

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Институт электронного обучения
Специальность 140601 Электромеханика
Кафедра Электромеханических комплексов и материалов

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА

| Тема работы |
|--|
| Проектирование синхронного генератора для дизель-генератора |
| УДК 621.313.322-843.6.001.6 |

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|----------|---------------|---------|------|
| 3 - 7301 | Сташишин А.Г. | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент | Кунулеков Д.С. | | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Технология производства»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент | Баранов П.Р. | к.т.н. | | |

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Кузьмина Н.Г. | | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент | Сечин А.А. | к.т.н. | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Зав. Кафедрой | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| ЭКМ | Гарганеев А.Г. | профессор, д.т.н. | | |

Томск – 2016 г.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА ПО ТЕМЕ:
«ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН»**

Студенту:

| | |
|---------------|----------------|
| Группа | ФИО |
| 3-7301 | Стасишину А.Г. |

| | | | |
|---------------------|-------------|---------------------------|------------------------------|
| Институт | ИнЭО | Кафедра | ЭКМ |
| Уровень образования | Специалист | Направление/специальность | 140601.65 Электромеханика |

Исходные данные к разделу «Технологический процесс сборки статора синхронного генератора»

| | |
|--|--|
| 1. Сборочный чертеж статора синхронного генератора, спецификация; 10 кВт, 2р=4 | |
| 2. Годовая программа выпуска изделия 2700 штук | |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|---|--|
| 1. Анализ конструкции статора на технологичность | 2. Рассчитать усилие запрессовки сердечника статора с обмотками в станину, выбрать пресс |
| 3. Составить схему сборки статора | 4. Выбрать оборудование для сборки, мех. обработки статора |
| 5. Разработать маршрутную технологию сборки статора | 6. Определить нормы времени на операции и оборудование |
| 7. Построить график загрузки оборудования | |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

| |
|--|
| 1. Комплект маршрутных карт и карты эскизов (в приложении) |
| 2. График загрузки оборудования |
| 3. Схема сборки статора |
| 4. Технологическая схема запрессовки |

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|------------------|--------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| доцент | Баранов П.Р. | к.т.н., доцент | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|---------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 3-7301 | Стасишин А.Г. | | |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| | |
|--------|---------------|
| Группа | ФИО |
| К-7301 | Сташишин А.Г. |

| | | | |
|---------------------|-------------|---------------------------|-----------------|
| Институт | ИнЭО | Кафедра | ЭКМ |
| Уровень образования | специалитет | Направление/специальность | электромеханика |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

| | |
|--|--|
| <p>3. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></p> | <p><i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, норма, анкетирование; опрос</i></p> |
|--|--|

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|--|
| 2. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i> | |
| 3. <i>Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР</i> | |
| 4. <i>Составление бюджета инженерного проекта (ИП)</i> | |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

| | |
|---|--|
| 5. <i>Оценка конкурентоспособности</i> | |
| 6. <i>График разработки и внедрения</i> | |

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|-----------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Старший преподаватель | Кузьмина Н.Г. | | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|--------|---------------|---------|------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| К-7301 | Сташишин А.Г. | | |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|--------|----------------|
| Группа | ФИО |
| 3-7301 | Стасишину А.Г. |

| | | | |
|---------------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| Институт | ИнЭО | Кафедра | ЭКМ |
| Уровень образования | Специалист | Направление/специальность | 140601.65 Электромеханика |

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса сборки синхронного генератора) на предмет возникновения:

- вредных проявлений факторов производственной среды
- опасных проявлений факторов производственной среды
- негативного воздействия на окружающую природную среду

2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ вредных и опасных производственных факторов встречающиеся в технологическом процессе сборки синхронного генератора.

2. Производственная санитария

3. Состояние микроклимата на производстве (определение всех допустимых норм и мер для их соблюдения)

4. Влияние шума и вибрации

5. Освещение рабочей зоны

6. Пожарная безопасность на производстве

7. Электробезопасность

8. Охрана окружающей среды

Перечень графического материала:

При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|-----------|------------|------------------------|---------|------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| доцент | Сечин А.А. | доцент | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|--------|---------------|---------|------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 3-7301 | Стасишин А.Г. | | |

Оглавление

| | |
|---|----|
| 1. Электромагнитный расчет..... | 9 |
| 1.1 Магнитная цепь машины. Размеры, конфигурация, материалы..... | 9 |
| 1.1.1. Конфигурация..... | 9 |
| 1.1.2. Главные размеры генератора..... | 9 |
| 1.1.3. Сердечник статора..... | 13 |
| 1.1.4. Сердечник ротора..... | 14 |
| 1.1.5. Сердечник полюса и полюсный наконечник..... | 14 |
| 1.2. Обмотка статора..... | 17 |
| 1.3. Расчет магнитной цепи..... | 23 |
| 1.3.1. Воздушный зазор..... | 23 |
| 1.3.2. МДС для зубцов статора..... | 24 |
| 1.3.3. МДС для спинки статора..... | 24 |
| 1.3.4. МДС для полюса..... | 25 |
| 1.3.5. МДС для спинки ротора..... | 27 |
| 1.3.6. Воздушный зазор в стыке полюса..... | 28 |
| 1.3.7. Общие параметры магнитной цепи..... | 28 |
| 1.5. Расчет магнитной цепи при нагрузке..... | 31 |
| 1. 6. Обмотка возбуждения..... | 34 |
| 1.7. Параметры обмоток и постоянные времени. Сопротивления обмоток статора при установившемся режиме..... | 37 |
| 1.7.1. Сопротивления обмоток статора при установившемся режиме..... | 37 |
| 1.7.2. Сопротивление обмотки возбуждения..... | 38 |
| 1.7.3. Переходные и сверхпереходные сопротивления обмотки статора..... | 38 |
| 1.7.4. Сопротивления для токов обратной и нулевой последовательности..... | 39 |
| 1.7.5. Постоянные времени обмоток..... | 40 |
| 1.8. Потери и КПД..... | 40 |
| 1.9. Характеристики машин..... | 42 |
| 1.9.1. Отношение короткого замыкания..... | 42 |
| 1.10. Тепловой и вентиляционный расчеты..... | 43 |
| 1.10.1. Тепловой расчет..... | 43 |
| 1.10.2. Обмотка возбуждения..... | 46 |
| 1.10.3. Вентиляционный расчет..... | 46 |
| 1.11. Механический расчет вала..... | 47 |
| 1.11.1 Расчет вала на прогиб..... | 48 |

| | |
|---|------|
| 1.11.2. Расчет вала на прочность. | 52 |
| 1.11.3. Выбор подшипников..... | 53 |
| 2. Специальная часть..... | 54 |
| 3. Технологический процесс сборки статора синхронного генератора. | 59 |
| 3.1. Описание сборочной единицы. | 60 |
| 3.2. Анализ исходных данных..... | 61 |
| 3.3. Анализ технологичности статора..... | 62 |
| 3.4. Расчёт усилия запрессовки сердечника статора. | 64 |
| 3.5 Выбор технологического оборудования и оснастки | 67 |
| 3.7 Расчет количества оборудования для выполнения годовой программы. | 72 |
| 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.... | 76 |
| 4.1 График выполнения проекта..... | 76 |
| 4.2. Смета затрат..... | 77 |
| 4.2.1 Смета затрат на подготовку проекта..... | 77 |
| 4.2.3 Материальные затраты на канцелярские товары..... | 78 |
| 4.2.4 Амортизация вычислительной техники..... | 78 |
| 4.2.5 Прочие неучтенные затраты. | 78 |
| 4.1.6 Накладные расходы. | 79 |
| 4.1.7 Себестоимость проекта..... | 79 |
| 4.3 Оценка технического уровня | 79 |
| 5. Социальная ответственность. | 83 |
| 5.1. Анализ вредных и опасных производственных факторов..... | 83 |
| 5.2. Производственная санитария..... | 85 |
| 5.3. Микроклимат..... | 85 |
| 5.4. Шум и вибрация. | 87 |
| 5.5. Освещение..... | 88 |
| 5.6. Пожарная безопасность. | 92 |
| 5.7. Электробезопасность. | 94 |
| Заключение. | 97 |
| Приложение А | 1010 |
| Приложение Б..... | 1021 |
| Приложение В..... | 1032 |
| Приложение Г | 1043 |

Приложение Д..... 104

ФЮРА 561.231.032 Сборочный чертеж синхронного генератора

ФЮРА 561.231.032 Специальная часть

ФЮРА 561.231.032 Паз статора

ФЮРА 561.231.032 Обмотка статора

ФЮРА 757.221.001 Статор

Введение

Автоматизация технологических процессов необходима для научно-технического прогресса. Для этого требуется наладить выпуск электрические машины, которые по своим показателям и характеристикам удовлетворят требования, предъявляемые различными отраслями промышленности и народного хозяйства.

При создании электрическая машина пройдет три этапа, это проектирование, изготовление и испытания.

В настоящей ВКР будут рассмотрены вопросы проектирования синхронного явнополюсного генератора дизель-электростанции(дизель-генератор), мощностью 10кВт. Такие электростанции находят большое распространение в народном хозяйстве, в местах, удалённых от общей энергосистемы (в местах для начальных разработок месторождений и полезных ископаемых, стройплощадках и т.д.), либо в местах куда прокладка центральных сетей нецелесообразна. Так же они применяются в аварийных системах предприятий, больниц и других объектов, где необходимо обеспечение постоянного электропитания. Очень большой спрос на подобные генераторы и в частном секторе.

Проектирование электрической машины это определение размеров ее составных частей, расчет параметров обмоток, построение и анализ рабочих и других необходимых характеристик машины, технология сборки машины как целое, но также технология обработки и сборки ее отдельных деталей и сборочных узлов.

На сегодняшний день конструкторы всего мира, хоть и в условиях кризиса, разрабатывают и внедряют новые методы проектирования, интегрируют автоматизированные системы проектирования, сталкиваясь как с необходимостью учета не только наилучшие показатели и параметры машины но и её экономические показатели и технологические при производстве.

1. Электромагнитный расчет.

1.1 Магнитная цепь машины. Размеры, конфигурация, материалы.

Проектирование синхронных машин начинают с определения ее главных размеров: внутреннего диаметра D_1 и длины l_1 сердечника статора. Конструкция и метод расчета параметров статоров синхронных машин и асинхронных близки.

1.1.1. Конфигурация.

Принимаем изоляцию класса нагревостойкости F

Количество пар полюсов

$$p = 60f/n_1 = 60 \cdot 50 / 1500 = 2, \quad (1)$$

где: f [Гц] – частота промышленной сети;

n_1 - об/мин.

Согласно (рисунок 11.1 [1]) индуктивное сопротивление рассеяния

$$x_{\sigma^*} = 0,08 \text{ о.е.}$$

Определяем коэффициент мощности нагрузки

$$k_n = \sqrt{\cos^2 \varphi' + (\sin \varphi' + \delta'_{\sigma^*})^2} = \sqrt{0,8^2 + (0,6 + 0,08)^2} = 1,05. \quad (2)$$

Для синхронного генератора выбираем (страница 313 [1])

$$\cos \varphi' = 0,8 \Rightarrow \sin \varphi' = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi'} = 0,6. \quad (3)$$

Предварительное значение КПД (рисунок 11.2[1])

$$\eta' = 0,8 \text{ о.е.}$$

1.1.2. Главные размеры генератора.

Расчетная мощность генератора

$$P' = \frac{m \cdot k_n \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi}}{\cos \varphi'} = \frac{3 \cdot 1,05 \cdot 22,6 \cdot 132,8}{0,8} = 11,84 \text{ кВт} \cdot \text{А}. \quad (4)$$

Значение фазного напряжения

$$U_{\phi} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132,7 \text{ В}. \quad (5)$$

Предварительно принимаем значение фазного напряжения

$$I_{\phi} = \frac{P_{2H}}{3U_{H1} \cdot \eta \cdot \cos f'} = \frac{10}{3 \cdot 230 \cdot 0,8 \cdot 0,8} = 22,6 \text{ А.} \quad (6)$$

Согласно (таблица 11.1 [1]) выбираем высоту оси вращения.

$$h = 160 \text{ мм.}$$

Допустимое расстояние от корпуса до опорной поверхности (таблица 9.2)

$$h_1 = 6 \text{ мм.}$$

Наружный диаметр корпуса генератора

$$D_{\text{корп}} = 2(h-h_1) = 2(160-6) = 308 \text{ мм.} \quad (7)$$

Максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора (таблица 9.2 [1])

$$D_{H1\text{max}} = 285 \text{ мм.}$$

Выбираем наружный диаметр сердечника статора согласно (стр.314 [1])

$$D_{H1} = 254 \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр сердечника статора (таблица 9-3 [1])

$$D_1 = 0,68 \cdot D_{H1} - 5 = 0,68 \cdot 254 - 5 = 183 \text{ м.} \quad (8)$$

Выбираем предварительное значение линейной нагрузки статора (рис. 11.3 [1])

$$A'_1 = 160 \text{ А/см.}$$

Выбираем предварительное значение магнитной индукции в воздушном зазоре в номинальном режиме (рисунок 11.4 [1])

$$B'_6 = 0,7 \text{ Тл.}$$

Предварительное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре машины при х.х. (11.3 [1])

$$B'_{60} = B'_6 / k_H = 0,7 / 1,05 = 0,67 \text{ Тл.} \quad (9)$$

Полюсное деление статора

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{3,14 \cdot 183}{2 \cdot 2} = 143,7 \text{ мм.} \quad (10)$$

Индуктивное сопротивление машины по продольной оси (рис. 11.5)

$$x_{d*} = 1,7 \text{ о.е.}$$

Индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси

$$x_{ad*} = x_{d*} - x_{\sigma*} = 1,7 - 0,08 = 1,62 \text{ о.е.} \quad (11)$$

Коэффициент, учитывающий наличие зазоров в стыке полюса и сердечника ротора или полюсного наконечника и полюса (§ 11.3, стр.316 [1])

$$k' = 1,04$$

Расчетная величина воздушного зазора между полюсным наконечником и сердечником статора

$$\delta = \frac{36 \cdot 10^{-6} \tau A_1'}{x_{ad*} B_{\sigma 0}' k'} = \frac{36 \cdot 10^{-6} \cdot 143,7 \cdot 160}{1,62 \cdot 0,67 \cdot 1,04} = 0,74 \text{ мм.} \quad (12)$$

Уточненная величина воздушного зазора (стр.317 [1])

$$\delta = 0,7 \text{ мм.}$$

Принимаем гребенчатую форму полюсных наконечников с равномерным воздушным зазором (стр.317 [1]).

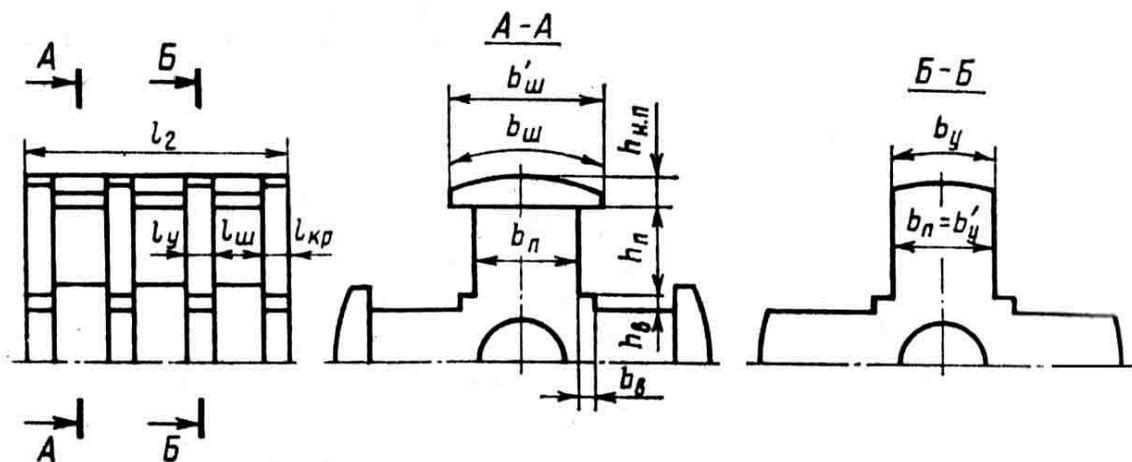


Рисунок 1 – Ротор с гребенчатой конструкцией полюсных наконечников.

Определим коэффициент полюсной дуги для пакетов с широкими полюсными наконечниками

$$a_{ш} = 0,7 \text{ (стр.317 [1]).}$$

Рассчитываем радиус очертаения полюсного наконечника

$$R_{п.п.} = 0,5D_1 - \delta = 0,5 \cdot 183 - 0,7 = 90,8 \text{ мм.} \quad (13)$$

Рассчитываем действительную ширину полюсной дуги в сечении пакета с широкими полюсными наконечниками

$$b_{ш} = a_{ш} \cdot \tau = 0,7 \cdot 143,7 = 100,6 \text{ мм.} \quad (14)$$

Ширина полюсного наконечника, которую определяет хорда в сечении пакета с широкими полюсными наконечниками

$$b'_{uu} = 2 \cdot R_{н.н.} \cdot \text{Sin}(0,5b_{uu} / R_{н.н.}) = 2 \cdot 90,8 \cdot \text{Sin}(0,5 \cdot 100,6 / 90,8) = 95,5 \text{ мм.} \quad (15)$$

Соотношение $b'_y/b'_ш$ между широкими $b'_ш$ и узкими полюсными наконечниками b'_y (рис. 11-7 [1])

$$b'_y/b'_ш = 0,47.$$

Ширина полюсного наконечника, определяемая хордой в сечении пакета с узкими полюсными наконечниками

$$b'_Y = b_{uu} \times (b_Y / b_{uu}) = 100, \times 0,47 = 44,9 \text{ мм.} \quad (16)$$

Фактическая ширина полюсной дуги в сечении пакета с узкими полюсными наконечниками

$$b_Y = 2R_{н.н.} \cdot \text{arcSin}\left(\frac{0,5b'_Y}{R_{н.н.}}\right) = 2 \cdot 90,8 \cdot \text{arcSin}\left(0,5 \cdot \frac{44,9}{90,8}\right) = 45,4 \text{ мм.} \quad (17)$$

Фактический коэффициент полюсной дуги для пакетов с узкими полюсными наконечниками

$$\alpha_Y = b_Y / \tau = 45,4 / 143,7 = 0,316. \quad (18)$$

Соотношение между длинами чередующихся пакетов сердечника полюса вдоль оси ротора с узкими и широкими наконечниками принимаем согласно рекомендациям (стр. 317 [1])

$$l_{ша} / l_{II} = 0,7 ;$$

$$l_{ya} / l_{II} = 0,3 ;$$

где $l_{y\Sigma}$ - суммарная длина пакетов с широкими полюсными наконечниками;

l_n - полная длина полюса.

Находим коэффициент полюсной дуги :

средний

$$\alpha = \alpha_{ш}(l_{ша} / l_{II}) + \alpha_{ш}(l_{ya} / l_{II}) = 0,7 \cdot 0,7 + 0,316 \cdot 0,3 = 0,585 \text{ мм.} \quad (19)$$

расчетный

$$\begin{aligned} \alpha' &= 0,65 + (2,8 \cdot \delta / \tau) + (1,2 \cdot \delta / \tau) / (1 + 4,4 \cdot \delta / \tau) = \\ &= 0,65 + (2,8 \cdot 0,7 / 143,7) + (1,2 \cdot 0,7 / 143,7) / (1 + 4,4 \cdot 0,7 / 143,7) = \\ &= 0,67. \end{aligned} \quad (20)$$

1.1.3. Сердечник статора.

Сердечник статора собирается из отдельных штампованных листов электротехнической стали. Толщину стали принимаем 0,5 мм. Для сердечника принимаем марку холоднокатаной изотропной электротехнической стали 2013. Листы стали имеют изоляционное покрытие

Коэффициент заполнения сердечника статора сталью принимаем согласно рекомендациям (стр. 123 [1])

$$k_c = 0,97.$$

Примем коэффициент формы поля возбуждения согласно (рис.11.9 [1])

$$k_B = 1,2.$$

Обмоточный коэффициент согласно рекомендациям (стр. 119 [1])

$$k_{об1} = 0,91.$$

Расчетная длина сердечника статора

$$\begin{aligned} l_1' &= \frac{6,1 \cdot 10^7 P'}{D_1^2 n_1 A_1 B_\delta \alpha' k_c k_{об1}} = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot 11,84 \cdot 1000}{183^2 \cdot 1500 \cdot 160 \cdot 0,67 \cdot 0,67 \cdot 1,2 \cdot 0,91} = \\ &= 166,5 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (21)$$

Принимаем

$$l_1 = 167 \text{ мм}.$$

Принимаем количество пакетов стали в сердечнике статора

$$n_n = 1.$$

Определим отношение конструктивной длины к внутреннему диаметру сердечника статора

$$\lambda = l_1 / D_1 = 167 / 183 = 0,913. \quad (22)$$

Проверка по условию $\lambda < \lambda_{\max}$ (рис. 11-10 [1])

$\lambda_{\max} = 1,3$, следовательно условие соблюдается.

Количество пазов на полюс и фазу (стр. 320 [1])

$$q_1=3.$$

Количество пазов сердечника статора

$$z_1=2pm_1q_1=4 \cdot 3 \cdot 3=42, \quad (23)$$

где: m_1 – число фаз;

$2p$ – число пар полюсов;

q_1 – число пазов на полюс и фазу.

Проверка правильности выбора количества пазов статора

$$z_1 / gm_1 = K$$

$$36 / 3 \cdot 3 = 4$$

$$K \text{ – целое число,} \quad (24)$$

где: z_1 – число пазов статора;

g – общий наибольший делитель чисел z_1 и p ;

K – целое число.

1.1.4. Сердечник ротора.

Сердечник ротора собирается из отдельных штампованных листов электротехнической стали. Марку стали принимаем 2013, толщина листов стали 0,5 мм, листы без изоляции, коэффициент заполнения сталью $k_c=0,97$.

Длина сердечника ротора

$$l_2 = l_1 = 167 \text{ мм.} \quad (25)$$

1.1.5. Сердечник полюса и полюсный наконечник.

Примерно 70% листов полюсных наконечников выполняются из электротехнической стали марки 2013, толщина листов стали 0,5 мм, листы без изоляции. Коэффициент заполнения сталью $k_c=0,97$, остальные листы собираются из углеродистой стали У8А, толщина 0,5 мм, также без изоляции.

Длина шихтованного сердечника полюса

$$l_{\pi} = l_1 = 167 \text{ мм.} \quad (26)$$

Находим длину пакетов с широкими полюсными наконечниками

$$l'_{\pi} = l_{\pi} (l_{\Sigma} / l_{\pi}) = 0,7 \cdot 167 = 116,9 \text{ мм.} \quad (27)$$

Количество пакетов сердечника полюса с широкими полюсными наконечниками принимаем равным:

$$n_{ш} = 5$$

Тогда длина одного пакета с широкими полюсными наконечниками равна:

$$l_{ш} = l_{ш\Sigma} / n_{ш} = 116,9 / 5 = 23,4 \text{ мм.} \quad (28)$$

Количество пакетов сердечника полюса с узкими наконечниками принимаем равным:

$$n_{у} = 3.$$

Количество крайних пакетов сердечника полюса принимаем равным:

$$n_{кр} = 2.$$

Тогда длина одного пакета с узкими наконечниками равна:

$$l_{у} = l_n - l_{ш\Sigma} / n_{у} + n_{кр} = 167 - 116,9 / 3 + 2 = 10,02 \text{ мм.} \quad (29)$$

Тогда длина одного пакета с узкими наконечниками равна:

$$l_{кр} = l_n - l_{ш\Sigma} - l_{у} \cdot n_{у} / n_{кр} = 167 - 116,9 - 10,02 \cdot 3 / 2 = 10,02 \text{ мм.}$$

(30)

Принимаем магнитную индукцию в основании сердечника полюса из рекомендуемого интервала $1,4 \div 1,6$ Тл (стр. 322 [1])

$$B'_n = 1,4 \text{ Тл.}$$

Находим предварительное значение магнитного потока

$$\Phi' = B'_\delta \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot 10^{-6} / p = 0,7 \cdot 183 \cdot 166,5 \cdot 10^{-6} / 2 = 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (31)$$

Где: D_1 - внутренний диаметр сердечника статора;

l_1 - расчетная длина сердечника статора;

p - число полюсов;

B'_δ - предварительное значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

Ширина дуги полюсного наконечника

$$b_{н.п} = \alpha \tau = 0,585 \cdot 143,7 = 84 \text{ мм,} \quad (32)$$

где: α - коэффициент полюсной дуги;

τ - полюсное деление.

Ширина полюсного наконечника

$$b'_{н.п} = 2R_{н.п} \sin(0,5b_{н.п}/R_{н.п}) = 2 \cdot 90,8 \cdot \sin(0,5 \cdot 84/90,8) = 81,1 \text{ мм},$$

(33)

где: $b_{н.п}$ - ширина дуги полюсного наконечника;

$R_{н.п.}$ - радиус очертания полюсного наконечника.

