.

Стоимость изоляции составляет 50-80% стоимости всех других материалов машины.

Затраты на модернизацию турбогенератора составляют сто миллионов семьсот семьдесят восемь тысяч тенге. Смета составлена в программном комплексе ABC 4.

6.2 Расчет прибыли

Мощность турбогенератора $P=50$ МВт.

Возьмем число часов работы турбогенератора в год равное $N_{уст} = 5000$ ч. Тогда турбогенератор будет вырабатывать в год:

$$\Delta P = P \cdot N_{уст},$$

$$\Delta P = 50 \cdot 10^3 \cdot 5000 = 250 \text{ млн кВт/ч.}$$

Цена отпускной электроэнергии со станции 2 тенге. Прибыль возьмем 10%. В итоге получаем 20 тьин с каждого проданного часа

Тогда прибыль за год будет составлять:

$$\Pi = \Delta P \cdot 0.2 - 20\%,$$

$$\Pi = 250 \cdot 10^6 \cdot 0.2 - 20\% = 40 \text{ млн. тенге.}$$

где 20%- налог на прибыль.

Т.к. затраты на модернизацию турбогенератора будут покрываться при работе турбогенератора с числом часов - пять тысяч, то дополнительная выработка электроэнергии полностью идет на получение прибыли.

6.3 Срок окупаемости

Модернизация турбогенератора обошлась в сто миллионов семьсот семьдесят восемь тысяч тенге. Предприятие готово вложить такие средства.

Определение экономической эффективности любого проекта заключается в расчете NPV (чистой дисконтированной стоимости). Определение NPV заключается в том, чтобы найти соотношение между инвестициями и будущими доходами, выраженное в скорректированной во времени и приведенное к началу реализации проекта денежной величине:

$$NPV = CI + PV,$$

где CI - сумма первоначальных инвестиций, имеющая отрицательный знак при расчетах;

PV - текущая стоимость денежного потока на протяжении жизненного цикла проекта:

$$PV = \sum(P_i \cdot k_i),$$

где P_i - денежный поток в i -том году ($i = 1 \div n$);

k_i - коэффициент дисконтирования, равный $1/(1+r)^i$,

где r - норма дисконта или ставка дисконтирования;

n - срок реализации проекта в годах.

Рассчитаем коэффициент k_i , результат расчета представлен в виде таблицы:

Таблица 6.2 Коэффициент дисконтирования

| Года | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------|-----|-----|------|------|
| k | 0.9 | 0.8 | 0.72 | 0.65 |

$$PV = 40 \cdot 10^6 \cdot 0.9 + 40 \cdot 10^6 \cdot 0.8 + 40 \cdot 10^6 \cdot 0.72 + 40 \cdot 10^6 \cdot 0.65 \\ = 122.8 \text{ млн. тенге.}$$

$$NPV = -100.778 \cdot 10^6 + 122.8 \cdot 10^6 = 22.022 \text{ млн. тенге.}$$

Так как NPV проекта, выраженная в денежном измерении, положительна, то это означает, что затраты на модернизацию турбогенератора окупятся за четыре года.

6.4 Планово-предупредительный ремонт турбогенератора

Для бесперебойности энергоснабжения потребителей необходимо, чтобы турбогенератор всегда находился в состоянии эксплуатационной готовности. Это достигается его планово-предупредительным ремонтом (ППР). Планово-предупредительный ремонт представляет собой комплекс работ, цель которых - путем тщательного осмотра, проверки и испытаний оборудования, ремонта и замены отдельных его деталей и узлов довести его технические и экономические показатели до их проектных значений и обеспечить длительную, надежную и экономичную работу оборудования. Основным принцип планово-предупредительного ремонта - ремонт оборудования как предупреждение аварии, а не как ликвидация ее последствий (что не исключает необходимости в аварийном ремонте, если авария все же имела место). Планово-предупредительный ремонт включает себя капитальный ремонт, являющийся восстановлением оборудования по его первоначальной мощности и технико-экономической характеристике осуществляемый за счет амортизационного фонда, и текущий ремонт, поддерживающий оборудование в состоянии эксплуатационной готовности и осуществляемый за счет ежегодных эксплуатационных затрат.

В капитальный ремонт входит:

1. Полная ревизия турбогенератора - его подробный осмотр, измерения, испытания, анализы и исследования; восстановление и замена изношенных деталей; мероприятия по повышению надежности и экономичности работы оборудования (до проектных значений);

2. Устранение крупных повреждений турбогенератора во время его эксплуатации.