Предварительно принимаем высоту полюсного наконечника у его края от 3 до 20 (стр. 323 [1])

$$h'_{н.п} = 5 \text{ мм}.$$

Тогда высота полюсного наконечника по оси полюса для машин с равномерным зазором

$$h_{н.п.} = h'_{н.п.} + R_{н.п.} - \sqrt{R_{н.п.}^2 - (0,5b'_{н.п.})^2} = 5 + 90,8 - \sqrt{90,8^2 - 0,5 \cdot 81,1^2} =$$
$$= 18,6 \text{ мм}.$$

(34)

Находим поправочный коэффициент

$$k_{\sigma} = 1,25h_{н.п.} + 25 = 1,25 \cdot 18,6 + 25 = 48,2.$$

(35)

Предварительное значение коэффициента магнитного рассеяния полюсов

$$\sigma' = 1 + k_{\sigma} 356/\tau^2 = 1 + 48,2 \cdot 35 \cdot 0,7/143,7 = 1,057.$$

(36)

Ширина сердечника полюса

$$b_{п} = \sigma' \Phi' \cdot 10^6 / (k_c l_{п} B'_{п}) = 1,057 \cdot 10,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 / (0,97 \cdot 167 \cdot 1,4) = 49,9 \text{ мм},$$

(37)

где: Φ' - предварительное значение магнитного потока;

k_c - коэффициент заполнения сердечника статора;

$l_{п}$ - полная длина полюса;

B'_n - магнитная индукция в основании сердечника полюса.

Высота и ширина выступа у основания полюсного сердечника

$$h_B = 1,25 \cdot b_{п} + 2 = 1,25 \cdot 49,9 + 2 = 8,23 \text{ мм}.$$

(38)

Предварительная высота полюсного сердечника

$$h'_{п} = 0,5D_1 - h_{н.п.} - \delta - h_B - 0,5b_{п} = 0,5 \cdot 183 - 18,6 - 0,7 - 8,23 - 0,5 \cdot 49,9 =$$
$$= 39,05 \text{ мм},$$

(39)

где: $h_{н.п.}$ - высота полюсного наконечника;

δ – воздушный зазор;

b_n - ширина сердечника полюса.

Находим внутренний диаметр сердечника ротора при $\kappa_g = 30$

$$D'_2 = \kappa_B \sqrt[3]{P_{n2}/n} = 30 \sqrt[3]{10000/1500} = 56 \text{ мм.} \quad (40)$$

Высота спинки ротора

$$h_{c2} = 0,5D_1 - b - h'_n - h_{n,n} - 0,5D'_2 = 0,5 \cdot 183 - 0,7 - 39,05 - 18,6 - 0,5 \cdot 56 = 4,9 \text{ мм,}$$

(41)

Находим расчетную высоту спинки ротора с учетом прохождения части магнитного потока по валу

$$h'_{c2} = h_{c2} + 0,5D'_2 = 4,9 + 0,5 \cdot 56 = 33,2 \text{ мм.} \quad (42)$$

Тогда магнитная индукция в спинке ротора

$$B_{c2} = \frac{\Phi' \cdot 10^6}{2h'_{c2} l_1 \kappa_c} = \frac{10,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 4,9 \cdot 167 \cdot 0,97} = 0,996 \text{ Тл,} \quad (43)$$

где: Φ' - предварительное значение магнитного потока;

κ_c - коэффициент заполнения сердечника статора;

l_1 - длина сердечника статора.

После расчета вала на жесткость следует уточнить размер D'_2 . Конструкция сердечника ротора и размеры его поперечного сечения в большинстве случаев определяются требованиями к его механической прочности, поэтому магнитная индукция в спинке ротора B_{c2} часто получается небольшой. В тихоходных машинах ($2p \geq 8$) сечение обода проверяется по допустимой индукции $B_{c2} \leq 1,3$ Тл.

1.2. Обмотка статора.

Сечение эффективного проводника определяется исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке. Для повышения использования активных материалов плотность тока должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастут потери в меди обмотки. Увеличение

потерь сказывается, во-первых, на повышение температуры обмотки, во-вторых – на КПД двигателя.

Принимаем однослойную шаблонную распределенную обмотку из провода ПЭТ-155, класс нагревостойкости F, укладываемую в трапецеидальные полузакрытые пазы.

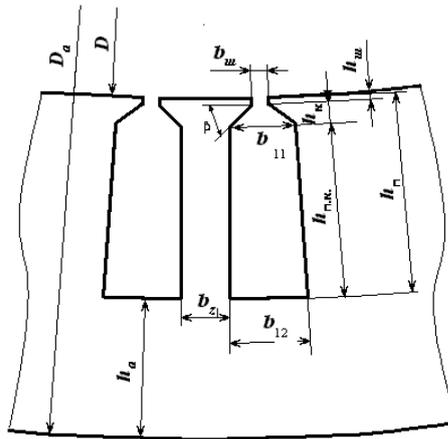


Рисунок 2 – трапецеидальный паз статора.

Находим коэффициент распределения при $\alpha=60/q_1$ $\alpha=20$

$$K_{p1} = \frac{0,5}{q_1 \sin \alpha / 2} = \frac{0,5}{3 \cdot \sin \frac{20}{3 \cdot 2}} = 0,96;$$

(44)

где: q_1 - число пазов на полюс и фазу.

Находим диаметральный шаг по пазам

$$y_{п1} = z_1 / 2p = 36 / 2 \cdot 2 = 9;$$

где: z_1 - число пазов сердечника статора.

Уточняем укорочение шага

$$\beta_1 = \frac{y_{п1} \cdot 2p}{z_1} = \frac{9 \cdot 2 \cdot 2}{36} = 1.$$

Коэффициент укорочения

$$K_{y1} = \sin(\beta_1 \cdot 90^\circ) = \sin(1 \cdot 90) = 1.$$

Найдем обмоточный коэффициент

$$K_{об1} = K_{p1} \cdot K_{y1} = 0,96 \cdot 1 = 0,96.$$

Предварительное количество витков в обмотке фазы

$$\omega'_1 = \frac{K_n U_\phi}{222 k_{об1} (f/50) \Phi'} = \frac{1,05 \cdot 132,79}{222 \cdot 0,96 (50/50) \cdot 10,7 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3}} = 61,2, \quad (49)$$

где: Φ' - предварительное значение магнитного потока;

K_n - Коэффициент мощности нагрузки;

U_ϕ - Значение фазного напряжения;

f – частота промышленной сети.

Количество параллельных ветвей обмотки статора (стр.129 [1])

$$a_1 = 1$$

Предварительное количество эффективных проводников в пазу

$$N'_{п1} = \frac{w'_1 a_1}{p q_1} = \frac{61,2 \cdot 1}{2 \cdot 3} = 10,2; \quad (50)$$

Принимаем $N_{п1} = 10$.

Тогда число витков будет равно

$$\omega_1 = \frac{N_{п1} \cdot p \cdot q_1}{a_1} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3}{1} = 60. \quad (51)$$

Уточненное значение магнитного потока

$$\Phi = \Phi' (w'_1 / w_1) = 10,7 \cdot 10^{-3} (61,2 / 60) = 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}. \quad (52)$$

Уточненное значение индукции в воздушном зазоре

$$B_{вз} = B'_6 (w'_1 / w_1) = 0,7 \cdot (61,2 / 60) = 0,7 \text{ Тл}. \quad (53)$$

Уточняем линейную нагрузку статора

$$A_1 = \frac{10 \cdot N_{п1} \cdot z_1 \cdot I_\phi}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 36 \cdot 22,64}{3,14 \cdot 183 \cdot 1} = 142 \text{ А/см}. \quad (54)$$

Принимаем среднее значение магнитной индукции в спинке статора (таблица 9-13 [1])

$$B_{с1} = 1,55 \text{ Тл}.$$

Обмотка статора укладывается в трапецидальные полузакрытые пазы.

Выбираем значение индукции в зубцах статора (таблица 9-16 [1])

$$B'_{з1} = 1,7 \cdot 0,95 = 1,615 \text{ Тл}.$$

Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора

$$t_1 = \pi D_1 / z_1 = 3,14 \cdot 183 / 36 = 16 \text{ мм}, \quad (55)$$

где: z_1 - число пазов сердечника статора;

D_1 - внутренний диаметр сердечника статора.

Далее находим ширину зубца

$$b_{31} = \frac{t_1 B_\delta}{k_c B_{31}} = \frac{16 \cdot 0,7}{0,97 \cdot 1,615} = 7,1 \text{ мм}; \quad (56)$$

где: k_c - коэффициент заполнения сердечника статора;

B_δ - значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

Находим размеры пазов:

Высота спинки статора

$$h_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2k_c l_1 B_{c1}} = \frac{10,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 0,97 \cdot 167 \cdot 1,55} = 21,3 \text{ мм}; \quad (57)$$

где: Φ' - предварительное значение магнитного потока;

k_c - коэффициент заполнения сердечника статора;

l_1 - длина сердечника статора.

Высота паза

$$h_{n1} = (D_{n1} - D_1) / 2 - h_{c1} = (254 - 183) / 2 - 21,3 = 14,2 \text{ мм}; \quad (58)$$

где: D_1 - внутренний диаметр сердечника статора;

D_{n1} - наружный диаметр сердечника статора.

Принимаем размеры шлица (стр.131 [1]):

$$\text{высота шлица } h_{ш1} = 0,5 \text{ мм}, \text{ ширина шлица } b_{\phi 1} = 0,3 \sqrt{h} = 3,8 \text{ мм}. \quad (59)$$

Большая ширина паза

$$b_1 = \left[\frac{\pi(D_1 + 2h_{n1})}{z_1} \right] - b_{31} = \frac{3,14(183 + 2 \cdot 14,2)}{36} - 7,1 = 11,3 \text{ мм}. \quad (60)$$

Меньшая ширина паза

$$b_2 = \left[\frac{\pi(D_1 + 2h_{n1} - b_{ш1}) - z_1 b_{31}}{z_1 - \pi} \right] = \frac{3,14(183 + 2 \cdot 0,5 - 3,8) - 36 \cdot 7,1}{36 - 3,14} = 9,4 \text{ мм}. \quad (61)$$

Проверка правильности определения b_1 и b_2 исходя из требования $b_{31} = \text{const}$

$$z_1(b_1 - b_2) + \pi(b_2 - b_{ш1}) - 2\pi(h_{n1} - h_{ш1}) = 36(11,3 - 9,4) + 3,14(9,4 - 3,8) - 2 \cdot 3,14(14,2 - 0,5) =$$

$$= 0,05. \quad (62)$$

Как видим отличие b_1 от b_2 незначительные. Следовательно грани зубцов статора параллельны.

Находим площадь поперечного сечения паза в штампе

$$S_{n1} = \frac{b_1 + b_2}{2} (h_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2}) = \frac{11,3 + 9,4}{2} (14,2 - 0,5 - \frac{9,4 - 3,8}{2}) = 112,85 \text{ мм}^2. \quad (63)$$

Площадь поперечного сечения паза в свету, при ширине и высоте припусков на сборку статора и ротора равной: $b_c = 0,2$ мм, $h_c = 0,2$ мм (стр. 131 [1])

$$S_{n1} = (\frac{b_1 + b_2}{2} - b_c)(h_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} - h_c) =$$

$$= (\frac{11,3 + 9,4}{2} - 0,2)(14,2 - 0,5 - \frac{9,4 - 3,8}{2}) = 108,6 \text{ мм}^2. \quad (64)$$

Находим площадь поперечного сечения корпусной изоляции при односторонней толщине корпусной изоляции равно: $b_{u1} = 0,4$ мм (стр. 131 [1])

$$S_u = b_u(2h_{n1} + b_1 + b_2) = 0,4(2 \cdot 14,2 + 11,3 + 9,4) = 19,6 \text{ мм}^2. \quad (65)$$

Находим площадь поперечного сечения паза, занимаемую обмоткой

$$S_{n1}'' = S_{n1}' - S_u = 108,6 - 19,6 = 89 \text{ мм}^2. \quad (66)$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения обмотки

$$S_{no}'' = 0,85S_{n1}'' = 0,85 \cdot 89 = 75,6 \text{ мм}^2. \quad (67)$$

Определяем количество элементарных проводников в эффективном d' диаметре элементарного изолированного провода, принимая коэффициент машинной кладки $k_n = 0,72$, выбираем число проводников $c=4$.

Тогда диаметр изолированного провода равен

$$d' = \sqrt{k_n \frac{S_{no}''}{N_{n1} \cdot c}} = \sqrt{0,72 \frac{75,6}{10 \cdot 4}} = 1,167. \quad (68)$$

Принимаем диаметр изолированного и площадь поперечного сечения неизолированной части провода ПЭТ-155 (приложение1 [1])

$$d' = 1,16 \text{ мм};$$

$$d = 1,12 \text{ мм};$$

$$S = 0,916 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки

$$S_o = S \cdot c = 0,916 \cdot 4 = 3,664 \text{ мм}^2. \quad (69)$$

Уточняем значение коэффициента заполнения паза

$$k_{\pi} = \frac{N_{n1} \cdot c \cdot d'^2}{S''_{n.o}} = \frac{10 \cdot 4 \cdot 1,16^2}{75,6} = 0,712. \quad (70)$$

Находим среднее зубцовое деление статора

$$t_{cp1} = \pi(D_1 + h_{n1})/z_1 = 3,14(183 + 14,2)/36 = 17,2 \text{ мм}, \quad (71)$$

где: D_1 - внутренний диаметр сердечника статора;

z_1 - число пазов сердечника статора;

h_{n1} - высота паза статора.

Средняя ширина катушки обмотки статора

$$b_{cp1} = t_{cp1} y_{\pi1} = 17,2 \cdot 9 = 154,9 \text{ мм}. \quad (72)$$

Средняя длина одной лобовой части обмотки

$$l_{л1} = (1,16 + 0,14p) \cdot b_{cp1} + 15 = (1,16 + 0,14 \cdot 2) \cdot 154,9 + 15 = 238 \text{ мм}. \quad (73)$$

Средняя длина витка обмотки

$$l_{cp1} = 2(l_1 + l_{л1}) = 2(167 + 238) = 810 \text{ мм},$$

(74)

где: l_1 - длина сердечника статора.

Длина вылета лобовой части обмотки

$$l_{e1} = (0,12 + 0,15p) b_{cp1} + 10 = (0,12 + 0,15 \cdot 2) 154,9 + 10 = 70,4 \text{ мм}. \quad (75)$$

Находим плотность тока в обмотке статора

$$J_1 = I_{\phi} / (S \cdot c \cdot a_1) = 22,64 / (0,916 \cdot 4 \cdot 1) = 6,18 \text{ А/мм}^2;$$

(76)

где: I_{ϕ} - значение фазного тока;

S - площадь поперечного сечения неизолированной части провода;

c – число элементарных проводников;

a_1 - количество параллельных ветвей обмотки статора.

Находим произведение $A_1 J_1$ для определения уровня удельной тепловой нагрузки

$$A_1 J_1 = 141,8 \cdot 6,18 = 876,3 \text{ A}^2/\text{см} \cdot \text{мм}^2; \quad (77)$$

где: A_1 – линейная нагрузка статора

Допустимое значение $A_1 J_1$ (рисунок 11-12 [1])

$$(A_1 J_1)_{\text{доп}} > 876,3 \text{ A}^2/\text{см} \cdot \text{мм}^2.$$

1.3. Расчет магнитной цепи.

Для построения характеристик намагничивания $\Phi = f(F_\Sigma)$ и холостого хода $E = f(F_\Sigma)$ синхронной машины производят расчет магнитной цепи на холостом ходу, который сводится к определению МДС обмотки возбуждения F_Σ при нескольких значениях магнитного потока Φ и соответствующей ему ЭДС обмотки статора.

1.3.1. Воздушный зазор.

Расчетная площадь поперечного сечения воздушного зазора

$$S_6 = \alpha' \tau (l'_1 + 2b) = 0,669 \cdot 143,7 (167 + 2 \cdot 0,7) = 16150 \text{ мм}^2; \quad (78)$$

где: b – размер воздушного зазора;

α' – расчетный коэффициент полюсной дуги;

l'_1 – расчетная длина сердечника статора.

Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_6 = \Phi \cdot 10^6 / S_6 = 10,7 \cdot 10^3 / 16150 = 0,662 \text{ Тл}. \quad (79)$$

Находим коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора, вследствие зубчатого строения статора

$$k_{61} = 1 + \frac{b_{\text{ш1}}}{t_1 - b_{\text{ш1}} + 5\delta t_1 / b_{\text{ш1}}} = 1 + \frac{3,8}{16 - 3,8 + 5 \cdot 0,7 \cdot 16 / 3,8} = 1,141; \quad (80)$$

где: t_1 - зубцовое деление по внутреннему диаметру статора;

$b_{\text{ш1}}$ - ширина шлица.

Тогда общий коэффициент воздушного зазора равен:

$$K_6 = K_{61}, K_{61} = 1,141$$

МДС для воздушного зазора

$$F_6 = 0,8K_6 B_6 \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,7 \cdot 1,141 \cdot 0,662 \cdot 10^3 = 423,2 \text{ А.} \quad (81)$$

1.3.2. МДС для зубцов статора

Расчетная площадь поперечного сечения зубцов статора

$$S_{31} = \frac{z_1 \alpha'_1 b_{31} k_c}{2p} = \frac{36 \cdot 0,669 \cdot 167 \cdot 7,1 \cdot 0,97}{2 \cdot 2} = 6942 \text{ мм}^2. \quad (82)$$

Магнитная индукция в зубце статора

$$B_{31} = \Phi \cdot 10^6 / S_{31} = 10,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 / 6,94 \cdot 10^3 = 1,541 \text{ Тл.} \quad (83)$$

Напряженность магнитного поля (приложение 9 [1]) сталь 2013 при условии

$$B_{31} \leq 1,8 \text{ Тл}$$

$$H_{31} = 7,63 \text{ А/см.}$$

Среднюю длину пути магнитного потока принимаем равной:

$$L_{31} = h_{п1} = 14,2 \text{ мм.}$$

МДС для зубцов

$$F_{31} = 0,1 H_{31} L_{31} = 0,1 \cdot 7,63 \cdot 14,2 = 10,8 \text{ А.} \quad (84)$$

1.3.3. МДС для спинки статора

Расчетная площадь поперечного сечения спинки статора

$$S_{c1} = h_{c1} l_{c1} k_c = 21,3 \cdot 167 \cdot 0,97 = 3450 \text{ мм}^2. \quad (85)$$

Расчетная магнитная индукция

$$B_{c1} = \Phi \cdot 10^6 / 2(S_{c1}) = 10,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 / (2 \cdot 3450) = 1,55 \text{ Тл.} \quad (86)$$

Находим напряженность магнитного поля (приложение 11 [1])

$$H_{c1} = 6,3 \text{ А/см.}$$

Средняя длина пути магнитного потока

$$L_{c1} = \pi(D_{н1} - h_{c1}) / 4p = 3,14(254 - 21,3) / (4 \cdot 2) = 91,4 \text{ мм.}$$

МДС для спинки статора

$$F_{c1} = 0,1 \cdot H_{c1} L_{c1} = 0,1 \cdot 6,3 \cdot 91,4 = 57,6 \text{ А.} \quad (87)$$

1.3.4. МДС для полюса.

Величина выступа полюсного наконечника

$$b''_{\text{п}} = 0,5(b'_{\text{н.п}} - b_{\text{п}}) = 0,5(81,1 - 49,9) = 15,6 \text{ мм}; \quad (88)$$

где: $b'_{\text{н.п}}$ - ширина полюсного наконечника;

$b_{\text{п}}$ - ширина сердечника полюса.

Высота широких полюсных наконечников

$$h_{\text{ш}} = h_{\text{н.п}} + \delta - \frac{b_{\text{н.п}}'^2}{4 \cdot D_1} = 18,6 + 0,7 - \frac{81,1^2}{4 \cdot 183} = 10,3 \text{ мм}; \quad (89)$$

где: $h_{\text{н.п}}$ - высота полюсного наконечника.

Расстояние между боковыми поверхностями широких пакетов смежных полюсных наконечников

$$\alpha_{\text{ш}} = \tau - b_{\text{н.п}} - \pi \cdot h_{\text{ш}} / p = 143,7 - 84 - 3,14 \cdot 10,3 / 2 = 43,5 \text{ мм}. \quad (90)$$

Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне широких полюсных наконечников

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ш}} &= \left(\frac{0,5 l_{\text{ш}} n_{\text{ш}} h_{\text{ш}}}{a_{\text{ш}}} \right) + \left(\frac{0,43 l_{\text{ш}} n_{\text{ш}} b_{\text{п}}''}{a_{\text{ш}} + b_{\text{п}}''} \right) + \left(\frac{0,43 h_{\text{н.п.}} b'_{\text{н.п.}}}{a_{\text{ш}} + 0,5 b'_{\text{н.п.}}} \right) = \\ &= \frac{0,5 \cdot 23,4 \cdot 5 \cdot 10,3}{43,5} + \frac{0,43 \cdot 23,4 \cdot 5 \cdot 15,6}{43,5 + 15,6} + \frac{0,43 \cdot 18,6 \cdot 81,1}{43,5 + 0,5 \cdot 81,1} = 34,82; \quad (91) \end{aligned}$$

где: $l_{\text{ш}}$ - длина одного пакета с широкими полюсными наконечниками;

$n_{\text{ш}}$ - число пакетов сердечника полюса с широкими полюсными наконечниками;

$b_{\text{п}}$ - ширина полюсного наконечника.

Длина пути магнитного потока в полюсе, без демпферной обмотки

$$L_{\text{п}} = h'_{\text{п}} + 0,7 h_{\text{н.п}} = 39,05 + 0,7 \cdot 18,6 = 52,1 \text{ мм}; \quad (92)$$

где: $h'_{\text{п}}$ - предварительная высота полюсного сердечника;

$h_{\text{н.п}}$ - высота полюсного наконечника.

Высота узких полюсных наконечников

$$h_y = h_{н.п} + \delta - \frac{b_{п}^2}{4D_1} = 18,6 + 0,7 - \frac{49,9^2}{4 \cdot 183} = 15,9 \text{ мм.} \quad (93)$$

Находим расстояние между боковыми поверхностями узких пакетов смежных полюсных наконечников

$$a_y = \tau - b_{п} - \frac{\pi h_y}{p} = 143,7 - 49,9 - 3,14 \cdot 15,9 / 2 = 68,9 \text{ мм.} \quad (94)$$

Находим коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне узких пакетов полюсных наконечников

$$\lambda_y = 0,5n_Y l_y h_y / a_y = 0,5 \cdot 3 \cdot 10,02 \cdot 15,9 / 68,9 = 3,465; \quad (95)$$

где: n_Y – число пакетов сердечника полюса с узкими полюсными наконечниками;

l_y - длина одного пакета с узкими наконечниками.

Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне крайних пакетов полюсных наконечников

$$\lambda_{кр} = 2l_{кр} h_y / a_y = 2 \cdot 10,02 \cdot 15,9 / 68,9 = 4,62. \quad (96)$$

Суммарный коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния полюсных наконечников

$$\lambda_{н.п} = \lambda_{ш} + \lambda_y + \lambda_{кр} = 34,82 + 3,465 + 4,62 = 42,905. \quad (97)$$

Далее находим коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния по сердечникам полюсов

$$\lambda_{п.с.} = \frac{55 \cdot h'_{п}}{\tau - b_{п} - (h'_{п} + 2h_{н.п.} + 2\delta) \cdot \pi / 2p} =$$

$$= \frac{55 \cdot 39,05}{143,7 - 49,9 - (39,05 + 2 \cdot 18,6 + 2 \cdot 0,7) \cdot 3,14 / 2 \cdot 2} = 65,28. \quad (98)$$

Находим коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния по торцам полюсов

$$\lambda_{п.в.} = 37 \frac{b_{п}}{l_{п}} = 37 \frac{49,9}{167} = 11,05. \quad (99)$$

Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния полюсов

$$\lambda_{п} = \lambda_{н.п.} + \lambda_{п.с.} + \lambda_{п.в.} = 42,905 + 65,28 + 11,05 = 119,23. \quad (100)$$

МДС для статора и воздушного зазора

$$F_{\text{бзс}} = F_{\text{б}} + F_{\text{з1}} + F_{\text{с1}} = 423,2 + 10,8 + 57,6 = 491,6 \text{ А.} \quad (101)$$

Магнитный поток рассеяния полюсов

$$\Phi_{\sigma} = 4\lambda_n l_{\text{н.п}} F_{\text{бзс}} \cdot 10^{-11} = 4 \cdot 119,23 \cdot 167 \cdot 491,6 \cdot 10^{-11} = 3,915 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.} \quad (102)$$

Коэффициент рассеяния магнитного потока

$$\sigma = 1 + \Phi_{\sigma} / \Phi = 1 + 3,915 \cdot 10^{-4} / 0,011 = 1,037. \quad (103)$$

Расчетная площадь поперечного сечения сердечника полюса

$$S_{\text{п}} = k_{\text{с}} l_{\text{п}} b_{\text{п}} = 0,97 \cdot 167 \cdot 49,9 = 8,07 \cdot 10^3 \text{ мм}^2. \quad (104)$$

Магнитный поток в сердечнике полюса

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi + \Phi_{\sigma} = 0,011 + 3,915 \cdot 10^{-4} = 0,0111 \text{ Вб.} \quad (105)$$

Магнитная индукция в сердечнике полюса

$$B_{\text{п}} = \Phi_{\text{п}} / (S_{\text{п}} \cdot 10^{-6}) = 0,0111 / (8077 \cdot 10^{-6}) = 1,373 \text{ Вб.} \quad (106)$$

Напряженность магнитного поля в сердечнике полюса (приложение 5 [1])

$$H_{\text{п}} = 2,7 \text{ А/см.}$$

МДС для полюса

$$F_{\text{п}} = 0,1 \cdot L_{\text{п}} \cdot H_{\text{п}} = 0,1 \cdot 52,1 \cdot 2,7 = 14,1 \text{ А.} \quad (107)$$

где: $L_{\text{п}}$ - длина пути магнитного потока в полюсе.

1.3.5. МДС для спинки ротора.

Расчетная площадь поперечного сечения спинки ротора

$$S_{\text{с2}} = l_2 h'_{\text{с2}} k_{\text{с}} = 167 \cdot 33,2 \cdot 0,97 = 5372 \text{ мм}^2; \quad (108)$$

где: $h'_{\text{с2}}$ - расчетная высота спинки ротора с учетом прохождения части магнитного потока по валу;

l_2 - длина сердечника ротора.

Среднее значение индукции в спинке ротора

$$B_{\text{с2}} = \sigma \Phi \cdot 10^6 / (2S_{\text{с2}}) = 1,037 \cdot 17 \cdot 0,011 \cdot 10^6 / (2 \cdot 5372) = 1,032 \text{ Тл.} \quad (109)$$

Напряженность магнитного поля в спинке ротора (приложение 5 [1])

$$H_{\text{с2}} = 1,214 \text{ А/см.}$$

Находим среднюю длину пути магнитного потока в спинке ротора

$$L_{\text{с2}} = [\pi(D_2 + 2h_{\text{с2}}) / (4p)] + 0,5h'_{\text{с2}} = 3,14(56 + 2 \cdot 4,9) / (4 \cdot 2) + 0,5 \cdot 32,2 = 42,6 \text{ мм;} \quad (110)$$

где: h_{c2} - высота спинки ротора;

D_2 - внутренний диаметр сердечника ротора.

МДС для спинки ротора

$$F_{c2} = 0,1 \cdot L_{c2} \cdot H_{c2} = 0,1 \cdot 42,6 \cdot 1,2214 = 4,9 \text{ А.} \quad (111)$$

1.3.6. Воздушный зазор в стыке полюса.

Находим зазор в стыке

$$\delta_{п2} = 2l_{п} \cdot 10^{-4} + 0,1 = 2 \cdot 167 \cdot 10^{-4} + 0,1 = 0,13 \text{ мм.} \quad (112)$$

МДС для зазора в стыке между сердечником полюса и полюсным наконечником

$$F_{п2} = 0,8 \delta_{п2} B_{п} \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,13 \cdot 1,373 \cdot 10^3 = 102,5 \text{ А.} \quad (113)$$

Суммарная МДС для полюса и спинки ротора

$$F_{пс} = F_{п} + F_{c2} + F_{п2} = 14,1 + 4,9 + 102,5 = 121,5 \text{ А.} \quad (114)$$

1.3.7. Общие параметры магнитной цепи.

Суммарная МДС магнитной цепи на один полюс

$$F_{\Sigma} = F_{бзс} + F_{п} + F_{c2} + F_{п2} = 491,6 + 14,1 + 4,9 + 102,5 = 613,1 \text{ А.} \quad (115)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_{нас} = F_{\Sigma} / (F_{\sigma} + F_{п2}) = 613,1 / (423,2 + 102,5) = 1,17. \quad (116)$$

Для построения характеристик намагничивания и характеристик холостого хода проведем расчет магнитной цепи для нескольких значений магнитного потока в воздушном зазоре, в пределах от 0,5 Ф до 1,3 Ф. Результаты этих расчетов представим в виде таблицы 1.

Таблица 1- Характеристики намагничивания и холостого хода.

| Ф, Е о.е. | 0,5 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ф Вб | 0,00517 | 0,01035 | 0,01138 | 0,01200 | 0,01345 |
| Е В | 66 | 133 | 146 | 159 | 172 |

| | В Тл | Н А/см | F А |
|---|---------|-----------|--------|---------|-----------|--------|---------|-----------|--------|---------|-----------|--------|---------|-----------|--------|
| Зазор между сердечником статора и полюсным наконечником | 0,3 | 0 | 256 | 0,6 | 0 | 503 | 0,6 | 0 | 603 | 0,7 | 0 | 754 | 0,8 | 0 | 1206 |
| Зубцы статора | 0,9 | 2,5 | 4,8 | 1,8 | 8,1 | 16 | 1,9 | 12 | 24 | 2,1 | 20 | 38 | 2,3 | 32 | 61 |
| Спинка статора | 0,8 | 1,2 | 13 | 1,5 | 7,5 | 78 | 1,7 | 16 | 165 | 1,8 | 40 | 417 | 2 | 60 | 620,1 |
| Сердечник полюса | 0,7 | 0,8 | 14 | 1,3 | 4,6 | 28 | 1,5 | 19 | 33 | 1,7 | 75 | 42 | 1,9 | 244 | 66,75 |
| Зазор в стыке полюса и полюсного наконечника | 0,7 | 0 | 50 | 1,3 | 0 | 100 | 1,5 | 0 | 110 | 1,6 | 0 | 123 | 1,9 | 0 | 137,5 |
| Спинка ротора | 0,5 | 0,6 | 2,6 | 1 | 1 | 4,4 | 1,1 | 1,1 | 4,9 | 1,3 | 1,3 | 5,6 | 1,4 | 1,8 | 7,93 |

Далее построим характеристики холостого хода: данной синхронной машины и идеальной (пунктирная линия). Как видно из приложения А, расхождение идеальной от расчетной характеристик не превышает 15%.

1.4. Активное и индуктивное сопротивление обмотки статора для установившегося режима.

Находим активное сопротивление обмотки фазы при 20°C

Удельная электрическая проводимость $\rho_{м20} = 57 \frac{\text{см}}{\text{мкм}}$

$$r_1 = \frac{\omega_1 l_{cp1}}{\rho_{м20} a_1 c S \cdot 10^3} = \frac{60 \cdot 810}{57 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,916 \cdot 10^3} = 0,233 \text{ Ом}; \quad (117)$$

где: c - число элементарных проводников;

ω_1 - число витков обмотки статор а;

l_{cp} - средняя длина витка обмотки;

S - площадь поперечного сечения неизолированной части провода;

a_1 - число параллельных ветвей обмотки статора.

Активное сопротивление в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 I_\phi / U_1 = 0,233 \cdot 22,6 \cdot \sqrt{3} / 230 = 0,04 \text{ о.е.} \quad (118)$$

Проверка правильности определения r_{1*}

$$r_{1*} = \frac{\pi D_1 (A_1 J_1) l_{cp1}}{114 \cdot 10^4 m_1 U_1 I_\phi} = \frac{3,14 \cdot 183 \cdot 253 \cdot 5,86 \cdot 810}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 230 \cdot 22,6} = 0,023 \text{ о.е.} \quad (119)$$

Размеры паза статора по выполненным расчетам и по (таблица 9-21 [1])

$$b_2 = 9,41 \text{ мм}, b_{ш1} = 3,8 \text{ мм}, h_{ш1} = 0,5 \text{ мм}, h_{к1} = 1 \text{ мм}, h_2 = 0,6 \text{ мм},$$

$$h_{н1} = 14,2 \text{ мм}$$

Высота обмотки

$$h_1 = h_{н1} - h_{ш1} - h_{к1} - h_2 = 14,2 - 0,5 - 1 - 0,6 = 12,1 \text{ мм}. \quad (120)$$

Находим коэффициенты, учитывающие укорочение шага при $\beta=1$

$$k_{\beta1} = 0,4 + 0,6\beta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot 1 = 1; \quad (121)$$

$$k'_{\beta1} = 0,2 + 0,8\beta_1 = 0,2 + 0,8 \cdot 1 = 1. \quad (122)$$

Коэффициент проводимости рассеяния для трапецеидального полузакрытого паза

$$\begin{aligned} \lambda_{п1} &= \frac{h_1}{3b_2} k_{\beta1} + \left(\frac{3h_{к1}}{b_2 + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} + \frac{h_2}{b_2} \right) k'_{\beta1} = \\ &= \frac{12,1}{3 \cdot 9,41} \cdot 1 + \left(\frac{3 \cdot 1}{9,41 + 2 \cdot 3,8} + \frac{0,5}{3,8} + \frac{0,6}{9,41} \right) \cdot 1 = 0,801. \end{aligned} \quad (123)$$

Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1}{l_1} (l_{л1} - 0,64\beta\tau_1) = 0,34 \frac{3}{167} (218 - 0,64 \cdot 1 \cdot 143,7) = 0,89, \quad (124)$$

где: $l_{л1}$ - средняя длина одной лобовой части обмотки;

τ - полюсное деление статора;

q_1 - количество пазов на полюс и фазу;

l_1 - длина сердечника статора.

Коэффициент зубцовой зоны статора

$$k_{зб} = \frac{b_{ш1}}{\delta k_{\delta}} = \frac{3,8}{0,7 \cdot 1,141} = 4,75. \quad (125)$$

где: k_{δ} - общий коэффициент воздушного зазора;

δ - размер воздушного зазора;

$b_{ш1}$ - ширина шлица.

Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора на магнитную проницаемость рассеяния между коронками зубцов (рисунок 11-16 [1])

$$k_K = 0,03$$

Коэффициент проводимости рассеяния между коронками зубцов

$$\lambda_K = 0,04 + k_K + 0,07 \sqrt{\frac{t_1 - b_{ш1}}{b_{ш1}}} = 0,04 + 0,03 + 0,07 \sqrt{\frac{16 - 3,8}{3,8}} = 0,195; \quad (126)$$

где: t_1 - зубцовое деление по внутреннему диаметру статора

Определяем суммарный коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1} + \lambda_K = 0,801 + 0,89 + 1,3 + 0,195 = 3,09. \quad (127)$$

Находим индуктивное сопротивление обмотки статора

$$x_{\sigma} = 1,58 f l_1 w^2 \lambda_1 / (p q_1 \cdot 10^8) = 1,58 \cdot 50 \cdot 167 \cdot 60^2 \cdot 3,09 / (2 \cdot 3 \cdot 10^8) = 0,245 \text{ Ом}; \quad (128)$$

где: f – частота;

l_1 – длина сердечника магнитопровода статора;

w – число витков обмотки статора;

p – число полюсов.

Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора

$$x_{\sigma^*} = x_{\sigma} I_{\phi} / U_1 = 0,245 \cdot 22,6 \cdot \sqrt{3} / 230 = 0,042 \text{ о.е.} \quad (129)$$

Проверка правильности определения x_{σ^*}

$$x_{\sigma^*} = \frac{0,39(D_1 A_1)^2 l_1 \lambda_1 10^{-7}}{m_1 U_1 I_1 z_1} = \frac{0,39(183 \cdot 160)^2 \cdot 167 \cdot 3,09 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 132,8 \cdot 22,6 \cdot 36} = 0,042 \text{ о.е.}$$

(130)

1.5. Расчет магнитной цепи при нагрузке.

Для определения потока рассеяния полюсов при нагрузке используем частичные характеристики намагничивания $\Phi = f(F_{бзс})$, $\Phi_{\sigma} = f(F_{бзс})$, $\Phi_{п} = f(F_{п2})$ (о.е.), приведенные в приложении Б.

Для заданного режима нагрузки (номинального) построим векторную диаграмму Blondеля приведенная в приложении В, из которой определяем значения:

$$E_{\delta} = 1,026 \text{ о.е.}, \phi = 36,87 \text{ о.е.}, U'_1 = 1 \text{ о.е.}, I'_1 = 1 \text{ о.е.}$$

Далее по рисунку в приложении Б, находим значение F_{δ} и $F_{\delta_{\text{зс}}}$ зная значение E_{δ} ЭДС, индуцированная магнитным потоком воздушного зазора:

МДС для воздушного зазора

$$F_{\delta} = 0,79 \text{ о.е.};$$

МДС для магнитной цепи воздушного зазора и статора

$$F_{\delta_{\text{зс}}} = 0,86 \text{ о.е.}$$

Поправочные коэффициенты, учитывающие насыщение магнитной цепи (рисунок 11-7 [1])

$$x_d = 0,97; x_q = 0,71; k_{qd} = 0,0035.$$

Коэффициенты реакции якоря (таблица 11-4 [1])

$$k_{ad} = 0,88; k_{aq} = 0,29.$$

Коэффициент формы поля реакции якоря

$$k_{\text{фа}} = 1,05.$$

Амплитуда МДС обмотки статора

$$F_a = 0,45 m_1 w_1 k_{\text{об1}} I_{\text{ф}} k_{\text{фа}} / p = 0,45 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 0,89 \cdot 22,6 \cdot 1,05 / 2 = 924 \text{ А}; \quad (131)$$

где: m_1 - число фаз;

w_1 - число витков обмотки статора;

$k_{\text{об1}}$ - обмоточный коэффициент;

I_{δ} - значение фазного тока.

Амплитуда МДС обмотки статора в относительных единицах

$$F_{a^*} = \frac{F_a}{F_{\Sigma}} = \frac{924}{613,07} = 1,51 \text{ о.е.} \quad (132)$$

Поперечная составляющая МДС реакции якоря, с учетом насыщения, отнесенная к обмотке возбуждения

$$F_{aq} / \cos \psi = x_q k_{aq} F_{a^*} = 0,71 \cdot 0,88 \cdot 1,51 = 0,57 \text{ о.е.} \quad (133)$$

ЭДС обмотки статора, обусловленная действием МДС (рисунок 11-18 [1])

$$E_{aq} / \cos \psi = 0,44 \text{ о.е.} \quad (134)$$

Направление вектора ЭДС $E_{\delta d}$, определяемое построением вектора $E_{aq}/\cos\psi$ (рисунок 11-18 [1])

$$\psi=51,7^\circ; \cos\psi=0,99; \sin\psi=0,12.$$

Продольная МДС реакции якоря с учетом влияния поперечного поля

$$\begin{aligned} F'_{ad} &= x_d k_{ad} F_a^* \sin\psi + k_{qd} F_a^* \cos\psi \cdot \tau \alpha' / \delta = \\ &= 0,97 \cdot 0,88 \cdot 1,51 \cdot 0,12 + 0,0035 \cdot 1,51 \cdot 0,99 \cdot 143,7 \cdot 0,7 / 0,7 = 1,459 \text{ о.е.} \end{aligned} \quad (135)$$

Строим вектор продольной составляющей ЭДС на векторной диаграмме Блонделя (рисунок 11-18 [2])

$$E_{\delta d} = \Phi_{\delta d} = 0,99 \text{ о.е.}$$

Зная $E_{\delta d}$ по рисунку определяем МДС по продольной оси, необходимое для создания ЭДС (рисунок 11-18 [2])

$$F_{\delta d}^* = 0,801 \text{ о.е.}$$

Результирующая МДС по продольной оси

$$F_{\delta a}^* = F_{\delta d}^* + F'_{ad} = 0,801 + 1,459 = 2,261 \text{ о.е.} \quad (136)$$

Магнитный поток рассеяния при действии МДС F'_{ad} находим по рисунку по зависимости $\Phi = f(F_{\delta zc})$

$$\Phi_{\sigma}^* = 0,103 \text{ о.е.}$$

Результирующий магнитный поток

$$\Phi_{\pi}^* = \Phi_{\delta d}^* + \Phi_{\sigma}^* = 0,99 + 0,23 = 1,103 \text{ о.е.} \quad (137)$$

МДС, необходимая для создания магнитного потока Φ_{π}^* находим по рисунку по $\Phi_{\pi} = f(F_{\delta zc})$ (рисунок 11-18 [2])

$$F_{\pi c} = 0,212 \text{ о.е.}$$

Находим МДС обмотки возбуждения при нагрузке

$$F_{\pi \text{ и}^*} = F_{\delta a}^* + F_{\pi c} = 2,261 + 0,212 = 2,473 \text{ о.е.} \quad (138)$$

Находим МДС обмотки возбуждения при нагрузке в А

$$F_{\pi \text{ н}} = F_{\pi \text{ и}^*} \cdot F_{\Sigma} = 2,473 \cdot 613,1 = 1516 \text{ А;} \quad (139)$$

где: F_{Σ} - суммарная МДС магнитной цепи на один полюс.

1. 6. Обмотка возбуждения.

Самым распространенным способом создания основного магнитного потока синхронных генераторов является электромагнитное возбуждение, его суть в том, что на полюсах ротора располагают обмотку возбуждения, при прохождении по обмотке возбуждения постоянного тока, возникает МДС, создающая в генераторе магнитное поле. В случае, когда дополнительную обмотку выполняют так же как и основную, напряжение на ее зажимах U_d может быть рассчитано по соотношению витков W_d и W_1 . На обмотку возбуждения напряжение подается через контактные кольца и металлографитные щетки марки МГ4. В связи с наличием щеточного контакта при нахождении напряжения возбуждения должно быть учтено падение напряжения в щеточном контакте $U_{щ}=2$ В

Питание обмотки возбуждение независимое, на напряжение

$$U_d = 36 \text{ В.}$$

Предварительная средняя длина витка обмотки возбуждения

$$l'_{\text{ср.п}} = 2,5(l_{\text{п}} + b_{\text{п}}) = 2,5(167 + 49,9) = 542,2 \text{ мм}; \quad (140)$$

где: $l_{\text{п}}$ - полная длина полюса;

$b_{\text{п}}$ - ширина сердечника полюса.

Предварительная площадь поперечного сечения проводника обмотки возбуждения при температурном коэффициенте (таблица 4-1 [1]) $m_m = 1,38$

$$S' = \frac{1,15 \cdot m_m \cdot 2pF_{\text{п.п}} l'_{\text{ср.п}}}{57(U_d - 2)10^3} = \frac{1,15 \cdot 1,38 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1516 \cdot 542,2}{57(36 - 2) \cdot 10^3} = 2,69 \text{ мм}^2.$$

(141)

Выбираем предварительную плотность тока в обмотке возбуждения

$$J'_{\text{п}} = 7,5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Находим предварительное количество витков одной полюсной катушки

$$w'_{\text{п}} = \frac{1,15F_{\text{п.п}}}{J'_{\text{п}} S'} = \frac{1,15 \cdot 1516}{7,5 \cdot 2,69} = 86,3. \quad (142)$$

Выбираем $w'_{\text{п}} = 86$ витков

Далее находим расстояние между катушками смежных полюсов, при наименьшем расстоянии между катушками ($h < 280$ мм) $a_{oon} = 7$ мм

$$a_k = \frac{l_i \tau}{h_i' 10^3} + \dot{a}_{\dot{a}i i} = \frac{167 \cdot 143,7}{39,05 \cdot 10^3} + 7 = 7,6 \text{ мм}; \quad (143)$$

где: h_i' - высота полюсного сердечника;

l_i - полная длина полюса;

τ - полюсное деление статора.

По таблице 10-14[1] принимаем изолированный медный провод марки ПЭТ-155 (класс нагревостойкости изоляции F) круглого сечения с двухсторонней изоляцией 0,15 мм, катушка многослойная.

Рассчитаем предварительный диаметр обмотки возбуждения

$$d_n' = \sqrt{4 \frac{S'}{\pi}} = \sqrt{4 \cdot \frac{2,38}{\pi}} = 1,74 \text{ мм} \quad (144)$$

Далее принимаем ближайший стандартный диаметр по [2]

$$d_n = 1.825 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения проводника (приложение 2)[1]

$$S = 2,38 \text{ мм}^2.$$

Предварительное наибольшее количество витков в одном слое,

$$\text{при } h_{np} = 2 \cdot 0,2$$

$$N_B' = \frac{h_n' - h_{np}}{1,05 d_p'} = \frac{39,05 - (2 \cdot 0,2)}{1,05 \cdot 1,74} = 21,2 \quad (145)$$

Предварительное количество слоев обмотки по ширине полюсной катушки

$$N_{ш}' = \frac{w_n'}{N_B'} = \frac{86}{21,2} = 4,1. \quad (146)$$

Выбираем $N_{ш} = 4$ слоя обмотки по ширине полюсной катушки по 21 витку

Уточненное количество витков одной полюсной катушки

$$w_n = 84.$$

Размер полюсной катушки по ширине

$$b_{к.п} = 1,05N_{III}d'_n = 1,05 \cdot 4 \cdot 1,74 = 7,3 \text{ мм.} \quad (147)$$

Размер полюсной катушки по высоте

$$h_{к.п} = 1,05N_B d'_n = 1,05 \cdot 21 \cdot 1,825 = 38,4 \text{ мм.} \quad (148)$$

Средняя длина витка катушки

$$l_{ср.п} = 2(l_n + b_{п.п}) + \pi(b_k + 2(b_3 + b_n)) = 2(167 + 50) + 3,14(7,3 + 7) = 472 \text{ мм.} \quad (149)$$

Ток возбуждения при номинальной нагрузке

$$I_{п.н} = F_{п.н} / w_{п.н} = 1516 / 84 = 18,1 \text{ А.} \quad (150)$$

Количество параллельных ветвей в цепи обмотки возбуждения

$$a_{п.н} = 1.$$

Уточненная плотность тока в обмотке возбуждения

$$J_{п.н} = I_{п.н} / (a_{п.н} S) = 18,1 / (1 \cdot 2,38) = 7,58 \text{ А/мм}^2. \quad (151)$$

Общая длина всех витков обмотки возбуждения

$$L_{п.н} = 2pw_{п.н} l_{ср.п} \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 84 \cdot 472 \cdot 10^{-3} = 159 \text{ м.} \quad (152)$$

Масса меди обмотки возбуждения

$$m_{м.п.н} = 8,9L_{п.н} S'_n \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 158,7 \cdot 2,38 \cdot 10^{-3} = 3,4 \text{ кг.} \quad (153)$$

Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20° С

$$r_{п.н} = L_{п.н} / (\rho_{m20} a_{п.н} S) = 492 / (57 \cdot 1 \cdot 5,622) = 1,367 \text{ Ом.} \quad (154)$$

Где $\rho_{m20} = 57 \frac{\text{см}}{\text{МКМ}}$ - удельное сопротивление меди при температуре 20° С .

Максимальный ток возбуждения

$$I_{п.н.макс} = U_{п.н} - 2 / (r_{п.н} m_t) = (36 - 2) / (1,17 \cdot 1,38) = 21,2 \text{ А.} \quad (155)$$

m_t — температурный коэффициент, принимаемый по табл. 4-1

Коэффициент запаса возбуждения

$$k_{з.в.} = I_{п.н.макс} / I_{п.н} = 21,2 / 18,05 = 1,17. \quad (156)$$

Номинальная мощность возбуждения

$$P_{п.н} = (U_d - 2) I_{п.н.макс} = (36 - 2) 21,2 = 136 \text{ Вт.}$$

В этой части расчета рассчитаем количество витков и количество слоев обмотки возбуждения. Выбираем 84 витка и 4 слоя для обмотки возбуждения. Коэффициент запаса возбуждения находится в пределах (1...1,5).

1.7. Параметры обмоток и постоянные времени. Сопротивления обмоток статора при установившемся режиме.

Параметры обмоток синхронных машин это их активные и индуктивные сопротивления, выраженные в физических или относительных единицах. Определение параметров статора и ротора необходимо для расчета номинальных параметров и рабочих характеристик синхронной машины в установившихся симметричных и несимметричных режимах, а также переходных процессах.

1.7.1. Сопротивления обмоток статора при установившемся режиме.

Находим коэффициент продольной реакции якоря (таблица 11.4 [1])

$k_{ad}=0,88$.

Коэффициент насыщения при

$$K_{нас(0,5)} = \frac{0,5F_{\Sigma}}{F_{\delta} + F_{п2}} = \frac{291,2}{423,2 + 51,2} = 1,09, \quad (157)$$

где F_{Σ} - суммарная МДС якоря.

МДС для воздушного зазора при $E = 1$ (о. е.)

$F_{\delta(1)}=423,2$ о.е.

МДС для воздушного зазора

Индуктивное сопротивление продольной реакции якоря

$$X_{ad*} = \frac{k_{ad} F_a}{K_{нас(0,5)} F_{\delta(1)}} = \frac{0,88 \cdot 924,3}{1,09 \cdot 423,2} = 1,76 \text{ о.е.} \quad (158)$$

Коэффициент поперечного реакции якоря (таблица 11.4 [1])

$k_{aq}=0.29$.

Индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря

$$x_{aq*} = \frac{0.5k_{aq}(1+k_{\delta})F_a}{k_{нас(0,5)}F_{\delta(1)}} = \frac{0,5 \cdot 0,29 \cdot (1+1,14)924,3}{1,09 \cdot 423,2} = 0,622 \text{ о.е.} \quad (159)$$

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси (11.164)

$$x_{d*} = x_{ad*} + x_{\sigma*} = 1,76 + 0,042 = 1,804 \text{ о.е.} \quad (160)$$

Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси (11.165)

$$x_{q*} = x_{aq*} + x_{\sigma*} = 0,622 + 0,042 = 0,663 \text{ о.е.} \quad (161)$$

1.7.2. Сопротивление обмотки возбуждения.

Активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к обмотке статора

$$r_{п*} = \frac{3,6m_{т}F_{ан}k_{ад}^2 l_{ср.п}}{10^6 \Phi f w_{п} S'_{п}} = \frac{3,6 \cdot 1,38 \cdot 924,3 \cdot 0,88^2 \cdot 472,4}{10^6 \cdot 0,011 \cdot 50 \cdot 84} = 0,0157 \text{ о.е.} \quad (162)$$

Коэффициент магнитной проводимости потоков рассеяния обмотки возбуждения

$$\lambda_{п\Sigma} = \lambda_{пп} + 0,65\lambda_{пс} + 0,38\lambda_{пв} = 35,5 + 0,65 \cdot 106,5 \cdot 0,38 \cdot 8,4 = 89,53 \quad (163)$$

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения

$$\begin{aligned} x_{п*} &= 1,27k_{ад}x_{ад*} \left(1 + \frac{4k_{нас(0,5)}F_{\delta}l_{п}\lambda_{п\Sigma}}{\Phi \cdot 10^{11}} \right) = \\ &= 1,27 \cdot 0,88 \cdot 1,76 \left(1 + \frac{4 \cdot 1,09 \cdot 423,2 \cdot 167 \cdot 89,5}{0,011 \cdot 10^{11}} \right) = 2,02 \text{ о.е.} \end{aligned} \quad (164)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{п\sigma*} = x_{п*} - x_{ад*} = 2,02 - 1,762 = 0,258 \text{ о.е.} \quad (165)$$

1.7.3. Переходные и сверхпереходные сопротивления обмотки статора.

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси

$$x'_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{ад*}x_{п\sigma*}}{x_{ад*} + x_{п\sigma*}} = 0,042 + \frac{1,76 \cdot 0,258}{1,76 + 0,258} = 0,042 \text{ о.е.} \quad (166)$$

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси

$$x'_{q^*} = x_{q^*} = 0,663 \text{ о.е.}$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси

$$x''_{d^*} = x_{d^*} = 0,267$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси

$$x''_{q^*} = x_{q^*} = 0,663$$

1.7.4. Сопротивления для токов обратной и нулевой последовательности.

Индуктивное сопротивление обмотки статора для токов обратной последовательности при работе машины на малое внешнее сопротивление

$$x_{2^*} = \sqrt{x''_{d^*} x''_{q^*}} = \sqrt{0,267 \cdot 0,663} = 0,421 \text{ о.е.} \quad (167)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора для токов обратной последовательности при большом внешнем индуктивном сопротивлении

$$x_{2^*} = 0,5(x''_{d^*} + x''_{q^*}) = 0,5(0,267 + 0,663) = 0,465 \text{ о.е.} \quad (168)$$

Индуктивное сопротивление двухслойной обмотки статора для токов нулевой последовательности

здесь b_{i1} — ширина паза [при трапецеидальных пазах принимают $b_{n1} = 0,5(b_1 + b_2)$], мм; $h_4 = 5$ мм — высота верхней части паза, не занятая обмоткой; коэффициент $C = 0,355$ (при наличии демпферной обмотки) и $C = 0,71$ (при отсутствии демпферной обмотки).

$$\begin{aligned} x'_0 &= \frac{1,11 F_a}{10^9 \Phi q_1 k_{y1}^2} \left[(\beta_1 - 0,555) \frac{h_{n1}}{b_{n1}} + (3\beta_1 - 2) \cdot \frac{h_4}{b_{n1}} \right] + \\ &+ C \frac{F_a (3\beta_1 - 2)}{F_\delta k_{y1}^2} \cdot \left[0,39 \left(\beta_1 - \frac{2}{3} \right) - \left(\beta_1 - \frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3q_1} \right)^2 + 0,037 \right] = \\ &= \frac{1,1 \cdot 167 \cdot 924,3}{10^9 \cdot 0,11 \cdot 3 \cdot 1} \left[(1 - 0,555) 1,37 + (3 \cdot 1 - 2) \frac{5}{10,4} \right] + \\ &+ 0,71 \frac{924,3 (3 \cdot 1 - 2)}{423 \cdot 1} \cdot \left[0,39 \left(1 - \frac{2}{3} \right) - \left(1 - \frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot 3} \right)^2 + 0,037 \right] = 0,112 \text{ о.е.} \end{aligned} \quad (168)$$

Активное сопротивление обмотки фазы статора для тока нулевой последовательности при рабочей температуре

$$r_{0*} = r_{1*(20)} \cdot m_T = 0,023 \cdot 1,38 = 0,032 \text{ о.е.} \quad (169)$$

1.7.5. Постоянные времени обмоток.

Обмотка возбуждения при разомкнутых обмотках статора

$$T_{d0} = x_{a*} / \omega_1 r_{п*} = 2,02 / 60 \cdot 0,016 = 2,14 \text{ ,с.} \quad (170)$$

Обмотка возбуждения при замкнутых обмотках статора

$$T'_d = T_{d0} x_{d*} / x_{d*} = 2,14 \cdot 0,148 = 0,2 \text{ ,с.} \quad (171)$$

Обмотка статора при короткозамкнутых обмотках ротора

$$T_a = x_{2*} / \omega_1 r_{1*} = 0,421 / (60 \cdot 0,023) = 0,305 \text{ с.} \quad (172)$$

1.8. Потери и КПД

Основные потери в стали это потери вызванные основным магнитным потоком (они не зависят от величины тока) и возникающие в спинке P_{c1} и зубцах P_{z1} статора. Добавочные потери х. х. в стали состоят из поверхностных потерь в полюсных наконечниках явнополюсных синхронных машин и вызываются колебаниями поля в их поверхностном слое из-за зубчатой конструкции статора. Магнитное поле колеблется с частотой $f_3 = z_1 n / 60$. Эти потери зависят от амплитуды колебаний индукции B_0 которая возрастает с уменьшением зазора δ , с увеличением открытия паза, частоты колебаний f_3 , толщины листов из которых собраны полюсные наконечники, от их магнитной проницаемости и удельного сопротивления).

Расчетная масса стали зубцов статора

$$m_{z1} = 7,8 z_1 b_{z1cp} h_{n1} l_{k_c} 10^{-6} = 7,8 \cdot 36 \cdot 7,136 \cdot 14,2 \cdot 157 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 4,61 \text{ кг.}$$

(173)

Магнитные потери в зубцах статора

$$P_{z1} = 4,4 B_{z1cp}^2 m_{z1} = 4,4 \cdot 1,55^2 \cdot 4,67 = 48 \text{ Вт.} \quad (174)$$

Масса стали спинки статора

$$m_{cl} = 7.8\pi(D_{н1} - h_{cl})h_{cl}l_k k_c 10^{-6} = 7,8 \cdot 3,14(254 - 21,3)21,3 \cdot 157 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 19,7 \text{ кг.} \quad (175)$$

Магнитные потери в спинке статора

$$P_{c1} = 4.4 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = 4,4 \cdot 1.55^2 \cdot 19,7 = 208 \text{ Вт.} \quad (176)$$

Амплитуда колебаний индукции

$$B_0 = \beta_0 \cdot k_6 \cdot B_6 = 0,35 \cdot 1,14 \cdot 0,66 = 0,3 \text{ Тл.} \quad (177)$$

Здесь β_0 - коэффициент, зависящий от отношения $b_{ш} / \delta$: [1.Рис 9.10]

Среднее значение удельных поверхностных потерь

$$p_{пов} = k_0(z_1 \cdot n_1 \cdot 10^{-4})^{1.5} (0.1 \cdot B_0 \cdot t_1)^2 = 1,8(36 \cdot 1500 \cdot 10^{-4})^{1.5} (0,1 \cdot 0,25 \cdot 15,97)^2 = 3,6 \text{ Вт/м}^2. \quad (178)$$

Коэффициент k_0 выбирают по таблице 11.3 [1]

$$k_0 = 1,8$$

Поверхностные потери машины

$$P_{пов} = 2p \cdot \tau \cdot \alpha \cdot l_{п} \cdot p_{пов} \cdot k_{п} \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 143,7 \cdot 0,585 \cdot 157 \cdot 3,6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,201 \text{ Вт.} \quad (179)$$

$k_{п} = 1$ в зависимости от формы полюсного наконечника [1, с.369]

Суммарные магнитные потери

$$P_{с\Sigma} = P_{c1} + P_{31} + P_{пов} = 208 + 48,15 + 0,2 = 256,3 \text{ Вт.} \quad (180)$$

Потери в обмотке статора

$$P_{M1} = m_1 I_1^2 r_1 m_T + m_1 (\Gamma_{пн} / \sqrt{3})^2 r_d m_T = 3 \cdot 22,6^2 \cdot 0,233 \cdot 1,38 + 3(22,6 / \sqrt{3})^2 0,233 \cdot 1,38 = 598,7 \text{ Вт.} \quad (181)$$

Потери на возбуждение синхронной машины при питании от дополнительной обмотки статора

$$P_{п} = \Gamma_{пн}^2 r_{п} m_m + 2I_{пн} = 22,6^2 \cdot 0,233 \cdot 1,367 \cdot 1,38 + 2 \cdot 22,6 = 417 \text{ Вт.} \quad (182)$$

Добавочные потери в обмотке статора и стали магнитопровода при нагрузке

$$P_{доб} = 0,005 P_{п} = 0,005 \cdot 30000 = 50 \text{ Вт.} \quad (183)$$

Потери на трение в подшипниках и на вентиляцию

$$P'_{мх} = P_{т.п} + P_{вент} = 8 \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \left(\frac{D_1}{100} \right)^2 = 8 \left(\frac{1500}{1000} \right)^2 \left(\frac{183}{100} \right)^2 = 110,3 \text{ Вт.} \quad (184)$$

Потери на трение щеток о контактные кольца

$$P_{т.щ} = 2,6 \cdot I_{пн} \cdot D_1 \cdot n_1 \cdot 10^{-6} = 2,6 \cdot 18,05 \cdot 183 \cdot 1500 \cdot 10^{-6} = 12,9 \text{ Вт.} \quad (185)$$

Механические потери

$$P_{мх} = P'_{мх} + P_{тщ} = 110 + 12,9 = 123 \text{ Вт.} \quad (186)$$

Суммарные потери

$$P_{\Sigma} = P_{с\Sigma} + P_{м1} + P_{доб} + P_{п} + P_{мх} = 256,3 + 599 + 50 + 4170,2 + 123,2 = 1445 \text{ Вт.} \quad (187)$$

КПД при номинальной нагрузке

$$\eta = 1 - P_{\Sigma} / (P_{2н} + P_{\Sigma}) = 1 - 1445 / (30000 + 1445) = 87,4 \%. \quad (188)$$

1.9. Характеристики машин.

1.9.1. Отношение короткого замыкания.

Изменение напряжения генератора. Повышение напряжения на зажимах генератора при переходе от режима с номинальной нагрузкой к режиму холостого хода при неизменных значениях тока возбуждения и частоты вращения выражают в процентах номинального напряжения:

Повышение напряжения на зажимах генератора

$$\Delta U_{н} = (U_{10} - U_{1н}) / U_{1н} = 20\% \quad (189)$$

Где номинальное напряжение U_{10}

Отношение короткого замыкания (ОКЗ), представляющее собой отношение тока возбуждения $I_{п0}$, соответствующего номинальному напряжению при х. х., к току возбуждения $I_{п.к}$, соответствующему номинальному току статора при его к. з., т. е.

$$\text{ОКЗ} = E'_{0*} / x_{d*} = 1,03 / 1,804 = 0,569 \text{ о.е.} \quad (190)$$

При этом ЭДС E'_{0*} определяют по продолжению прямолинейной части характеристики х. х. при токе возбуждения $I_{п.н*}$ (МДС $F_{п.н}$), соответствующем нагрузке машины в номинальном режиме.

Кратность установившегося тока к.з.

$$I_k / I_{1н} = \text{ОКЗ} \cdot I_{пн*} = 0,569 \cdot 2,47 = 1,52 \text{ о.е.} \quad (191)$$

Наибольшее мгновенное значение тока

Далее находим наибольшее мгновенное значение тока трехфазного короткого замыкания на выводах машины при напряжении х.х. $U_1=1,05U_{1н}$, он же - ударный ток

$$i_{уд}=1,89/x''_{d*}=1,89/0,36=3,93 \text{ о.е.} \quad (192)$$

Статическая перегружаемость

$$S=E'_{00} \cdot k_p/x_d \cdot \cos \cdot \varphi_H=2,536 \cdot 1,045/1,804 \cdot 0,8=2 \text{ о.е.} \quad (193)$$

Угловые характеристики

Определяем ЭДС

$$E'_{0*}=4,2 \text{ о.е.}$$

Определяем уравнение

$$P_*(E'_{0*}/x_{d*})\sin\theta+0,5(1/x_{q*}-1/x_{d*})\sin2\theta=2,54/2,868 \cdot \sin\theta+0,5(1/1,198-1/2,868) \cdot \sin2\theta=1,555 \cdot \sin\theta+0,471 \cdot \sin2\theta. \quad (194)$$

По результатам расчета строим угловую характеристику генератора (приложение Г).

Таблица 2.

1.10. Тепловой и вентиляционный расчеты.

1.10.1. Тепловой расчет.

Расчет проведем по упрощенной методике, изложенной в §5-3 [1]. Конструкция статора синхронных и асинхронных машин позволяют при тепловом расчете обмотки статора воспользоваться указаниями и методикой, изложенными в § 9-15[1], кроме формулы (9-378), которая позволяет определить потери в обмотке статора при максимальной допустимой температуре, но она не учитывает дополнительную обмотку. Потери в основной и дополнительной обмотках статора (Вт).

Потери в основной и дополнительной обмотках статора

$$P'_{м1} = m_1 \cdot m'_t [I^2 r_1 + (I_{пн}/\sqrt{3}) r_d] = 3 \cdot 1,48 [22,6^2 \cdot 0,233 + (18,04/\sqrt{3})^2 \cdot 0,233] = 642 \text{ Вт}; \quad (195)$$

где: $m'_t=1,48$ - коэффициент для класса нагревостойкости изоляции В § 5.1.[1]

Условная внутренняя поверхность охлаждения активной части статора

$$S_{n1} = \pi D_1 l_1 = \pi \cdot 183 \cdot 156 = 0,96 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (196)$$

Условный периметр поперечного сечения

$$\Pi_1 = 2h_{n1} + b_1 + b_2 = 14,2 \cdot 2 + 11,3 + 9,4 = 49,1 \text{ мм} \quad (197)$$

Условная поверхность охлаждения пазов

$$S_{и.п1} = z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1 = 36 \cdot 49,1 \cdot 157 = 2,95 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (198)$$

Условная поверхность охлаждения лобовых частей обмотки

$$S_{л1} = 4\pi D_1 l_1 = 4 \cdot \pi \cdot 183 \cdot 156 = 1,62 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (199)$$

Условная поверхность охлаждения двигателей с охлаждающими ребрами на станине

$$S_{маш} = \pi D_{н1} (l_1 + 2l_{п1}) = 4,26 \cdot 10^5 \text{ мм}^2. \quad (200)$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмоток и от потерь в стали, отнесенных к внутренней поверхности охлаждения активной части статора

$$p_{п1} = \frac{\kappa(P'_{м1} 2 \frac{l_1}{l_{сп1}} + P_{с\sigma})}{S_{н1}} = \frac{0,84(642 \cdot 0,206 + 256)}{9,6 \cdot 10^4} = 1,19 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}, \quad (201)$$

где: $\kappa=0,84$ - коэффициент (таблица 9.25 { 1}).

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмоток и от потерь в стали, отнесенных к поверхности охлаждения пазов

$$p_{и.п1} = \frac{\frac{P'_{м1} 2l_1}{l_{сп1}}}{S_{и.п1}} = \frac{642 \cdot 2 \cdot 167}{2,95 \cdot 10^5} = 8,96 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/мм}^2 \quad (202)$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмоток и от потерь в стали, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки

$$p_{л1} = \frac{\frac{P'_{м1} 2l_{л1}}{l_{сп1}}}{S_{к1}} = \frac{642 \cdot 2 \cdot 167}{1,62 \cdot 10^5} = 2,33 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2} \quad (203)$$

Окружная скорость ротора

$$v_2 = \frac{\pi D_{н2} n_1}{60000} = \frac{\pi \cdot 183 \cdot 1500}{60000} = 14,37 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (204)$$

Превышение температуры внутренней поверхности активной части статора над температурой воздуха

$$\Delta t_{\text{п1}} = \frac{p_{\text{п1}}}{\alpha_1} = \frac{119,4}{16} = 8 \text{ C}, \quad (205)$$

где $\alpha_1 = 16 \cdot 10^{-5}$ Вт/мм²град - коэффициент теплоотдачи поверхности статора.

Перепад температуры в изоляции паза и катушек из круглых проводов

$$\Delta t_{\text{и.п1}} = p_{\text{и.п1}} \left[\frac{b_{\text{и1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{эКВ}}} \right] = 0,89 \cdot 10^{-3} \left(\frac{0,4}{1,6 \cdot 10^{-4}} + \frac{20,7}{16 \cdot 160 \cdot 10^{-5}} \right) = 3,17 \text{ C}^\circ. \quad (206)$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмоток над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta t_{\text{л1}} = p_{\text{л1}} / \alpha_1 = 2,33 \cdot 10^{-3} / 16 \cdot 10^{-5} = 15,5 \text{ C}^\circ \quad (207)$$

Среднее превышение температуры обмоток над температурой воздуха внутри двигателя

$$\begin{aligned} \Delta t'_1 &= (\Delta t_{\text{п1}} + \Delta t_{\text{и.п1}}) \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}} + (\Delta t_{\text{л1}} + \Delta t_{\text{и.п1}}) \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} = (7,96 + 3,17) \frac{2 \cdot 167}{810} + (15,5 + 8) \frac{2 \cdot 167}{810} = \\ &= 18,4 \text{ C}^\circ. \end{aligned} \quad (208)$$

Потери в двигателе, передаваемые во внешнюю среду внутри машины

$$\begin{aligned} P'_\Sigma &= k(P'_{\text{м1}} \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}} + P_{\text{с}\Sigma}) + P'_{\text{м1}} \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} + P'_{\text{м2}} + P_{\text{мх}\Sigma} + P_{\text{д}} = \\ &(642 \times 0,206 + 256) + 642 + 0,41 + 1692 + 123 + 50 = 2357 \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (210)$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающего воздуха

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{P'_\Sigma}{S_{\text{маш.р}} \alpha_{\text{в}}} = \frac{2357}{1,89 \cdot 10^5 \cdot 34 \cdot 10^{-5}} = 36,6 \text{ C}^\circ. \quad (211)$$

Среднее превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха

$$\Delta t_1 = \Delta t'_1 + \Delta t_{\text{в}} = 18,4 + 36,6 = 55 \text{ C}^\circ. \quad (212)$$

Как видим это значение не превышает 155 C для нагревостойкости изоляции класса F. Можно сделать вывод, что расчеты верны.

1.10.2. Обмотка возбуждения.

Условная поверхность охлаждения многослойных катушек из изолированного провода

$$S_{п2}=2p \cdot l_{ср.п} \cdot h_k=4 \cdot 472,4 \cdot 38,4=17,2 \cdot 10^4 \text{ мм}^2. \quad (213)$$

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

$$p_{п}=\kappa P_{п}/S_{п2}=0,22 \cdot 2,417 \cdot 10^{-3}=5,317 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/мм}^2. \quad (214)$$

Коэффициент теплоотдачи катушки

$$\alpha_T=5,33 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(мм}^2 \text{ С}^\circ).$$

Превышение температуры охлаждения наружной поверхности обмотки

$$\Delta t_{пл}=p_{п}/\alpha_T=5,317 \cdot 10^{-4}/5,33 \cdot 10^{-5}=1,3 \text{ С}^\circ. \quad (215)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха в машине

$$\Delta t_{B2}=\Delta t'_n+\Delta t_{инп}=6,6+1,3=9 \text{ С}. \quad (216)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой окружающего воздуха

$$\Delta t_{п}=\Delta t'_n+\Delta t_{в}=36,6+9=44,5 \text{ С}. \quad (217)$$

1.10.3. Вентиляционный расчет.

Синхронные машины рассчитывают в соответствии с соображениями, изложенными в § 5-3 [1]. Эти машины выполняются самовентилируемыми.

В машинах небольшой мощности вентилятор насаживается непосредственно на вал, а при больших мощностях вентилярующие лопасти крепятся к ротору, либо отливаются вместе с ним. При аксиальной системе вентиляции с центробежным вентилятором расчет аналогичен с машинами постоянного тока. Принимаем значение эквивалентного аэродинамического сопротивления воздухопровода $Z_1=1600$

Рассчитаем необходимый расход воздуха

$$V_{в}=\frac{P'_{\Sigma}}{c_{в} \Delta t_{в}}=\frac{2357}{1100 \cdot 2 \cdot 36,6}=0,029 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (218)$$

Наружный диаметр вентилятора

$$D_{\text{вент}2} = 0,85D_1 = 0,85 \cdot 254 = 216 \text{ мм.} \quad (219)$$

Внутренний диаметр вентилятора(колеса вентилятора)

$$D_{\text{вент}1} = 0,62D_1 = 0,62 \cdot 254 = 157 \text{ мм.} \quad (220)$$

Длина лопатки вентилятора

$$l_{\text{л}} = 0,14D_1 = 0,14 \cdot 254 = 26 \text{ мм.} \quad (221)$$

Количество лопаток вентилятора

$$N_{\text{л}} = D_{\text{вент}2} / 20 = 216 / 20 = 10,8. \quad (222)$$

Линейные скорости вентилятора по наружному и внутреннему диаметрам соответственно:

$$V_{\text{вент}2} = \pi D_{\text{вент}2} n / 6 \cdot 10^4 = 3,14 \cdot 216 \cdot 1500 / 6 \cdot 10^4 = 17 \text{ м/с.} \quad (223)$$

$$V_{\text{вент}1} = \pi D_{\text{вент}1} n / 6 \cdot 10^4 = 3,14 \cdot 157 \cdot 1500 / 6 \cdot 10^4 = 12,4 \text{ м/с.} \quad (224)$$

Давление воздушного потока(напор) вентилятора

$$H_0 = \eta_{\text{ао}} \gamma (V_{\text{вент}2}^2 - V_{\text{вент}1}^2) = 0,738(17^2 - 12,4^2) = 99,3 \text{ Па.} \quad (225)$$

Площадь поперечного сечения входных отверстий вентилятора

$$S_{\text{вент}} = 0,92\pi D_{\text{вент}2} l_{\text{л}} 10^{-6} = 0,92 \cdot 3,14 \cdot 216 \cdot 25,6 \cdot 10^{-6} = 0,016 \text{ мм}^2. \quad (226)$$

Максимальный расход воздуха

$$V_{\text{вмак}} = 0,42V_{\text{вент}2} S_{\text{вент}} = 0,42 \cdot 16,96 \cdot 0,016 = 0,114 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (227)$$

Фактический расход воздуха

$$V_{\text{в}} = V_{\text{вмак}} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + zV_{\text{вмак}}^2}} = 0,114 \sqrt{\frac{99,3}{99,3 + 1600 \cdot 0,114^2}} = 0,104 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (228)$$

Фактический напор вентилятора

$$H = \frac{H_0 z V_{\text{вмак}}^2}{H_0 + zV_{\text{вмак}}^2} = \frac{99,3 \cdot 1600 \cdot 0,114^2}{99,3 + 1600 \cdot 0,114^2} = 17,2 \text{ Па.} \quad (229)$$

1.11. Механический расчет вала.

Конструкция синхронного генератора предполагает горизонтальное расположение вала. В таком случае вал несёт на себе массу всех вращающихся частей и через него передаётся вращающий момент машины. При соединении

машины с приводным механизмом через ремённую и зубчатую передачи, а также и через муфту на вал будут действовать дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал также могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной не симметрией, усилия, появляющиеся из-за небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении вращающихся колебаний. Прочность вала должна быть достаточной, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал также должен иметь достаточную жёсткость, чтобы при работе машины ротор не касался статора. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочей частоты вращения машины.

Исходные данные для расчета вала на изгиб, прочность и прогиб:

$P_2 = 10000$ Вт – номинальная мощность генератора;

$n = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ – синхронная частота вращения;

$D_p = 181,6$ мм – наружный диаметр ротора;

$l_c = 167$ мм – длина сердечника ротора;

$\delta = 0,7$ – величина воздушного зазора

1.11.1 Расчет вала на прогиб.