Капитальный ремонт может быть комплексным и узловым. Узловой ремонт производится при большом износе или повреждениях отдельных узлов турбогенератора при относительной сохранности его остальных частей и при экономической нецелесообразности комплексного ремонта.

Кроме основных работ по ремонту турбогенератора и замене его деталей и узлов, капитальный ремонт включает:

- предварительное ознакомление ремонтного персонала с технической документацией по ремонту, инструктаж персонала по методам и организации работ по технике безопасности;

- подготовку проектов организации работ и прочей технической документации;

- подготовительные и заключительные работы: устройство и разборку временных помещений, устройство и разборку временных подводов газа, воды и воздуха, доставку к рабочим местам материалов, инструмента и др.:

- наладку управления, регулирования, средств автоматизации, защиты, сигнализации и измерений оборудования после ремонта;

- обкатку и пуск оборудования после ремонта.

Капитальный ремонт турбогенератора может сочетаться с его модернизацией, в результате которой технические и эксплуатационные параметры могут быть доведены до уровня параметров лучших образцов.

В текущий ремонт оборудования включаются все работы по его осмотру и ремонту в период между капитальными ремонтами. Цель текущего ремонта - обеспечить нормальную эксплуатацию оборудования с номинальной или близкой к номинальной мощности и с технико-экономической характеристикой, близкой к уровню, достигнутому после последнего капитального ремонта.

В систему ППР входит, кроме того, межремонтное обслуживание оборудования и технический надзор, а также профилактические испытания оборудования. Межремонтное обслуживание относится к текущему ремонту и осуществляется во время эксплуатации оборудования. Оно заключается в наружном осмотре оборудования и устранении мелких недостатков, обнаруженных при осмотре: неплотностей в обмуровке, высоких присосов воздуха, парения, пыления и течи и др.

Периодичность капитальных ремонтов для турбогенератора принимается один раз в два - три года.

За два - три месяца до начала ремонта разрабатывается проект организации ремонтных работ. Он включает:

1. Объем и сроки выполнения работ.
2. Необходимые трудовые затраты.
3. Состав ремонтных бригад и схемы расстановки персонала на рабочих местах.
4. Мероприятия по механизации ремонтных работ.
5. Указания необходимом ремонтном оборудовании, запасных частях и ремонтных материалах.
6. Инструкции по технологическим операциям в их последовательности.
7. Пооперационные нормы времени и нормы расхода ремонтных материалов.

На основе проекта организации ремонтных работ разрабатываются сетевые и линейные графики ремонта и технологические карты ремонтных работ по объектам ремонта.

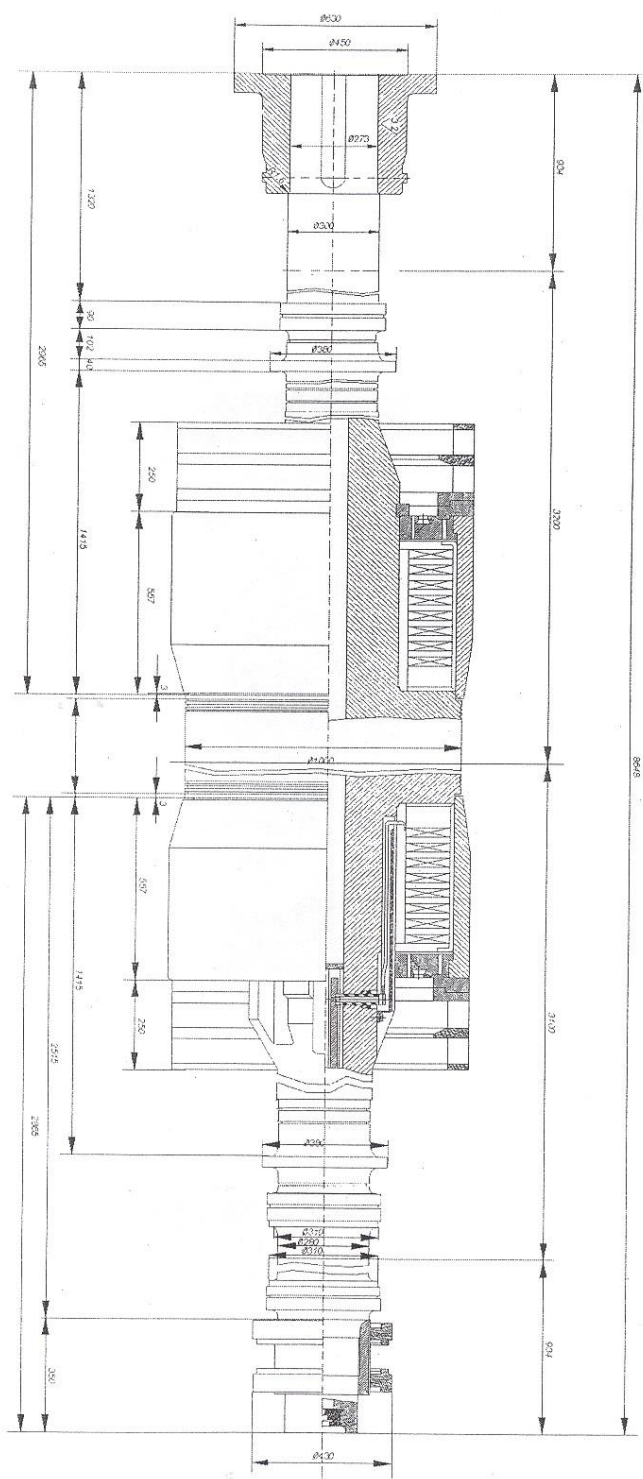
Предварительно подготавливается ремонтная площадка, которая оснащается ремонтным оборудованием, приспособлениями и инструментом. На место работы доставляются материалы и запасные части. Проверяются подъемные механизмы и такелажные приспособления. Организуются ремонтные бригады и рабочие места. Проводится предварительный инструктаж ремонтного персонала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дипломном проекте на основе старого турбогенератора ТВ-50-2 спроектирован новый, усовершенствованный. Произведен расчет турбогенератора. Перевод водородного охлаждения на воздушное (необходимость перевода вызвана экономическими, эксплуатационными и пожаробезопасными вопросами), замена терморезистивной электрической изоляции обмотки якоря турбогенератора на новую полиимидную изоляцию алициклического строения, в результате чего повысился коэффициент полезного действия машины, за счет уменьшения потерь в обмотке якоря. При применении новой пазовой изоляции двусторонняя толщина изоляции стержня изменилась по ширине и по высоте почти в два раза.