Определяем номинальный момент вращения двигателя:

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n \cdot \eta} = 9,55 \frac{10000}{1500 \cdot 0,88} = 0,721 \text{ Нм} \quad (230)$$

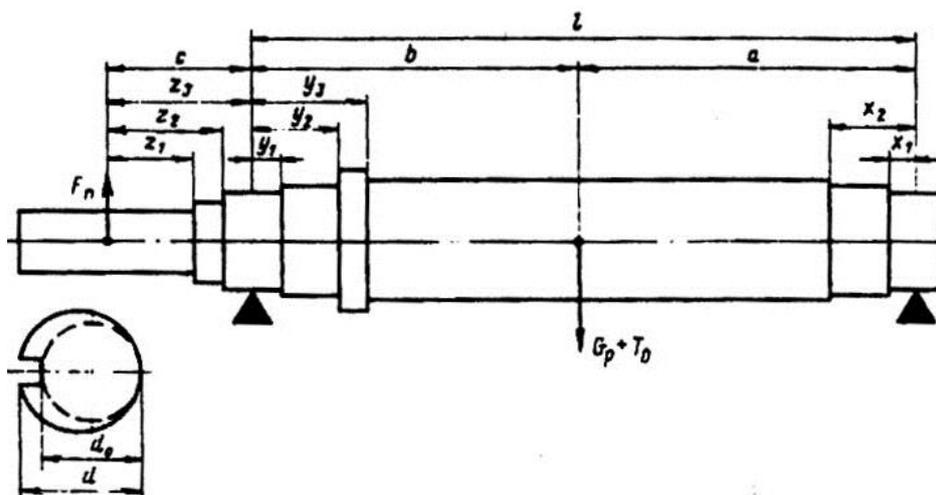


Рисунок 3 – эскиз вала ротора.

F_n – радиальная изгибающая сила;

m_p – вес ротора, включая вес вала под пакетом ротора.

Согласно рисунку 3 принимаем размеры:

$l_p = 0,44$ м – длина вала;

$a = 0,168$ м – расстояние от левой опоры до центра масс;

$b = 0,168$ м – расстояние от правой опоры до центра масс;

$c = 0,94$ м – расстояние от центра свободного конца вала до левой опоры;

$l = 0,336$ м – расстояние между опорами.

Масса ротора в сборе

$$m_p = 6260(D_p \cdot 10^3)^2 \cdot (l_p \cdot 10^{-3}) = 90,836 \text{ кг}, \quad m_p = m_p. \quad (231)$$

Сила тяжести ротора

$$G_p = 9,81 \cdot m_p = 891,103 \text{ Н}. \quad (232)$$

Нагрузку на вал от собственного веса ротора принимаем сосредоточенной в одной точке посередине сердечника ротора, фактически эта нагрузка является не сосредоточенной, а распределенной. Соединение генератора с приводом дизельного двигателя внутреннего сгорания осуществляется через упругую муфту.

Делительный диаметр окружности муфты

$$D_1 = 110 \text{ мм}.$$

Поперечные силы приложенные к выступающему концу вала

$$F_{\pi} = \frac{M_{\text{НОМ}} \cdot K_{\pi}}{D_1} = 1,96 \text{ Н}; \quad (233)$$

Где $k_{\pi} = 0,3$ – коэффициент при передаче упругой муфтой.

Прогиб вала посередине сердечника под силой тяжести ротора.

$$\text{для } d_1 = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м, } J_1 = \pi \frac{d_1^4}{64} = 3,14 \frac{(45 \cdot 10^{-3})^4}{64} = 2,013 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2; \quad (234)$$

$$\text{для } d_2 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м, } J_2 = \pi \frac{d_2^4}{64} = 3,14 \frac{(50 \cdot 10^{-3})^4}{64} = 3,068 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2; \quad (235)$$

$$\text{для } d_3 = 56 \cdot 10^{-3} \text{ м, } J_3 = \pi \cdot \frac{d_3^4}{64} = 3,14 \cdot \frac{(56 \cdot 10^{-3})^4}{64} = 4,827 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2. \quad (236)$$

Прогиб вала на участке “d”

при $x_1 = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м, } x_2 = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}:$

$$s_a = \sum_{i=1}^2 \frac{(x_i)^3 - (x_i - 1)^3}{J_i} = \sum_{i=1}^2 \frac{(45 \cdot 10^{-3})^3 - ((45 \cdot 10^{-3}) - 1)^3}{3,6 \cdot 10^{-7}} = 300,36 \text{ м}^{-1}. \quad (237)$$

Прогиб вала на участке “b”

при $y_1 = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м, } y_2 = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м, } y_3 = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}:$

$$s_a = \sum_{i=1}^2 \frac{(y_i)^3 - (y_i - 1)^3}{J_i} = \sum_{i=1}^2 \frac{(30 \cdot 10^{-3})^3 - ((30 \cdot 10^{-3}) - 1)^3}{4,82 \cdot 10^{-7}} = 91,34 \text{ м}^{-1}. \quad (238)$$

Прогиб вала на участке “c”

$$s_a = \sum_{i=1}^3 \frac{(y_i)^3 - (y_i - 1)^3}{J_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{(60 \cdot 10^{-3})^3 - ((60 \cdot 10^{-3}) - 1)^3}{4,82 \cdot 10^{-7}} = 8,8 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}. \quad (239)$$

Далее определяем прогиб вала посередине сердечника при модуле упругости:

$$E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

$$f_G = \frac{G_2 \cdot (a^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a) \cdot 10^6}{3E \cdot l^2} = \frac{891,1 \cdot (168^2 \cdot 91,34 + 168^2 \cdot 300,3) \cdot 10^6}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 336^2} =$$

$$= 1,412 \cdot 10^{-7} \text{ м}. \quad (240)$$

Прогиб вала посередине магнитопровода ротора от поперечной силы муфты

$$f_{\ddot{I}} = F_{\ddot{I}} \cdot c \cdot [(1,5 \cdot l \cdot S_0 - S_b) \cdot a + b \cdot S_a] \cdot \frac{10^6}{3 \cdot E \cdot l^2} =$$

$$1,96 \cdot 0,94 \frac{(1,5 \cdot 336 \cdot 8,793 - 91,34) \cdot 0,168 + 0,168 \cdot 300,35}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 336^2} \cdot 10^6 =$$

$$= 2,06 \cdot 10^{-8} \text{ м.}$$

(241)

Находим эксцентриситет сердечника ротора:

$$e_0 = 0,15\delta + f_G + f_{\ddot{I}} = 0,15 \cdot 0,7 + 1,41 \cdot 10^{-7} + 2,06 \cdot 10^{-8} = 0,07 \text{ м.} \quad (242)$$

Потом находим одностороннее магнитное притяжение:

$$T_0 = 2,94 \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \frac{e_0}{\delta} = 0,1 \cdot 160 \cdot 167 \cdot \frac{0,07}{0,7} = 891,62 \text{ Н.} \quad (243)$$

Прогиб от силы T_0

$$f = f_G \cdot \frac{T_0}{G_p} = 1,41 \cdot 10^{-7} \text{ м.} \quad (244)$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения

$$m = \frac{f}{e_0} = \frac{1,41 \cdot 10^{-7}}{0,07} = 2,01 \cdot 10^{-8} \text{ м.} \quad (245)$$

$$f_M = \frac{f}{1 - m} = \frac{1,41 \cdot 10^{-7}}{1 - 2,01 \cdot 10^{-6}} = 1,41 \cdot 10^{-7} \text{ м.} \quad (246)$$

Тогда суммарный прогиб равен:

$$f = f_{\Pi} + f_G + f_M = 2,06 \cdot 10^{-8} + 1,41 \cdot 10^{-7} + 1,41 \cdot 10^{-7} = 3,03 \cdot 10^{-7} \text{ м.} \quad (247)$$

Критическая частота вращения

$$n_k = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - m}{f_G}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - 2,01 \cdot 10^{-6}}{1,41 \cdot 10^{-7}}} = 7,98 \cdot 10^4 \frac{\text{об}}{\text{мин}}. \quad (248)$$

Проверка:

$$\frac{f}{\delta} \cdot 100\% = \frac{3,03 \cdot 10^{-7}}{0,7} \cdot 100\% = 0,00004 \% < 10\%. \quad (249)$$

Таким образом, проверку на жёсткость вал проходит.

1.11.2. Расчет вала на прочность.

Расчет на прочность необходим для выбора материала вала. Исходя из испытываемых валом нагрузок, его размеров, и допустимых напряжений, выбирают материал, который удовлетворяет вышеуказанным требованиям. Материал вала испытывает закономерные напряжения от изгиба вследствие вращения при нагрузках с постоянным направлением. Тяжелые условия работы относятся к приводу прокатных станов, вальцов, дизелей, и других поршневых машин. Эти тяжелые условия учитываются коэффициентом перегрузки, который примем $k = 2$ (стр. 249 2]).

Напряжение на свободном конце вала в сечении “А” $Z_1 = 0,04\text{ м}$, $d_1 = 0,03\text{ м}$

Изгибающий момент в сечении “А”

$$M_{иА} = k \cdot F_{II} \cdot Z_1 = 2 \cdot 1,96 \cdot 0,04 = 0,157\text{ Нм.} \quad (250)$$

Момент сопротивления при изгибе

$$W_A = 0,1 \cdot d_1^3 = 0,1 \cdot 0,03^3 = 5,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (251)$$

Натяжение изгиба

$$\sigma_{прА} = \frac{1}{W_A} \cdot \sqrt{M_{иА}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{ном})^2} = 2,12 \cdot 10^5 \text{ Па.} \quad (252)$$

Напряжение в сечении “В”

$$y_1 = 0,013 \text{ м} \quad d_1 = 0,045 \text{ м}$$

Нагрузка от установившегося магнитного напряжения

$$T = \frac{T_0}{1 - m} = \frac{891,6}{1 - 2,01 \cdot 10^{-6}} = 891,6 \text{ Н.} \quad (253)$$

Изгибающий момент в сечении “В”

$$M_{иВ} = k \cdot F_{II} \cdot c \left(1 - \frac{y_1}{1}\right) + (G_p + T) \cdot \frac{ay_1}{1} = \\ 2 \cdot 1,96 \cdot 0,94 \left(1 - \frac{0,01}{1}\right) + (891,1 + 891,6) \cdot \frac{0,16 \cdot 0,01}{1} = 14,70 \text{ Нм.} \quad (254)$$

Момент сопротивлений при изгибе

$$W_B = 0,1 \cdot d_1^3 = 0,1 \cdot 0,045^3 = 9,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (255)$$

Напряжение изгиба

$$\sigma_{\text{прВ}} = \frac{1}{W_{\text{иВ}}} \cdot \sqrt{M_{\text{иВ}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{\text{НОМ}})^2} = 1,61 \cdot 10^6 \text{ Па} . \quad (256)$$

Напряжение сечения “С”

$$x_1 = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad d_1 = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Изгибающий момент

$$M_{\text{иС}} = \left[k \cdot F_{\text{П}} \cdot c + (G_{\text{р}} + T) \cdot b \right] \cdot \frac{x_1}{1} =$$

$$\left[2 \cdot 1,96 \cdot 0,94 + (891,1 + 891,6) \cdot 0,168 \right] \cdot \frac{0,01}{1} = 11,28 \text{ Нм} . \quad (257)$$

Момент сопротивления при изгибе

$$W_{\text{С}} = 0,1 \cdot d_1^3 = 0,1 \cdot 0,045^3 = 9,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (258)$$

Напряжение изгиба

$$\sigma_{\text{прС}} = \frac{1}{W_{\text{С}}} \cdot \sqrt{M_{\text{иС}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{\text{НОМ}})^2} = 1,24 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (259)$$

Сопоставляя полученные данные можно отметить, что наиболее нагруженным сечением является сечение В, для которого:

$$\sigma_{\text{прА}} = 2,12 \cdot 10^5, \quad 1,03 \cdot 10^7 \leq 0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5 \text{ Па} .$$

Предел текучести стали 45

$$0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5 = 2,52 \cdot 10^8 \text{ Па} . \quad (260)$$

Условия прочности выполняется, а следовательно вал можно использовать в конструируемой электрической машине.

1.11.3. Выбор подшипников.

При определении радиальной нагрузки на подшипниках примем самый тяжелый случай:

$$R_{\text{А}} = F_{\text{П}} \cdot \frac{c}{1} + (G_2 + T_0) \cdot \frac{b}{1} = 1,96 \cdot \frac{0,94}{1} + (891,1 + 891,6) \cdot \frac{0,168}{1} = 896,8 \text{ Н} . \quad (261)$$

Коэффициент учитывающий характер нагрузки : $k_{\text{Н}}=1,5$

Приведенная динамическая нагрузка:

$$Q_A = k_n \cdot R_A = 1,5 \cdot 896,86 = 1,345 \cdot 10^3 \text{ Н} \quad (262)$$

Динамическая грузоподъемность подшипника:

$$C = \frac{Q_A}{25,6} \cdot (L \cdot n)^{\frac{1}{3}} = \frac{1,34 \cdot 10^3}{25,6} \cdot (18000 - 1500)^{\frac{1}{3}} = 1,57 \cdot 10^4 \text{ Н} \quad (263)$$

Где $n=1500$ об/мин,

$L=1$ 8000 ч. Срок службы подшипника (стр.405 [2]) для подшипника серии 309 $C=52700$.

Радиальная нагрузка на подшипник:

$$R_B = F_{II} \times \frac{c}{1} + (G_2 + T_0) \cdot \frac{a}{1} = 1,96 \cdot \frac{0,94}{1} + (891,1 + 891,6) \cdot \frac{0,168}{1} = 898,83 \text{ Н} \quad (264)$$

Приведенная динамическая нагрузка на опору Б:

$$Q_B = k_n \cdot R_B = 1,5 \cdot 898,8 = 1,34 \cdot 10^3 \text{ Н} \quad (265)$$

Динамическая грузоподъемность:

$$C = \frac{Q_B}{25,6} \cdot (L \cdot n)^{\frac{1}{3}} = \frac{1,34 \cdot 10^3}{25,6} \cdot (18000 \cdot 1500)^{\frac{1}{3}} = 1,58 \cdot 10^4 \text{ Н} \quad (266)$$

При диаметре вала 45 мм выбираем по [1,с.482,табл П-36] шарикоподшипник легкой серии 309 $C=52700$ (Н).

2. Специальная часть.

Методы, которые чаще всего применяются для расчета электромагнитного поля электрической машины:

1. Графоаналитический;
2. Аналитический;
3. Численный.

В основе графоаналитического метода лежит построение картины распределения векторов магнитной индукции, представленных в виде силовых трубок, которые описываются аналитическими уравнениями, каждый по отдельности. Данным методом достаточно просто рассчитать магнитное

поле с сложной конфигурацией границ. Главным недостатком графоаналитического метода - низкая точность из-за замены реальных дифференциальных уравнений Максвелла эквивалентными интегральными уравнениями, в которых значения вектора магнитной индукции в силовой трубке постоянно.

Аналитический метод основан на математическом расчете уравнений, скорректированных эмпирическими поправками. Метод позволяет осуществить анализ работы различных электромеханических устройств. Применение аналитического метода целесообразно на этапе проектного расчета с целью получения аналитических выражений для векторов магнитной индукции и индуктивных обмоток. Наиболее распространенным аналитическим методом решения уравнения для определения вектора магнитного потенциала является использование метода разделения переменных с использованием гармонического анализа. Векторы магнитного потенциала и векторы плотности тока намагниченности представляются в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит только от одной координаты.

Численный метод получает все большее распространение, так как возможности вычислительной техники растут. Этот метод основан на моделировании процессов функционирования проектируемого объекта с помощью различного вычислительного обеспечения, то есть исследование объекта происходит путем создания его модели и взаимодействия с ней для получения информации об объекте. Численное решение уравнений поля, полученное с помощью вычислительных программ, основанных, например, на методах конечных элементов, конечных разностей и других, позволяет с высокой точностью рассчитать распределение поля практически без упрощающих допущений. Метод конечных разностей пользуется заменой дифференциальных уравнений на конечно-разностные уравнения. Этим методом сложно точно описать границы и выполнить оптимальное наложение на область расчета конечно-разностной сетки. В электромеханике этот метод

позволяет рассчитывать магнитные, температурные, электрические, другие поля. Предполагается, что любая непрерывная функция, такая, как векторная или скалярная индукция, магнитный потенциал, температура и т.п., может быть аппроксимирована дискретной моделью, строящейся на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Решение уравнений связано с условием минимума энергетического функционала.

В качестве специальной части ВКР, решили подтвердить расчет магнитных полей синхронного генератора численным методом при помощи программы ELCUT, разработанной НПКК “ТОР”, г. Санкт-Петербург.

Данный пакет характеризуется хорошо развитым, но простым и понятным интерфейсом, высоким быстродействием, которое незначительно зависит от числа узлов расчетной сетки. Также пакет обладает разнообразными средствами, позволяющими выполнять детальный анализ полученных результатов. Число узлов расчетной сетки полной версии программы может быть достаточно большим и ограничивается только размером оперативной памяти персонального компьютера. Для получения точной модели исходные данные (геометрические размеры, плотность тока J , магнитные свойства материалов) были взяты из аналитического метода проектирования, в соответствии с ранее произведенными расчетами. Для построения геометрической модели в программе ELCUT был построен поперечный разрез синхронного генератора в программе T-Flex.(рисунок)

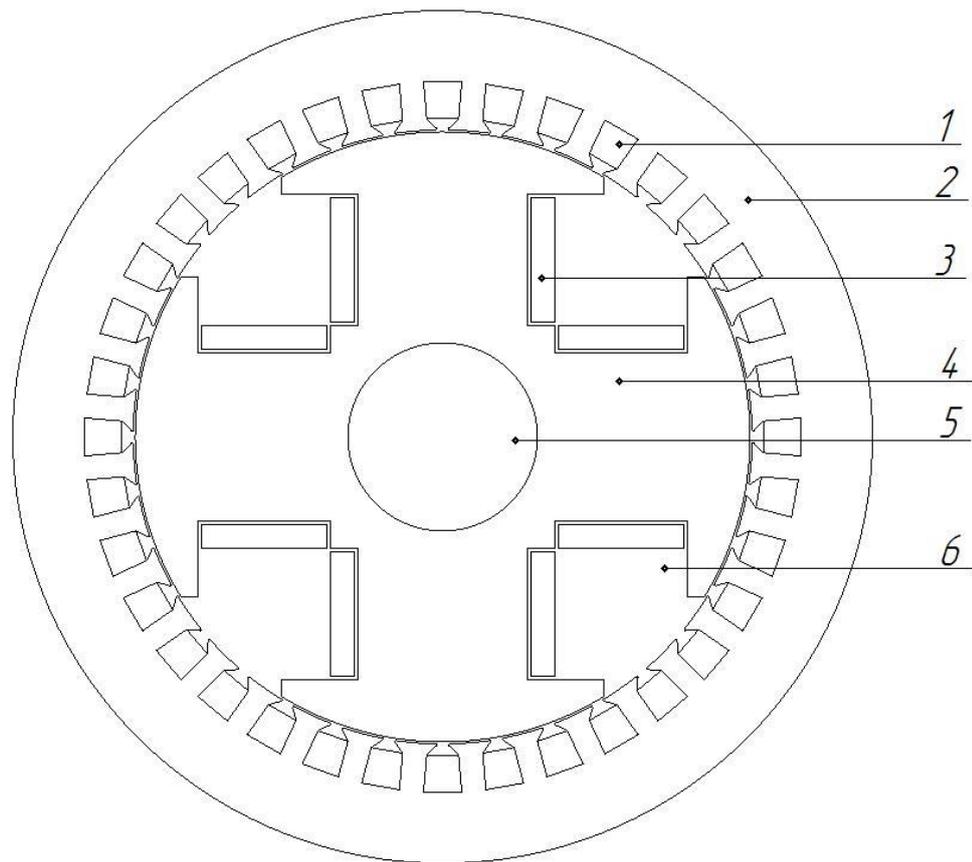


Рисунок 4 – Поперечный разрез синхронного генератора:

1. паз статора;
2. магнитопровод статора;
3. обмотка возбуждения;
4. магнитопровод ротора;
5. приводной вал;
6. воздух.

При помощи экспортирования, полученный разрез синхронного генератора помещен в программную среду ELCUT приложение «магнитостатика». С использованием встроенного интерфейса заданы магнитная проницаемость материалов. Согласно электрической схеме уложена обмотка статора, обозначено направление протекания токов по ней. Согласно существующим рекомендациям указаны граничные условия модели и параметры расчетной сетки. Полученные силовые линии магнитного поля и направление векторов подтверждают правильность данных раскладки обмотки.

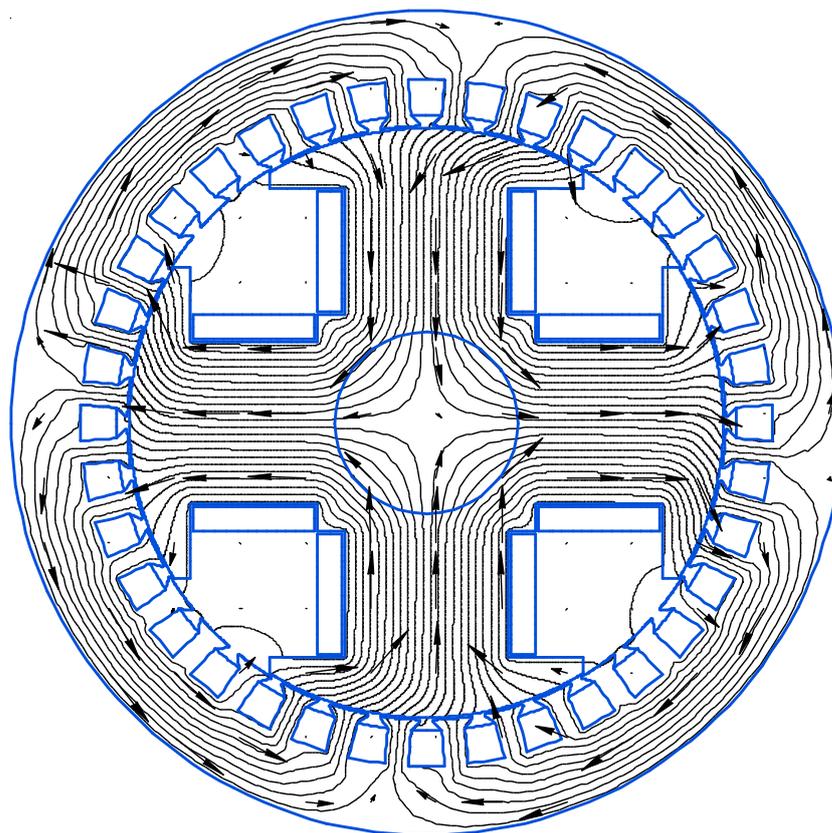


Рисунок 5– Силовые линии магнитного потока и направления их векторов.

Следующим этапом стало, получение картины распределения магнитного поля. Анализируя полученное распределение магнитного потока и индукцию в элементах магнитной системы можно сделать вывод, что более нагруженным оказался участок зубцовой зоны, в частности в коронке зубцов, где индукция 2,8 Тл, однако это значение носит локальный характер и не влияет на общую работу машины в целом. В зоне ярма индукция не превышает 1,7 Тл, что полностью подтверждает расчеты по аналитическому методу. Отмечается реакция якоря, т.к. на картинке присутствует смещение силовых линий.

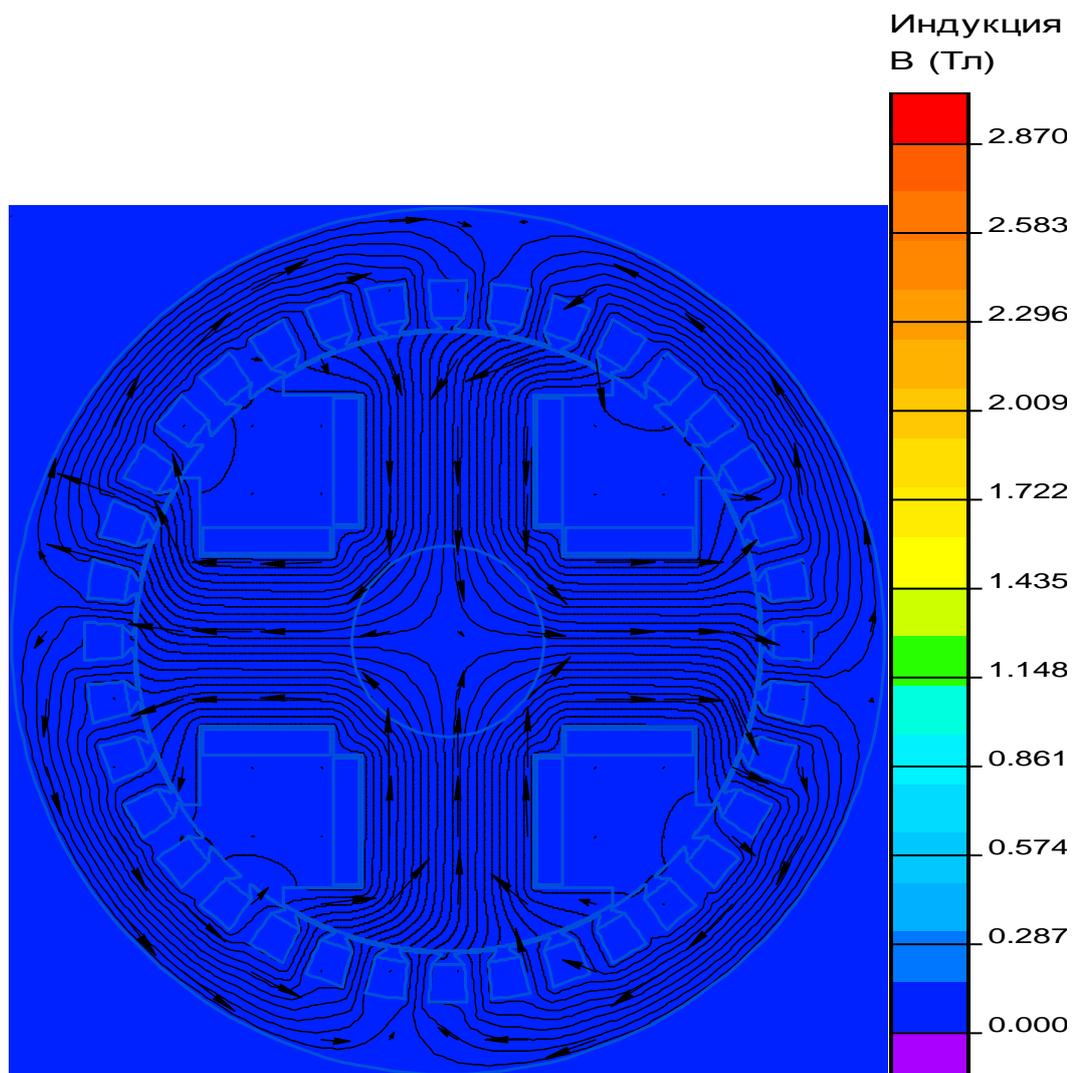


Рисунок 6 – Распределение магнитного поля.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что используя численную методику мы получили подтверждение, что синхронный генератор посчитан верно и численный метод имеет большую точность.

3. Технологический процесс сборки статора синхронного генератора.

Важнейшими факторами повышения производительности труда в электротехнической промышленности являются механизация и автоматизация производственных процессов. Производство электрических машин в последние годы характеризуется значительным повышением механизации и

автоматизации технологических процессов. Основные промышленные серии машин производятся на специализированных предприятиях с широким использованием автоматических установок и линий. Освоение новых материалов, позволяет механизировать технологические процессы. Научно-исследовательскими и проектно-технологическими институтами был разрабатываются типовые технологические процессы и специальное технологическое оборудование, что позволяет резко сократить время технологической подготовки производства и трудоемкость выпускаемых изделий. В настоящее время перед технологами стоят задачи не только улучшения технологии и технологического оборудования, позволяющих совершенствовать конструкцию машин, а так же повышение эффективности производства и получения наиболее экономичных изделий.

При этом необходимо: оценить технологичность конструкции сборочной единицы, разработать маршрутную технологию, выбрать необходимое оборудование и рассчитать его количество для изготовления 2700 генераторов в год, рассчитать припуски на обработку замков статора.

3.1. Описание сборочной единицы.

Конструкция статора зависит от степени защиты и высоты оси вращения ЭМ. Для синхронного генератора закрытого исполнения (IP44) применяют литые чугунные станины, выполненные в виде сравнительно тонкостенной трубы с отлитыми заодно лапами и высокой степенью ребрения, с целью усиления охлаждения электрической машины.

Станина отливается из чугуна. Этот материал легко поддаётся механической обработке. Требования по твёрдости установлены по ГОСТ 1412-85.

Основными параметрами статора, влияющими на качество машины являются размер и форма отверстия D под сердечник статора, смещение ΔC оси расточки относительно осей отверстий в лапах, отклонение высоты оси расточки относительно опорной плоскости лап (размер h), размер $D1$ замков

(выточек для посадки подшипниковых щитов) и смещение их оси относительно отверстия сердечника статора, определяемое относительным расположением поверхностей В и Г.

От размера и формы отверстия D зависит плотность посадки сердечника статора, отвод теплоты от него, а так же на деформацию сердечника по внутреннему диаметру и как следствие один из важнейших параметров машины – равномерность воздушного зазора.

Установочные размеры С и h статора определяют пространственное положение оси отверстия относительно опорной плоскости лап и установочных отверстий.

Технические требования предъявляемые к станинам:

1. Точность обработки замковых поверхностей по 7-8 качеству;
2. Точность поверхности под статор по 7-8 качеству;
3. Допуск нецилиндричности поверхности под статор не более 0,18 мм;
4. Торцевое биение замковых поверхностей не более 0,2 мм.

Конструкторской и измерительной базами, служит поверхность под запрессовку статора.

3.2. Анализ исходных данных.

Анализ исходных данных для проектирования технологического процесса сборки статора.

Сборка сердечника и корпуса выполняется посадкой с натягом. Для осуществления посадки, корпус нагревают индукционным методом или в печах. Ввиду этого необходимо использовать электропечь. Неподвижное соединение наиболее характерно для данного генератора, так как неподвижные соединения обеспечивают неизменное положение собранных деталей. Неподвижные неразбираемые соединения выполняют сваркой, клепкой, пайкой, а также посадкой с натягом, неподвижные разбираемые соединения посадками с зазором, при этом неподвижность собираемых деталей обеспечивается шпонками, штифтами. Особые требования предъявляются к разбираемым соединениям: Разбираемые соединения

должны быть точны, прочны, допускать многократную сборку и разборку и иметь хороший внешний вид, без вмятин и забоин. Технологический процесс сборки представляет собой часть производственного процесса, непосредственно связанного с последовательным соединением, взаимной ориентировкой и фиксацией деталей и узлов, для получения готового изделия удовлетворяющего установленным требованиям. Так как в процессе изготовления статора в сборе необходимо обрабатывать опорные поверхности, замковые поверхности, внутреннюю поверхность станины то необходимы токарный и фрезерный станок. Для запрессовки статора в станину необходим гидропресс. Также необходимо предусмотреть ряд вспомогательных инструментов (оправки, захваты, керн, молотки)

3.3. Анализ технологичности статора

Технологичность конструкции изделия представляет собой совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных показателей качества, объёма выпуска и условий выполнения работ: чем выше технологичность изделия, тем меньше усилий требуется для его улучшения. Статор состоит из станины и сердечника статора.

1. Конструкция заготовки станины отвечает основным техническим требованиям, предъявляемым к корпусным деталям:
2. Заготовка имеет определённые углы конусности, для обеспечения разъёма литейных форм, без резких углов и поворотов.
3. Заготовка имеет простое внешнее очертание, плавные переходы от одних поверхностей к другим, а так же минимальное число внутренних полостей.
4. Конструкция заготовки обеспечивает направленное затвердевание металла и достаточную сопротивляемость усадочным и термическим напряжениям.

5. Заготовка имеет небольшую массу, форма отливки позволяет уменьшить механическую обработку до минимума.

6. Конструкция обеспечивает технологичность моделей, а также возможность применения простой и унифицированной оснастки.

По сложности конфигурации отливки станины относятся к 3-ей группе сложности – преимущество отливки коробчатой или цилиндрической формы ответственного назначения. По назначению отливки, станины, относятся ко второй группе отливки – деталей, испытываемых на прочность, работающих при статических нагрузках, а также в условиях трения скольжения.

Для получения заготовки принимается способ литья в кокиль. Этот способ литья деталей из чугуна, стали и цветных сплавов. Отливки имеют мелкозернистую структуру, повышенные механические характеристики, минимальные припуски на механическую обработку.

Преимуществами этого способа литья по сравнению с литьём в песчаные формы являются повышенные (на 10-20%) механические свойства сплавов, более низкая (на 15-20%) себестоимость процесса, меньшая (в 1,5-2 раза) трудоёмкость механической обработки отливок, а также более высокая производительность труда.

Недостаток – высокая трудоёмкость изготовления металлических форм и стержней станины.

Конструктивное исполнение статора отвечает следующим технологическим требованиям:

- Конструкция статора обеспечивает свободный доступ сборочных инструментов к соответствующим местам соединения деталей.
- В конструкции сборочной единицы исключена необходимость проведения промежуточной разборки и повторной сборки его составных частей.
- Конструкция статора позволяет выполнить общую сборку по методу полной взаимозаменяемости.

- В конструкции статора есть базовая деталь (станина), являющаяся основой для установки остальных составных частей. Для обеспечения устойчивости и необходимой точности установки станина наибольшая по габаритам деталь, не деформирующаяся под действием сборочных усилий, имеет развитые базовые опорные поверхности и позволяет проводить сборку в основном без изменения её положения.
- Удобство монтажа и демонтажа.

3.4. Расчёт усилия запрессовки сердечника статора.

Сердечники статора запрессовывают в корпус на гидравлических прессах. На рисунке 3.2 показана типовая схема запрессовки, которая используется практически на всех заводах.

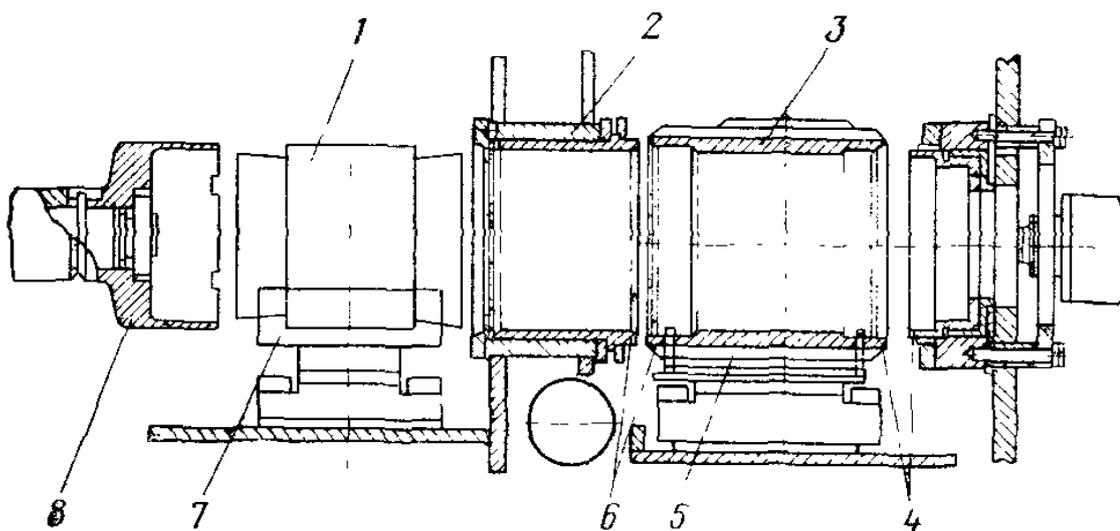


Рисунок 7 - Схема запрессовки сердечника статора в корпус.

Сердечник статора 1 и корпус 3 устанавливают на стол подачи, сердечник - в призму 7, ориентируя по выводным концам, а корпус - на спутник 5. После включения пресса стол подачи перемещается на позицию прессования, где корпус центрируется по замкам 4 и 6 и зажимается. Затем прессующая головка 8 перемещает сердечник по призме и через направляющую головку 2 запрессовывает его в корпус. Как только сердечник

входит во втулку, стол подачи возвращается в исходное положение. По окончании прессования статор освобождается и сталкивается с центрирующего кольца. При переналадке пресса на другую длину изделий необходимо сменить дистанционные и центрирующие кольца. Для лучшей запрессовки на корпусе должны быть предусмотрены заходные фаски.

Наиболее часто неподвижные соединения при сборке образуются путём запрессовки соединяемых деталей.

Исходные данные:

$D=308^{+0,85}$ мм – наружный диаметр станины;

$d=254$ мм – номинальный диаметр соединения;

$d_0=183$ мм – внутренний диаметр статора;

$\varnothing 254H11(^{+0,320})$ мм – диаметр отверстия в станине;

$\varnothing 254u8(^{+0,396}_{+0,315})$ мм – диаметр сердечника статора под напрессовку в станину;

$L=167$ мм – осевая длина сердечника статора;

$E_1=2,1 \cdot 10^5$ Н/мм² – модуль Юнга для стали;

$E_2=1,0 \cdot 10^5$ Н/мм² модуль Юнга для чугуна;

$\mu_1=0,3$ – коэффициент Пуассона для стали;

$\mu_2=0,25$ – коэффициент Пуассона для чугуна;

$R_{a1}=0,8$ мкм – шероховатость сопрягаемой поверхности стали;

$R_{a2}=0,8$ мкм – шероховатость сопрягаемой поверхности чугуна.

Прочность и неподвижность таких соединений обеспечивается силами трения, которые определяются величиной давления, создаваемого натягом:

$$p = \frac{1}{d} \cdot \frac{\delta_p \cdot 10^{-3}}{\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}}, \quad \text{МПа,}$$

(267)

где $\delta_p = \delta_{\max} - 1,2(R_{a1} + R_{a2})$ – расчётный натяг в соединении деталей, мкм;

C_1 и C_2 – безразмерные коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$C_1 = \frac{d^2 + d_0^2}{d^2 - d_0^2} + \mu_1 \quad (267) \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2. \quad (268)$$

Находим безразмерные коэффициенты:

$$C_1 = \frac{254^2 + 183^2}{254^2 - 183^2} + 0,3 = 3,459; \quad (268) \quad C_2 = \frac{308^2 + 254^2}{308^2 - 254^2} + 0,25 = 5,502. \quad (269)$$

Найдём расчётный натяг δ_p . Для этого рассчитаем максимальный натяг в соединении δ_{\max} по формуле:

$$\delta_{\max} = es_c - EI_k, \quad \text{где} \quad (270)$$

$es_c = 356 \text{ мкм}$ – верхнее предельное отклонение диаметра наружного ядра сердечника статора,

$EI_k = 0 \text{ мкм}$ – нижнее предельное отклонение внутреннего диаметра станины.

$$\delta_{\max} = 396 - 0 = 396 \text{ мкм}$$

$$\delta_p = 396 - 1,2(0,8 + 0,8) = 394,08 \text{ мкм}. \quad (272)$$

Найдём величину давления, создаваемого натягом:

$$p = \frac{1}{254} \cdot \frac{394,08 \cdot 10^{-3}}{\frac{3,459}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{5,502}{1,0 \cdot 10^5}} = 21,606 \text{ Мпа}. \quad (273)$$

Для запрессовки необходимо приложить к сопрягаемым деталям усилие, возрастающее от 0 до наибольшего значения:

$$P = f_3 \pi d L p \text{ кН},$$

где $f = 0,13$ – коэффициент трения [9, табл.3, с.201];

Итак:

$$P = 0,13 \cdot 3,14 \cdot 254 \cdot 167 \cdot 21,606 = 403,100 \text{ кН} \quad (274)$$

Выбираем : Пресс гидравлический ПБ6330 усилием 1000кН.

Таблица 2 - технические характеристики

| | |
|-------------------------------|------|
| Номинальное усилие прессы, кН | 1000 |
| Ход ползуна, мм | 500 |

| | |
|---|-------------------|
| Наибольшее расстояние между столом и ползуном, мм | 750 |
| Размеры стола, мм | 800 x 630 |
| Скорость холостого хода ползуна, мм/с | 100 |
| Скорость рабочего хода ползуна, мм/с (регулируемая) | 12 |
| Мощность привода, кВт | 15 |
| Габариты, мм | 900 x 2100 x 2720 |
| Масса пресса, не более, кг | 630 |

Согласно маршрутной технологии составим схему сборки статора, которая представлена на рисунке 8.

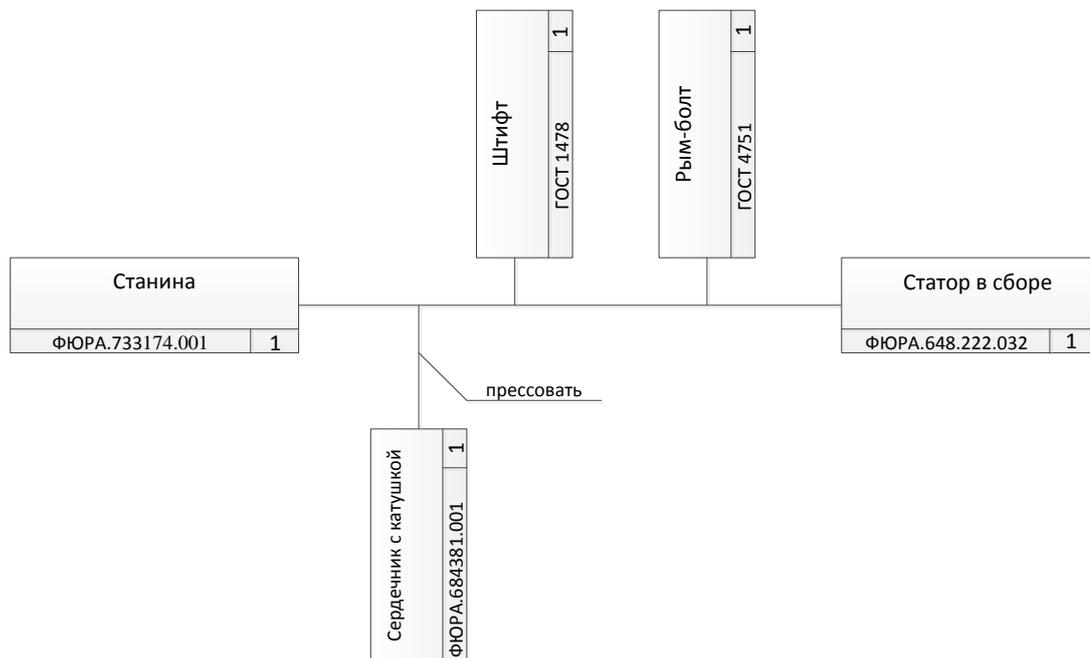


Рисунок 8 - Схема сборки статора

3.5 Выбор технологического оборудования и оснастки

Согласно схеме обработки, которая была выбрана ранее (токарным вариантом), обработки станины на универсальном оборудовании требуются револьверные или карусельные станки. Дальнейшая обработка станин

заключается в фрезеровании лап на вертикально или продольно - фрезерном станках, сверление отверстий и нарезание в них резьбы на радиально-сверлильных станках (согласно указаниям [8]).

Поэтому для изготовления статора требуется следующее оборудование:

1. Токарно-карусельный станок (1508) диаметр обрабатываемой детали до 800 мм, что удовлетворяет по размерам заготовки (по аналогии выбираются и другие станки);
2. Токарно-винторезный станок 16К20;
3. Резьбонарезной станок 5993;
4. Продольно-фрезерный станок 6305;
5. Вертикально-сверлильный станок 2Н118;
6. Пресс гидравлический (выбран ранее) П7320.

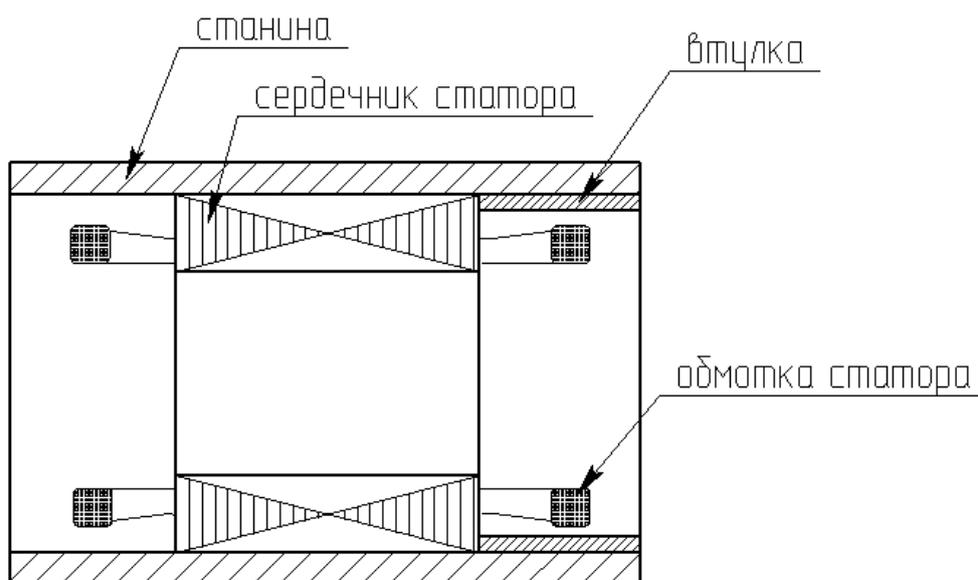


Рисунок 9 - Расположение втулки для запрессовки сердечника статора

Для сборки статора на прессе необходимо стальное приспособление, которое имеет форму втулки, с размерами $\varnothing 200 / 254_{-0,5} \times 80 \pm 0,3 \text{ мм}$. Приспособление ставится заподлицо во внутреннюю часть станины с обратной стороны запрессовки и служит ограничителем захода сердечника статора, т.е. обеспечивает посадку сердечника в корпус на требуемую глубину (рис.9).

3.6. Техническое нормирование операций.

Основное время точения равно:

$$T_0 = \frac{L_p \cdot i}{S_M} = \frac{11 \cdot 1}{83,2} = 0,132 \text{ мин.} \quad (275)$$

где $L_p = L_0 + l_1 + l_2 = 8 + 3 + 0 = 11 \text{ мм}$ – расчётная длина рабочего хода инструмента; (276)

$i = 1$ – число рабочих ходов в переходе;

$S_M = s \cdot n_p = 0,832 \cdot 100 = 83,2 \text{ м/мин}$ – минутная подача инструмента (значения s и n_p из расчёта п. 3.8). (277)

$L_0 = 8 \text{ мм}$ (из чертежа, приложение 2) – длина обрабатываемой поверхности в направлении подачи;

$l_1 = 3 \text{ мм}$ для глубины резания 3,11 мм и резца с углом в плане 90° из [10, табл. 2, с. 621].

$l_2 = 0$, так как применяется обработка отогнутым резцом в упор.

Определим вспомогательное время. Для этого определим составляющие.

$T_{yc} = 0,22 \text{ мин}$ – время на установку и снятие детали (деталь массой 35 кг, крепление в самоцентрирующем патроне с пневматическим зажимом) [9, табл. 5.1, с. 197].

$T_{30} = 0,024 \text{ мин}$ – время на закрепление и открепление детали (масса детали больше 20 кг, крепление рукояткой пневматического зажима) [9, табл. 5.7, с. 201].

$T_{уп} = 0,02 \text{ мин}$ – время на приёмы управления (включить и выключить станок рычагом) [9, табл. 5.8, с. 202].

$T_{из} = 0,03 \text{ мин}$ – время на измерение детали (измерение скобой односторонней предельной, при точности 12 квалитет и длине поверхности менее 50 мм) [9, табл. 5.12, с. 207].

Эти данные соответствуют массовому производству. Для серийного производства учтём коэффициент 1,85. Тогда вспомогательное время будет равно

$$T_{\epsilon} = 1,85(T_{yc} + T_{zo} + T_{yn} + T_{из}) = 1,85(0,35 + 0,024 + 0,02 + 0,03) = 0,784 \text{ мин.} \quad (278)$$

$$\text{Оперативное время } T_{он} = T_o + T_{\epsilon} = 0,132 + 0,784 = 0,917 \text{ мин.} \quad (279)$$

Процент времени на обслуживание и отдых оперативного $П_{об.от} = 7\%$ для токарного станка при высоте центров до 400 мм [9, табл. 6.1, с. 214].

Время на обслуживание оборудования и отдых

$$T_{об.от} = T_{оп} \cdot П_{об.от} / 100 = 0,917 \cdot 7 / 100 = 0,064 \text{ мин.} \quad (280)$$

Время подготовительно-заключительное $T_{пз} = 14$ мин для токарного станка с высотой центров до 400 мм при закреплении заготовки в самоцентрирующем пневматическом патроне [9, табл. 6.3, с. 215].

При серийном производстве изделия выпускаются месячными партиями. При заданной годовой программе $N = 2700$ шт., количество изделий в партии $n = N / 12 = 225$.

Определим штучно-калькуляционное время:

$$T_{шт-к} = T_{он} + T_{об.от} + \frac{T_{пз}}{n} = 0,917 + 0,064 + \frac{14}{225} = 1,043 \text{ мин.} \quad (281)$$

Исходя из проведенных расчетов, определим параметры для каждой операции и занесём данные в таблицу 3.