В результате модернизация турбогенератора прошла успешно.

Приложение А



Турбогенератор ТВ-50-2

Список литературы

- 1 Абрамов А.И., Извеков В.И., Серихин Н.А. Проектирование турбогенераторов, М. 1990.
- 2 Безопасность жизнедеятельности. Защита от производственного шума. Методические указания к выполнению дипломного проекта, Алматинский институт энергетики и связи, Алматы, 1995.
- 3 СНиП II-12-77 Защита шума. – М, 1978.
- 4 Лагунов Л.Ф., Осипов Г.Л. Борьба с шумом в машиностроении. – М., Машиностроение, 1980.
- 5 Справочник проектировщика. Защита от шума. – Под ред. Юдина Е.Я. – М, 1974.
- 6 Безопасность жизнедеятельности. Мет. указания. – Алматы, 2003.
- 7 Баклашов Н.И., Китаев Н.Ж. Охрана труда на предприятиях связи и охрана окружающей среды – М: Радио и связь, 1989.
- 8 Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учебное пособие для вузов. – М: Энергия, 1979.
- 9 Азбукин Ю.И., Аврух В.Ю. Модернизация турбогенераторов, - М.: Энергия, 1980. – 232 с. ил.
- 10 Хазан С. И. Ремонт турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением. М. – Л., издательство “Энергия”.
- 11 Справочник по ремонту турбогенераторов/ Гурвич В.С., Гурьев И.Я., Каплуновский М.И. и др.; Под ред. П.И. Устинова. – М.: Энергия.
- 12 Лапицкий В.И. Организация и планирование энергетики . 2-е изд. перераб. и доп. Учебник. М., “Высш. школа”.
- 13 Бекмагамбетова К.Х. Улучшение технико - экономических показателей электро – механических преобразователей энергии электротехнических комплексов на основе нового электроизоляционного материала: Дис. . .
- 14 Петров Г.Н., Абрамов А.И. Междувитковые перенапряжения в обмотках электрических машин при волновых перенапряжениях // Журн. “Электричество”. – 1954. - №7. С.37-39.
- 15 Каганов З.Г., Крутов Н.В. Вопросы профилактики витковой изоляции электродвигателей. Сб. “Изоляция электрических машин”, вып. 4 ЦБТИ НИИ ЭП, 1958.
- 16 Техника высоких напряжений. Под ред. Д.В. Разевига. – М. Энергия,- 1976. 486 с.
- 17 Каганов З.Г. Внутренние перенапряжения и другие воздействия на витковую изоляцию электрических машин. – Сб. “Испытания витково изоляции”. – М., Госэнергоиздат. 1969.