Таблица 3 - Расчёт норм времени

| Операция | $T_{0,мин}$ | $T_{ус,мин}$ | $T_{зо,мин}$ | $T_{уп,мин}$ | $T_{из,мин}$ | $T_{в,мин}$ | $T_{пз,мин}$ | $T_{оп,мин}$ | $T_{об.от, мин}$ | $T_{шт.к,мин}$ |
|---|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|------------------|----------------|
| Черновое точение замка | 0,132 | 0,35 | 0,024 | 0,02 | 0,03 | 0,784 | 14,00 | 0,92 | 0,064 | 1,00 |
| Чистовое точение замка | 0,115 | 0,35 | 0,024 | 0,02 | 0,03 | 0,784 | 14,00 | 0,90 | 0,063 | 0,98 |
| Тонкое точение замка | 0,105 | 0,35 | 0,024 | 0,02 | 0,03 | 0,784 | 14,00 | 0,89 | 0,062 | 0,97 |
| Однократное точение внутренней поверхности станины | 1,450 | 0,35 | 0,024 | 0,02 | 0,03 | 0,784 | 14,00 | 2,23 | 0,156 | 2,41 |
| Сверление отверстия в корпусе | 0,200 | 0,06 | 0,015 | 0,01 | 0,00 | 0,157 | 10,00 | 0,36 | 0,020 | 0,39 |
| Нарезание резьбы в корпусе | 0,700 | 0,06 | 0,015 | 0,01 | 0,00 | 0,157 | 10,00 | 0,86 | 0,075 | 0,95 |
| Фрезерование плоскости под коробку контактных зажимов | 0,350 | 0,23 | 0,017 | 0,01 | 0,00 | 0,475 | 12,00 | 0,83 | 0,050 | 0,89 |
| Фрезерование плоскости лап | 0,630 | 0,20 | 0,017 | 0,01 | 0,05 | 0,512 | 12,00 | 1,14 | 0,069 | 1,23 |
| Фрезерование канавки в лапе | 0,900 | 0,20 | 0,017 | 0,01 | 0,00 | 0,420 | 12,00 | 1,32 | 0,079 | 1,42 |
| Сверление отверстия в лапе | 0,050 | 0,06 | 0,020 | 0,02 | 0,03 | 0,241 | 10,00 | 0,29 | 0,016 | 0,32 |
| Запрессовка сердечника с катушкой в корпус статора | 0,400 | 0,20 | 0,070 | 0,03 | 0,00 | 0,555 | 5,00 | 0,96 | 0,076 | 1,04 |

3.7 Расчет количества оборудования для выполнения годовой программы.

Для определения потребного количества оборудования необходимо знать объем выпуска изделий (2700 шт/год), суммарные нормы времени по каждому виду оборудования и эффективный годовой фонд производственного времени оборудования, который при сорокачасовой неделе можно рассчитать по формуле:

$$F_{\partial} = [(365 - B_{\partial} - P_{\partial}) \cdot 8 - P_{n\partial}] \cdot z \cdot K_p;$$
$$F_{\partial} = [(365 - 104 - 11) \cdot 8 - 9] \cdot 1 \cdot 0,96 = 1911 \text{ ч}, \quad (282)$$

где $B_{\partial} = 104$ – количество выходных дней в году;

$P_{\partial} = 11$ – количество праздничных дней в году;

$P_{n\partial} = 9$ – количество предпраздничных дней в году;

$K_p = 0,96$ – для средних (массой до 10 т) – коэффициент учитывающий время пребывания единицы оборудования в ремонте,

$z = 1$ – число смен работы оборудования

Расчетное число каждого из видов сборочного оборудования:

$$C_p = \frac{T_{шт.к} \cdot N}{60 \cdot F_{\partial}}; \quad (283)$$

где $N = 2700$ шт/год – годовая программа выпуска;

$T_{шт.к}$ – сумма $T_{шт.к}$ для единицы оборудования.

Коэффициент загрузки оборудования:

$$K_3 = \frac{C_p}{C_{\Pi}} \cdot 100\% \quad (284)$$

где C_{Π} – принятое число оборудования, получается округлением расчетного в большую сторону.

Расчет коэффициента загрузки для каждого оборудования.

1. Токарно-винторезный станок:

$$C_p = \frac{2(1 + 0,98 + 0,97) \cdot 2700}{60 \cdot 1911} = 0,14; \quad (285)$$

$$K_3 = \frac{0,14}{1} \cdot 100 = 14\%; \quad (286)$$

2. Токарно-карусельный станок

$$C = \frac{2,41 \cdot 2700}{60 \cdot 1911} = 0,06; \quad (287)$$

$$K_3 = \frac{0,06}{1} \cdot 100 = 6\%; \quad (288)$$

3. Вертикально-сверлильный станок

$$C_p = \frac{(4 \cdot 0,32 + 9 \cdot 2,41) \cdot 2700}{60 \cdot 1911} = 0,54; \quad (289)$$

$$K_3 = \frac{0,54}{1} \cdot 100 = 54\%; \quad (290)$$

4. Резьбонарезной станок

$$C_p = \frac{9 \cdot 0,95 \cdot 2700}{60 \cdot 1911} = 0,20; \quad (291)$$

$$K_3 = \frac{0,20}{1} \cdot 100 = 20\%; \quad (292)$$

5. Горизонтально-фрезерный станок

$$C_p = \frac{(2 \cdot 1,42 + 1,23 + 0,89) \cdot 2700}{60 \cdot 1911} = 0,12; \quad (293)$$

$$K_3 = \frac{0,12}{1} \cdot 100 = 12\%; \quad (294)$$

6. Горизонтально-прессовочный станок

$$C_p = \frac{0,1,04 \cdot 2700}{60 \cdot 1911} = 0,03; \quad (295)$$

$$K_3 = \frac{0,03}{1} \cdot 100 = 3\%; \quad (296)$$

Занесем полученные результаты в таблицу 4.

Таблица 4 - Данные загрузки оборудования

| Оборудование | Ср | Сп | Кз |
|-----------------------------------|------|----|----|
| Токарно-винторезный станок | 0,14 | 1 | 14 |
| Токарно-карусельный станок | 0,06 | 1 | 6 |
| Вертикально-сверлильный станок | 0,54 | 1 | 54 |
| Резьбонарезной станок | 0,20 | 1 | 20 |
| Горизонтально-фрезерный станок | 0,12 | 1 | 12 |
| Горизонтально-прессовочный станок | 0,03 | 1 | 3 |

По данным таблицы 4 построим диаграмму, показывающую коэффициенты загрузки для различных типов оборудования (рис.10).

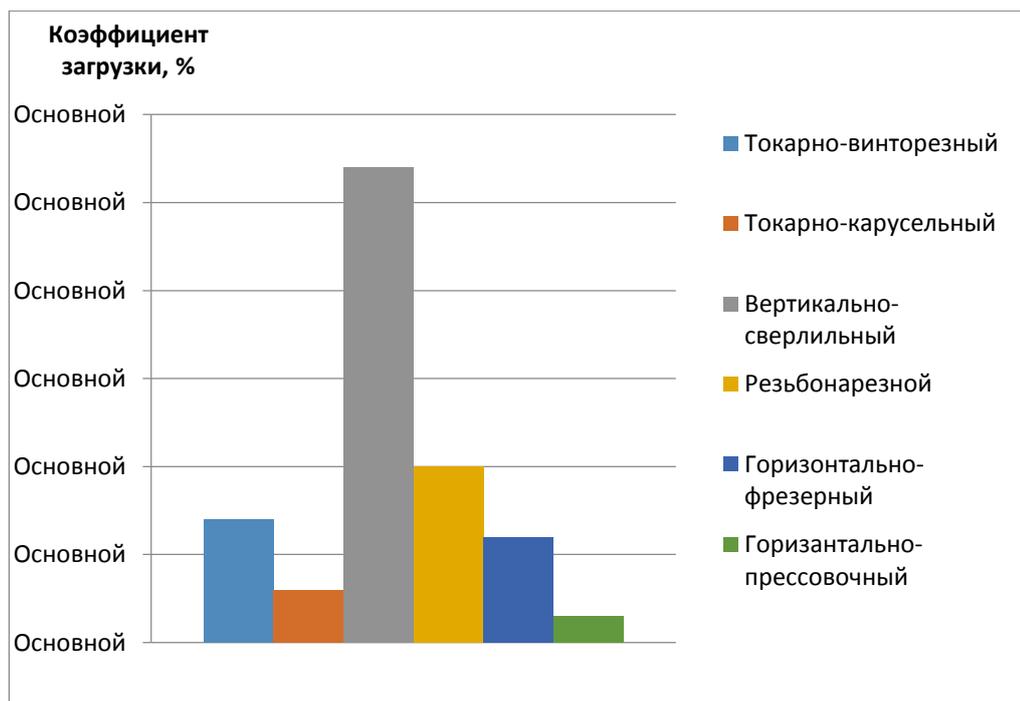


Рисунок 10 - График загрузки оборудования

Для проверки программы выпуска в год выбирается самое загруженное оборудование и считается возможно ли выпустить нужное число изделий. В данном случае самым загруженным оборудованием является вертикально-сверлильный станок в количестве 2 штук.

Из формулы $C_p = \frac{T_{шт.к} \cdot N}{60 \cdot F_{\partial}}$ выразим N , подставив C_p вместо C_p .

$$N = \frac{60 \cdot F_{\partial} \cdot C_p}{T_{шт.к}} = \frac{60 \cdot 1911 \cdot 1}{22,98} = 4989_{шт.} \quad (297)$$

Таким образом, 4989 больше 2700, следовательно, программа выпуска выполняется.

В результате проведённого технологического процесса механической обработки станины и сборки статора, мы исследовали маршрутную технологию, рассчитали необходимое количество оборудования при заданной программе выпуска в 2700 шт./год.

Все операции, механической обработки станины и сборки статора, описаны в маршрутной карте (приложение 1).

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
В данном разделе будет создан график выполнения проекта, составлена смета необходимых ресурсов на выполнение проекта и будет произведена оценка технического уровня синхронного генератора с аналогичным изделием.

4.1 График выполнения проекта

При проектировании рассматриваемого синхронного генератора были задействованы два инженерных работника: научный руководитель (НР) и инженер (И).

Распределение работы между проектирующими работниками сводим в таблицу 5

Таблица 5 – План разработки выполнения этапов проекта.

| № | Перечень выполняемых работ | Исполнители | Продолж. (дней) |
|---------------------------|--|-------------|--------------------|
| п/п | | | |
| 1 | Определение целей и задач. Составление и утверждение ТЗ. | НР | 1 |
| | | И | |
| 2 | Подбор и изучение материалов по теме. | И | 2 |
| 3 | Проектирование модели. | И | 4 |
| 4 | Электромагнитный расчет синхронного генератора. | И | 11 |
| 5 | Проверка полученных результатов | НР | 3 |
| | | И | |
| 6 | Подготовка и составление схем, чертежей | И | 4 |
| 7 | Расчет технологической части проекта | И | 3 |
| 8 | Расчет экономической составляющей проекта. | И | 3 |
| 9 | Составление раздела по социальной ответственности | И | 2 |
| 10 | Оформление расчетно-пояснительной записки | И | 1 |
| 11 | Проверка расчетно-пояснительной записки и чертежей | НР | 2 |
| | | И | |
| Занятости исполнителей | | НР | 6 |
| | | И | 36 |
| Длительность работы, дней | | | 36 |

По данным таблицы 5 построим график занятости исполнителей.

Таблица 6 – График занятости исполнителей

| Исполнители | Дни выполнения проекта | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | В, % | | |
|-------------|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | | | |
| НР | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | 16,6 | |
| И | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 100 |

4.2. Смета затрат

4.2.1 Смета затрат на подготовку проекта

Суммарные издержки на проектирование определяем по выражению:

$$\sum I_{\text{проекта}} = I_{\text{з.пл}} + I_{\text{соц}} + I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{пр}} + I_{\text{накл}},$$

где $I_{\text{з.пл}}$ - издержки на заработную плату;

$I_{\text{соц}}$ - издержки на социальные отчисления;

$I_{\text{мат}}$ - материальные издержки;

$I_{\text{ам}}$ - амортизационные издержки;

$I_{\text{пр}}$ - прочие издержки;

$I_{\text{накл}}$ - накладные расходы.

Издержки на заработную плату представлены в таблице 3.

Таблица 7 – Единая тарифная сетка с учетом занимаемой должности

| Должность | Оклад | Допл | Коэф. за отпуск | Р.К. | Зп. за месяц | Ср.зп. за один день | Кол-во дн. раб. | ФЗП |
|----------------------|-------|----------|-----------------|------|--------------|---------------------|-----------------|---------|
| Научный руководитель | 14500 | 190 0 | 1,1 | 1,3 | 23205 | 1105 | 6 | 6630 |
| Инженер | 14500 | | 1,1 | 1,3 | 20735 | 987,38 | 36 | 35545,7 |
| Итого | | | | | 43940 | 2092,38 | | 42175,7 |

$$I_{\text{з.пл.}} = \frac{(3 \cdot k_1 + D) \cdot k_2}{21} \cdot X \quad \text{или} \quad I_{\text{з.пл.}} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X$$

Где 3 – оклад;

D – доплата за интенсивность труда

k_1 - коэффициент за отпуск (1,1);

k_2 - районный коэффициент (1,3);

21 - количество рабочих дней в месяце;

X - количество рабочих дней, затраченных на проект.

Зарплата.

Расчет для научного руководителя. Руководитель в должности ассистента.

$$I_{\text{з.пл.}} = \frac{(3 \cdot k_1 + D) \cdot k_2}{21} \cdot X = \frac{(14500 \cdot 1,1 + 1900) \cdot 1,3}{21} \cdot 6 = 6630 \text{ (руб.)}$$

Расчет для инженера

$$I_{\text{з.пл.}} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X = \frac{14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3}{21} \cdot 36 = 35545,71 \text{ (руб.)}$$

Тогда

$$I_{\text{з.пл}\Sigma} = \sum I_{\text{з.пл}} = 6630 + 35545,7 = 42175,7 \text{ (руб.)}$$

4.2.2 Отчисления на социальные нужды.

В статью расходов «отчисления на социальные нужды» закладывается обязательные отчисления по установленным законодательством нормам. Органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования, от элемента «затраты на оплату труда». Размер отчислений на социальные нужды составляет 30% от ФЗП.

$$I_{соц} = 0,3 \cdot I_{з.плс} = 0,3 \cdot 42175,7 = 12652,71 (\text{руб.})$$

4.2.3 Материальные затраты на канцелярские товары.

Материальные затраты на канцелярские товары примем в размере 1200 руб. (в условиях цен на канцелярские товары в настоящее время).

$$I_{мат} = 1200 (\text{руб.})$$

4.2.4 Амортизация вычислительной техники.

Основной объем работ по разработке проекта был выполнен на персональном компьютере первоначальной стоимостью 33 000 рублей.

Произведём расчёт амортизации стоимости ПК

$$I_{ам} = \frac{T_u}{T_{кал}} \cdot \Phi_{кт} \cdot H_{ф} = \frac{36}{365} \cdot 33000 \cdot \frac{1}{7} = 464,97 (\text{руб})$$

где T_u - количество отработанных дней на ПК;

$T_{кал}$ - количество календарных дней в году;

$\Phi_{кт}$ - первоначальная стоимость ПК;

$H_{ф} = \frac{1}{T_{сл}}$ - срок полной амортизации.

4.2.5 Прочие неучтенные затраты.

Прочие неучтенные прямые затраты включают в себя все расходы связанные с налоговыми сборами (не предусмотренными в предыдущих статьях), отчисления внебюджетные фонды, платежи по страхованию, оплата услуг связи, представительские расходы, затраты на ремонт и прочее. Принимаем размер прочих затрат как 10% от суммы расходов на

материальные затраты, услуги сторонних организаций, амортизации оборудования, затрат на оплату труда, отчисления на социальные нужды.

$$I_{np} = 0,1 \cdot (I_{з.пл} + I_{соц} + I_{mat} + I_{ам}) =$$

$$= 0,1 \cdot (42175,7 + 12652,71 + 1200 + 464,97) = 5649,34 \text{ (руб)}$$

4.1.6 Накладные расходы.

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Примем их за 200% от фактической заработной платы.

$$I_{накл} = 2 \cdot 42175,7 = 84351,4 \text{ (руб)}$$

4.1.7 Себестоимость проекта

$$\sum I_{проекта} = I_{з.пл} + I_{соц} + I_{mat} + I_{ам} + I_{np} + I_{накл} =$$

$$= 42175,7 + 12652,71 + 1200 + 464,97 + 5649,34 + 84351,4 = 146494,14 \text{ (руб)}$$

Результаты расчетов сведем в таблицу 4.

Таблица 8 – Смета затрат на подготовку проекта

| № п/п | Наименование | Обозначение | Сумма, руб. |
|-------|----------------------------|--------------------|-------------|
| 1 | Заработная плата | $I_{з.пл} \Sigma$ | 42175,7 |
| 2 | Социальные отчисления | $I_{соц}$ | 12652,71 |
| 3 | Материальные затраты | I_{mat} | 1200,00 |
| 4 | Амортизационные отчисления | $I_{ам}$ | 464,97 |
| 5 | Прочие издержки | I_{np} | 5649,34 |
| 6 | Накладные расходы | $I_{накл}$ | 84351,4 |
| 7 | Себестоимость проекта | $\sum I_{проекта}$ | 146494,14 |

4.3 Оценка технического уровня

Научно-технический прогресс определяет продукция, которая соответствует или превосходит по техническому уровню лучшие аналоги во всем мире. Такая продукция обеспечивает значительное повышение производительности труда, экономию топлива, электроэнергии и материалов, требования экологической безопасности, является конкурентоспособной как

на внутреннем, так и на внешних рынках. Такая продукция должна характеризоваться неизменностью показателей качества и технического уровня, что основано на строгом соблюдении технологической производства и соблюдении качества выпускаемого товара. Для продукции высшей категории качества изготовителем должна быть предусмотрена повышенная гарантия надежности, безопасности и других важных показателей качества.

Промышленная продукция, которая по показателям качества и технического уровня не соответствует современным требованиям народного хозяйства как страны так и мира, подлежит модернизации. Если модернизации невозможна или нецелесообразна необходимо снять с производство подобную продукцию.

На любом этапе существования изделия можно применить единую схему количественного анализа конкурентоспособности

1. Подбор базового образца, схожего по условиям и назначениям эксплуатации с нашей продукцией.

2. Утверждение перечня нормативных, экономических и технических параметров, участвующих в исследовании (свести в таблицу).

3. Сопоставление (по каждой из групп параметров) имеющихся параметров с соответствующими параметрами, необходимые заказчику (потребителю). Мерой сравнения является единичный показатель, представляющий собой отношение величины параметра исследуемого изделия к величине такого же параметра, необходимого заказчику(потребителю).

4. На основе единичных показателей производится расчет группового показателя, который выражает различие между исследуемыми изделиями по всем группам параметров в целом.

Единимы методологическими принципами для данной схемы анализа являются учет предельности отдельных элементов потребности с тем. При нахождении образца на предельном уровне потребности не должен делаться вывод о большей конкурентоспособности анализируемого изделия с заведомо более высокими, чем у подобранного образца аналогичными параметрами.

Необходимо придать количественной оценки те параметры, которые не имеют собственной физической меры, например, эргономичность. Использование экспертных методов, необходимость построения весовой базы параметров на основе многосторонних рыночных исследований.

В идеале, любое проектирование должно начинаться с определения потребностей заказчика. После этого анализа становится возможным вычислить единичный параметрический показатель.

$$q = \frac{p}{p_{100}} p$$

где q - параметрический показатель;

P - величина параметра исследуемого изделия;

P_{100} - величина параметра изделия, которое удовлетворит потребность на 100%;

p - вероятность достижения заданной величины параметра. Она необходима для получения более точного результата с учетом элемента случайности, что снижает риски при осуществлении проекта.

Каждому параметрическому показателю изделия будет присвоен некий вес d , различный для каждого показателя. После вычисления единичных показателей всех показателей становится возможно вычисление группового показателя, характеризующего соответствие исследуемого изделия потребности (его полезность)

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i d_i$$

где Q - групповой технический показатель (по техническим параметрам); q_i - единичный параметрический показатель по i -му параметру;

d_i - вес i -го параметра; n - число рассматриваемых параметров.

Показатель конкурентоспособности исследуемого изделия по отношению к аналогичному изделию другой фирмы k_w будет равен.

$$k_{ТП} = \frac{Q_H}{Q_K}$$

где $k_{ТП}$ - показатель конкурентоспособности нового изделия по отношению к конкурирующему по техническим параметрам;

$Q_H Q_K$ ~ соответствующие групповые технические показатели нового и конкурирующего изделия.

Данные для оценки конкурентоспособности разрабатываемого удобно представлять в виде таблицы.

Таблица 9 – Оценка технического уровня новшества.

| Характеристики | Вес показателей d_i | Новшество | | Конкурент | | Гипотетический образец | |
|---|--------------------------|-----------|-------|-----------|-------|------------------------|-----------|
| | | P_i | q_i | P_i | q_i | P_{100} | q_{100} |
| Номинальная мощность, кВт | 0,169 | 10 | 0,869 | 10,5 | 0,913 | 11,5 | 1 |
| Масса активных материалов, кг | 0,154 | 7,15 | 1,016 | 7,23 | 1,026 | 7,04 | 1 |
| Частота вращения, Об/мин | 0,138 | 1500 | 0,937 | 1400 | 0,875 | 1600 | 1 |
| Коэффициент полезного действия, % | 0,231 | 87 | 0,967 | 86 | 0,956 | 90 | 1 |
| Коэффициент мощности $\cos\varphi$, о.е. | 0,187 | 0,8 | 0,975 | 0,78 | 0,975 | 0,82 | 1 |
| Степень защиты | 0,123 | 70 | 0,814 | 62 | 0,721 | 86 | 1 |
| Итого | | | 0,929 | | 0,911 | | 1 |

Таблица 10 – Матрица предпочтений

| № п/п | Наименование | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | сумма | d_{ij} |
|-------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|----------|
| 1 | Мощность | 1 | 1 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 5,5 | 0,169 |
| 2 | Масса активных материалов | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1,5 | 5 | 0,154 |
| 3 | Частота вращения | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,5 | 4,5 | 0,138 |
| 4 | Коэффициент полезного действия | 1 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 7,5 | 0,231 |
| 5 | Коэффициент мощности $\cos\varphi$ | 1,5 | 1 | 1,5 | 1 | 1 | 1,5 | 6 | 0,187 |
| 6 | Степень защиты | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,5 | 4 | 0,123 |
| | ИТОГО | | | | | | | 32,5 | |

$$K_{ТП} = 0,929/0,911 = 1,019$$

В итоге по оценке конкурентоспособности новшества вычислено, что коэффициент технического уровня равен 1,019, что свидетельствует о конкурентоспособности исследуемого синхронного генератора

5. Социальная ответственность.

В данном разделе будут рассмотрены безопасность и экологичность технологического процесса сборки синхронного генератора. Для осуществления сборки генератора необходима приспособления для транспортировки деталей и готовых изделий и ручной инструмент. Целью данного раздела является выявление опасных и вредных факторов и мероприятий по предотвращению их воздействия на организм человека.

Работа человека на производстве нередко приводит к получению различных травм и заболеваний. С целью предотвращения или уменьшения последствий опасных и вредных факторов существует наука об охране труда. Изучение и решение проблем, связанных с обеспечением здоровых и безопасных условий, в которых протекает труд человека – одна из наиболее важных задач. Задачей данного раздела является выявление опасностей, которые могут возникнуть на производстве. Существует ряд факторов, которые могут привести к опасности для здоровья во время проведения работ на предприятии.

Безопасность жизнедеятельности человека определяется характером труда, его организацией, взаимоотношением, существующим в трудовых коллективах, организацией рабочих мест, наличием опасных и вредных факторов в среде обитания.

Изучение и выявление возможных причин производственных несчастных случаев, профессиональных заболеваний, аварий, взрывов, пожаров и разработка мероприятий и требований, направленных на устранение этих причин позволяют создать безопасные и благоприятные условия для труда человека.

5.1. Анализ вредных и опасных производственных факторов.

Анализ вредных и опасных факторов и их устранение позволяют сделать труд более безопасным, комфортным и более производительным, что является

главной задачей охраны труда. Как известно безопасных и безвредных производств не существует.

Необходимо рассмотреть все операции, производимые на производстве и применяемое оборудование для их выполнения, после чего проанализировать все вредные и опасные факторы, возникающие при этом.

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием некоторых опасных и вредных факторов (ГОСТ 12.0.002-80 «ССБТ. Основные понятия. Термины и определения»), которые классифицируются по группам элементов: (ГОСТ 12.0.003-74 «ССБТ. Опасные и вредные факторы. Классификация»).

Таблица 12. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

| Наименование видов работ и параметров производственного процесса | Ф а к т о р ы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ) | | Нормативные документы |
|--|--|--|-----------------------|
| | Вредные | Опасные | |
| Сборка синхронного генератора, обработка его деталей и узлов | высокий уровень загазованности и пыли на рабочем месте | подвижные части машин и механизмов | ГОСТ 12.0.003-74 |
| | пониженная или повышенная температура рабочего места | короткое замыкание в электрической цепи которое может пройти через тело человека | ГОСТ 28249-93 |
| | высокий уровень шума на рабочем месте | повышенное значение напряженности электрического поля | ГОСТ 12.1.003-83 |
| | высокий уровень вибрации на рабочем месте | заусенцы, острые кромки деталей и шероховатость на поверхностях | ГОСТ 12.1.002-84 |
| | недопустимый уровень влажности воздуха | | СанПиН 2.2.4.548-96 |
| | усиленный поток воздуха, либо его застой | | СНиП 23-05-95 |
| | высокий уровень электромагнитных излучений | | |
| | недостаточная освещенность рабочей зоны | | |

5.2. Производственная санитария.

Комплекс мер по соблюдению норм производственной санитарии призван обеспечивать нормальные условия труда на рабочем месте. Условия труда определяются, с одной стороны трудовым процессом, а с другой - санитарно-гигиенической обстановкой, в которой выполняется трудовой процесс. Санитарно-гигиеническая обстановка, определяющая условия труда, характеризуется метеорологическими параметрами, действием вредных и ядовитых веществ, наличием шумов, вибраций, излучений и т.д.

Рабочее место по своему объему и площади должно быть таким, чтобы обеспечить условия для производительности труда и здоровья работающих. В цеху требуется иметь, на одного работающего, объем помещения не менее 15 м^3 и площадь не менее 4.5 м^2 . Высота производственных помещений должна быть не менее 3.2м.

Стены и потолки необходимо сооружать из малотеплопроводных материалов, не задерживающих осаждение пыли. Полы должны быть теплыми, эластичными, ровными и нескользкими.

5.3. Микроклимат

Важную роль для здоровья человека играет состояние окружающей среды, метеорологические условия или микроклимат на производстве. Микроклимат определяют следующие параметры:

- температура воздуха в помещении, $^{\circ}\text{C}$;
- относительная влажность воздуха, %;
- подвижность воздуха, м/с;
- тепловое излучение, Вт/м.

Эти параметры отдельно и в комплексе влияют на организм человека, определяя его самочувствие.

Температура воздуха является одним из ведущих факторов, определяющих метеорологические условия. Температура воздуха в помещении зависит, в основном от производственного процесса, при осуществлении которого,

выделяется тепло. Необходимо обеспечивать оптимальный микроклимат для обеспечения теплового равновесия между организмом человека и окружающей средой.

Оптимальная температура воздуха в холодный период года составляет $+(22-24)^{\circ}\text{C}$, в летний период не более $+25^{\circ}\text{C}$. Для поддержания данной температуры воздуха в холодный период времени предусмотрены батареи центрального отопления.

Влажность воздуха влияет на теплообмен в организме человека, затрудняя или облегчая теплообмен организма с окружающей средой. Оптимальная норма относительной влажности должна составлять (40-60) %, что соответствует условиям метеорологического комфорта при покое или легкой физической работе. Для поддержания влажности помещение регулярно проветривается, имеется вентиляция.

Движение воздуха внутри помещения происходит при непрерывном движении (нагреве) воздушных масс в пространстве и действием вентиляции.

Работа в производственном цеху относится к средней тяжести – Па.

Таблица 12 - допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах в цеху сборки

| Период года | Категория работ | Оптимальная температура $t^{\circ}\text{C}$ | Допустимая температура $t^{\circ}\text{C}$ | Оптимальная влажность % | Допустимая влажность % | Скорость движения воздуха оптимальная м/с | Скорость движения воздуха допустимая м/с |
|-------------|--------------------|---|--|-------------------------|------------------------|---|--|
| Холодный | Средней тяжести Па | 17-19 | 21–23 | 40–60 | 15–75 | 0,1 | 0,3 |
| Теплый | Средней тяжести Па | 18-20 | 22–26 | 40–60 | 15–75 | 0,1 | 0,4 |

Вентиляция - это организованный и регулируемый воздухообмен, обеспечивающий удаление из помещения воздуха, загрязненного газами, парами, пылью, а также улучшающий метеорологические условия в помещении.

По способу подачи в помещение свежего воздуха и удалении загрязненного, системы вентиляции делят на естественную, механическую и смешанную. Воздухообмен на производстве осуществляется как правило за счет механической вентиляции.

5.4. Шум и вибрация.

Шум и вибрация на производстве один из главных вредных производственных факторов на производстве в целом, в частности, в машиностроении. Шум представляет собой большую проблему, наносящую как экономический так и социальный ущерб. Излишний шум неблагоприятно воздействует на организм человека, снижая работоспособность, увеличивая уровень стресса, чем создаёт предпосылки для распространенных профессиональных заболеваний и возникновению производственного травматизма.

Вибрация газа характеризуются амплитудой, т.е насколько он отклоняется от точки своего равновесия и частотой: количество отклонений в единицу времени. 1 Гц соответствует одно отклонение в 1 секунду.

Существует три диапазона колебаний, зависящих от их частоты:

- 1) инфразвуковые(не воспринимаются слухом человека) — до 16 Гц;
- 2) звуковые (воспринимаются органом слуха человека как звук) —от 16 до 20000 Гц;
- 3) ультразвуковые(не воспринимаются слухом человека) — свыше 20000 Гц.

Вибрация оказывает губительное влияние на вестибулярный аппарат. Вибрация может оказывать положительный эффект на организм человека, но как правило, особенно на производстве она всегда является вредным фактором. Происходит это по нескольким причинам:

1. Любая вибрация на производстве не дает неправильных колебания, с постоянно изменяющимися амплитудой и частотой. Организм человека не способен приспособиться к таким колебаниям.

2. Также необходимо отметить что реакция организма человека зависит от частоты колебаний.

а) низкочастотная — до 16 Гц;

б) среднечастотная — от 16 до 30 Гц;

в) высокочастотная — свыше 35 Гц.

3. Наибольший вред оказывает вертикальная вибрация, т.е. когда человек стоит. На производстве человек наибольшее количество времени проводит именно стоя.

4. Чем тяжелее вибрирующий предмет, тем выше сила обратного удара. При производстве электрических машин всегда применяются достаточно тяжелые инструменты и приспособления.

5. Вибрация имеет хорошую синергию с другими вредными факторами на производстве такими как повышенная влажность, низкая температура и др.. Это усиливает негативный эффект.

Организм человека напрягает мышцы для того чтобы гасит вибрацию, оказываемую на него. Это ведет к ускорению мышечной утомляемости а также ряду расстройств мышечных тканей.

5.5. Освещение.

Правильно смонтированная система освещения сыграет существенную роль в снижении производственного травматизма. Такая система уменьшает потенциальную опасность большинства производственных факторов, создает комфортные условия работы, повышая общую работоспособность работника. Исследования показали, что при напряженной зрительной работе увеличение освещенности от 100 до 1000 лк приведет к повышению производительности труда на 10-20% и снижение количества несчастных случаев на 30%.

На практике пользуются двумя видами освещения - естественным, которое создается солнечным диском и диффузионным светом небесного излучения и искусственным, осуществляемым электрическими лампами. Естественное освещение положительно влияет не только на зрение, но также тонизирует

организм человека в целом и оказывает благоприятное психологическое воздействие.

Освещение цеха характеризуется качественными и количественными показателями. Качественными показателями определяют условия зрительной работы. К ним относятся фон, контраст объекта с фоном, видимость, показатель ослепления, показатель комфорта и коэффициент пульсации освещенности.

При долговременной работе недостаточная освещенность рабочей зоны приводит к ослаблению зрительной активности и ухудшению зрения работающего.

Освещенность на рабочем месте должна быть такой, чтобы работающий мог без напряжения зрения выполнять свою работу. Утомляемость органов зрения зависит от ряда причин:

- недостаточность освещенности;
- повышенная освещенность;
- неправильное направление света.

Наименьший размер объекта различения составляет 1,5–5 мм, что соответствует пятому разряду зрительной работы, при этом освещенность рабочего места должна быть не менее 200 лк.

Методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен, проведем расчет общего равномерного освещения.

По нормам освещенности СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и СНиП 23-05-95 работа сборщика относится к пятому разряду зрительной работы. Для этого разряда рекомендуется освещенность в диапазоне 300–500 лк.

Основной задачей расчётов искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания необходимой освещённости рабочего места. Необходимо спроектировать общее равномерное освещение помещения.

Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 0,8$ м. Требуется создать минимальную освещенность $E=300$ лк. Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, закрытыми шторами $\rho_c=70\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{\Pi} =70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3 =1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z= 1,1$.

Для основного освещения, часто, применяют газоразрядные лампы, в виду их энергетической экономичности и их высоким сроком эксплуатации. Самые распространённые это люминесцентные лампы. Выбираем светильники типа ШОД-2-40, т.к. этот тип обладает самым высоким КПД 85% по сравнению с остальными типами светильников, пригоден к эксплуатации в нормальных помещениях с высоким значением отражения потолка и стен, также допускает эксплуатацию при допустимой влажности и запылённости. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1228 мм, ширина – 284 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda =1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ м.

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,7 = 3 \text{ (м)}. \quad (317)$$

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,8 - 0,8 - 0,3 = 2,7 \text{ (м)}. \quad (318)$$

Расстояние от крайних светильников в ряду до стен определяется по формуле:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{3}{3} = 1 \text{ (м)}. \quad (319)$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 2 светильника длиной 1,3 м, при этом разрывы между светильниками в ряду составят 1,55 м, расстояние между рядами 0,93 м. На рисунке 8 изображён план цеха сборки и размещения на нём светильников. Так как, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $n_{\text{общ}} = 8$.

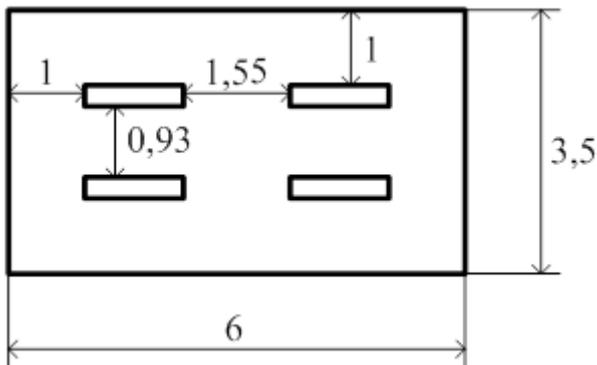


Рисунок 11 – План помещения и размещения светильников

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{6 \cdot 3,5}{2,7 \cdot (6 + 3,5)} = 0,8. \quad (320)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ШОД с люминесцентными лампами при $\rho_{\text{П}} = \rho_{\text{С}} = 70\%$ и индексе помещения $i = 0,8$ равен $\eta = 0,42$.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{П}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 6 \cdot 3,5 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,42} = 3094 \text{ (лм)}.$$

(321)

Выбираем лампу холодного белого света ЛХБ мощностью $P_{\text{ЛХБ}} = 40$ Вт, световой поток которой равен $\Phi_{\text{ЛХБ}} = 3100$ Лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛХБ}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛХБ}}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (322)$$

$$\frac{\Phi_{ЛХБ} - \Phi_{П}}{\Phi_{ЛХБ}} \cdot 100\% = \frac{3100 - 3094}{3100} \cdot 100\% = 0,202\%.$$

Получаем $-10\% \leq 0,202\% \leq 20\%$, следовательно, необходимый поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Электрическую мощность осветительной установки определяется по формуле:

$$P = P_{\text{ЕОА}} \cdot n = 40 \cdot 8 = 320 (\text{А} \cdot \text{В}).$$

5.6. Пожарная безопасность.

Пожарная безопасность является одним из важнейших разделов охраны труда на производстве. Существенную роль в профилактике и предотвращении пожаров играет правильный выбор режима работы электрооборудования с учётом класса по пожароопасности, применения молниеотводов. Все производственные помещения по пожароопасности разделяются на пять основных категорий. В процессе получения изделия на линии видимые признаки, обуславливающие возникновения пожара, следовательно, данное производство согласно [Технический регламент о требованиях пожарной безопасности] можно отнести к категории Д (производство, в котором негорючие вещества и материалы находящиеся в холодном состоянии). Однако, в данном технологическом процессе пожар может возникнуть из-за токов короткого замыкания, вызывающих высокую температуру нагревания проводников, что приводит к их выплавлению из изоляционного материала. В этом отношении опасны недопустимые электрические перегрузки проводов и обмоток электрических машин. В местах плохого контакта соединения проводников вследствие большого переходного сопротивления выделяется большое количество тепла. Это приводит к повышению температуры и воспламенения изоляции. Были установлены общие требования пожарной безопасности к объектам различного назначения всех отраслей народного хозяйства при строительстве и эксплуатации. Пожарная безопасность должна обеспечиваться:

–системой предотвращения пожара;

- системой противопожарной защиты;
- организационно–техническими мероприятиями.

Системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, обеспечивающих сохранность материальных ценностей, следует применять при наличии экономической эффективности от их внедрения. Экономическая эффективность должна рассчитываться с учётом вероятности возникновения пожара и возможного ущерба от него. Предотвращение пожара должно достигаться предотвращением образования горючей среды. Это должно обеспечиваться минимально возможным применением горючих материалов. Содержание газов, паров, взвесей и легко воспламеняющихся жидкостей должно быть по возможности вне пределов воспламенения.

Автоматические установки пожаротушения и установки пожарной сигнализации, введённые в объект, должны удовлетворять требованиям проектной документации и отраслевым стандартам.

Огнетушители различных видов относятся к классу переносных средств пожаротушения. Огнетушители, годные к эксплуатации, должны иметь бирку и маркировку и должны быть окрашены в красный цвет. Зарядка и перезарядка всех типов огнетушителей должна выполняться в соответствии с инструкциями по эксплуатации. Огнетушители должны располагаться в заметных и легко доступных местах, где исключено попадание солнечных лучей. Определим количество первичных средств пожаротушения:

Таблица 13 – Количество первичных средств пожаротушения

| Цех | Щеха, м ² | Огнетушители | | Ящик с песком, м ³ |
|------------|----------------------|--------------|------|-------------------------------|
| | | ОУ-5 | ОП-5 | |
| Цех сборки | 31 | 3 | 3 | 1 |

Пожарный ручной инструмент и инвентарь, размещенный на объекте, подлежит периодическому обслуживанию, включающему следующее:

- Очистка от пыли, грязи и коррозии;

– Восстановление соответствующей окраски.

Ящики с песком должны быть укомплектованы лопатой и иметь вместимость до 1,6 м³.

На рабочем месте каждый станок должен быть оснащен защищенной аппаратурой. Должна быть предусмотрена блокировка и защита на случай короткого замыкания и перегрузок, обеспечения возможности снятия напряжения всего оборудования с помощью расположенных вне помещения рубильников. В производственных помещениях должна обеспечиваться возможность эвакуации людей и оборудования в случае пожара.

5.7. Электробезопасность.

Электробезопасность – это комплекс технических, организационных, а также средства защищающие человека от воздействия электрического тока.

Под организационными мероприятиями понимают установление подходящих режимов работы электротехнического персонала. Ограничение мест и времени пребывания персонала предприятия в зонах очевидного или возможного воздействия .

Электрических тока способен оказывать как вредное так и опасное влияние на человека в виде травматизма или профзаболеваний.

Действующими нормативными документами по электробезопасности являются:

ГОСТ Р 12.1.019-2009 " Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты".

ГОСТ 12.1.038 – 82"Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжения прикосновений и токов".

Напряжение токи касания, протекающие через тело человека, не должны превышать установленных значения, приведенных в таблицах.

Таблица 14 – Напряжение и токи касания при нормальных режимах работы электроустановок.

| Вид тока | Напряжение | Сила тока |
|---------------------------|-------------|----------------|
| переменный, частота 50 Гц | Не выше 2В | Не выше 0,3 мА |
| Постоянный, частота 50Гц | Не выше 10В | Не выше 1мА |

Таблица 15 – Напряжение и токи касания в аварийных режимах работы электроустановок напряжением до 1000 В включительно и частоте 50 Гц

| Продолжительность воздействия, сек | Нормируемая величина | |
|------------------------------------|----------------------|---------------|
| | Напряжение, В | Сила тока, мА |
| 0,01–0,08 | 220 | 220 |
| 0,1 | 200 | 200 |
| 0,2 | 100 | 100 |
| 0,3 | 70 | 70 |
| 0,4 | 55 | 55 |
| 0,5 | 50 | 50 |
| 0,6 | 40 | 40 |
| 0,7 | 35 | 35 |
| 0,8 | 30 | 30 |
| 0,9 | 27 | 27 |

Защитное заземление или зануление используется для предотвращения поражения электрическим током при прикосновении к нетоковедущим металлическим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции или другой части электроустановки. Индивидуальные средства защиты от поражения электрическим током: специальные экраны, диэлектрические перчатки, обувь, коврики, инструмент, оснастка. Коллективные методы защиты это своевременное вывешивание предупреждающих плакатов, установка ограждений и знаков безопасности.

5.8. Охрана окружающей среды.

Охрана окружающей среды это объемная работа, требующая комплексной работы различных специалистов. Самая активный способ охраны окружающей среды от вредных воздействий выбросов предприятий это переход на безотходные и малоотходные технологии производства. Такой метод является кардинальным. Он требует огромных материальных и умственных затрат. В некоторых отраслях его практически невозможно осуществить. Для таких случаев существуют более доступные методы:

1. Обновление и модернизированные технологических процессов является важным направлением.

2. Разработка и внедрение в производство нового оборудования, обладающего меньшим уровнем выбросов вредных веществ в окружающую среду.

3. Замена устаревших и применение дополнительных методов и средств защиты окружающей среды. В качестве дополнительных средств защиты применяют такие как: система фильтрации и очистки вредных газовых выбросов, системы очистки сточных вод от вредных примесей, компенсаторы шума, системы гашения вибрации исходящей от технологического оборудования.

Еще на этапе проектирования и организации производства необходимо провести анализ источников загрязнения и провести мероприятия для их рационального расположения, т.е. выбрать наилучшее расположение предприятия, приняв во внимание окружающую местность, и утверждение санитарных и защитных норм вблизи предприятия.

Все отходы, скапливающиеся на предприятии делятся на категории опасности(промышленные отходы, токсичные отходы и т.д.). При удалении их с предприятия они вывозятся на соответствующие полигоны.

Вышедшее из строя оборудование должно быть утилизировано и отправлено на специализированные предприятия для переработки.

Для прочих отходов предусмотрены соответствующие места хранения, в конце смены они очищаются.

Закключение.

В данной работе был спроектирован явнополюсный синхронный генератор с электромагнитным возбуждением. Синхронный генератора ГС-10 был выбран в качестве базовой модели.

Из электромагнитного расчёта определена полная масса генератора $M_{\sigma}=82\text{кг}$, коэффициент полезного действия составляет $\eta=87,2\%$. Электрическая машина имеет со следующими установочно-присоединительными размерами:

- высота оси вращения $h=160\text{мм}$;
- длина выступающей части вала $l_1=80\text{мм}$;
- диаметр конца вала $d_1=38\text{мм}$;
- расстояние между осями монтажных отверстий в лапе $l_{10}=254\text{мм}$
- расстояние между осями монтажных отверстий между лапами $b_{10}=254\text{мм}$;
- диаметр монтажного отверстия в лапе $d_{10}=15\text{мм}$;
- расстояние между осью монтажного отверстия в лапе станины и уступом на валу куда будет упираться муфта $l_{31}=108\text{мм}$.

Из данных теплового расчёта видно, что среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды составляет $\Delta\theta_1=55^{\circ}\text{C}$, это приемлемо, так как класс изоляции F (155°C).

Наружный вентилятор обеспечивает расход воздуха $Q'_{\sigma}=0.029\text{м}^3/\text{мин}$, Эта величина, полученная в вентиляционном расчете выше необходимого для охлаждения машины расхода воздуха $Q_{\sigma}=0.114\text{м}^3/\text{мин}$. Следовательно, условие $Q_{\sigma} < Q'_{\sigma}$ выполняется.

В механическом расчёте вала напряжение изгиба на наиболее нагруженном сечении $\sigma_{npA}=2.122 \cdot 10^5\text{Па}$ меньше предела текучести для стали 45 $\sigma=36 \cdot 10^7\text{Па}$, напряжение на наиболее нагруженное сечение полюса $\sigma_n=6,7 \cdot 10^5\text{Па}$ меньше допустимого для электротехнической стали $\sigma_{нст}=27,5 \cdot 10^7\text{Па}$. Условие прочности выполняется. При диаметре шейки вала $d_2=45\text{мм}$ выбран подшипники лёгкой серии 309.

В специальной части приведен расчет магнитных полей синхронного генератора при помощи программы ELCUT на основе данных аналитического метода проектирования, в соответствии с произведенными расчетами. При раскладке получили силовые линии магнитного поля и направление векторов, которые подтверждают правильность схемы обмотки статора. Анализируя полученное распределение магнитного потока и индукцию в элементах магнитной системы сделали вывод, что более нагруженным оказался участок зубцовой зоны, в частности в коронке зубцов. Заметно действие реакции якоря из общей картины магнитного поля.

В технологической части разработан технологический процесс изготовления статора. Составлен и проанализирован маршрут технологии сборки статора синхронного генератора, для нормы выпуска $N=2700$ шт./год рассчитано необходимое количество оборудования. Для запрессовки статора в корпус выбран гидравлический пресс ПБ6330, усилием 1000кН при рассчитанном усилии $P=403\text{кН}$.

В разделе «Социальная ответственность» приведен список вредных и опасных факторов, с которыми столкнется работник в процессе сборки статора. Освещены вопросы пожарной безопасности, техники безопасности на производстве и производственной санитарии. Проведён расчёт освещения светильниками ПВЛ с мощностью лампы $2 \times 40\text{Вт}$ для участка сборки статора. В итоге спроектированный синхронный генератор удовлетворяет требованиям, определённым заданием проекта.

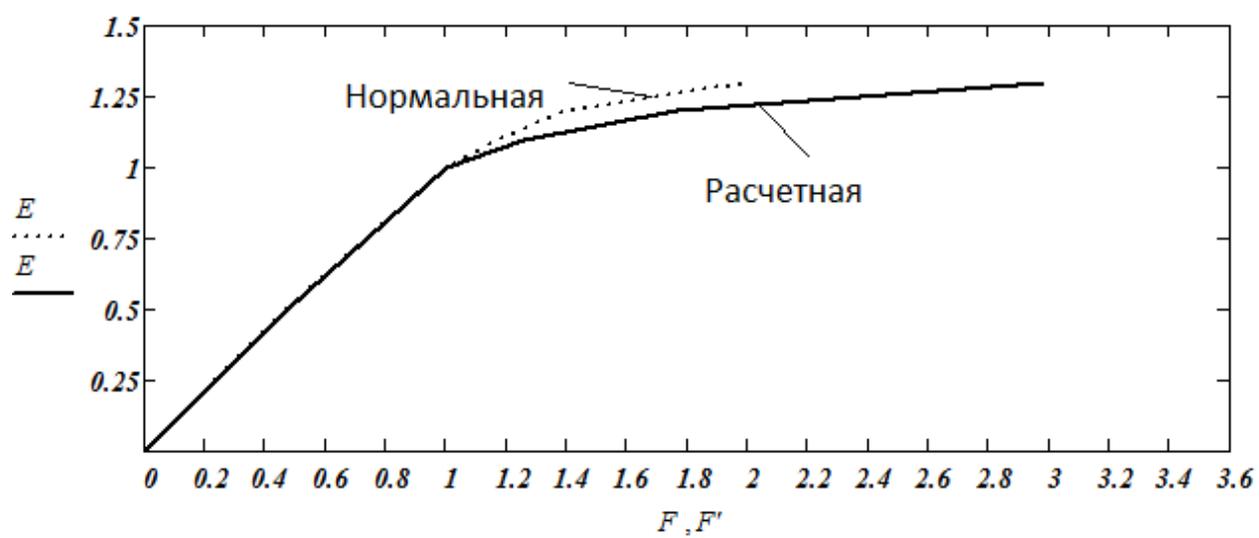
Список используемых источников

1. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. 430 с.
2. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов /И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. - 3-е изд., испр. И доп. - М.: Высш. Шк., 2002. - 757 с.: ил.
3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т. 1 – 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 736с., ил.
4. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин и приборов в условиях массового, крупносерийного и среднесерийного типов производства. - М.: Машиностроение, 1991. – 168с.
5. Антонов В.М. Технология производства электрических машин: Учебник для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 592 с.: ил.
6. Виноградов Н.В. Производство электрических машин. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, переработ. М., «Энергия», 1970. 288 с., ил.
7. Черкасский, Владимир Михайлович. Насосы, вентиляторы, компрессоры : учебное пособие / В. М. Черкасский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 415 с. : ил.
8. Замятин В.К. Технология и оснащение сборочного производства машиноприборостроения: Справочник - М.: Машиностроение, 1995. - 608 с.: ил.
9. Сайт :<http://www.nzgu.ru>.
- 10.Креницына З.В. Ресурсоэффективность отрасли: Учебное пособие /З.В.Креницына. – Томск, издательство Томского политехнического университета, 2013. – 182 с.
- 11.Сайт:http://www.center-yf.ru/data/Marketologu/Ocenka_konkurentosposobnosti.php.

- 12.Расчёт искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех направлений и специальностей ТПУ. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 20 с.
- 13.СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.
- 14.СанПин 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы»
- 15.ГОСТ 12.1.03-81.Электробезопасность.Защитноезаземление.Зануление.
- 16.ГОСТ 12.2.003-91 Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
- 17.ГОСТ 12.1.033 – 81 Пожарная безопасность.
- 18.ГОСТ 12.4.016 – 83 Одежда специальная защитная.
- 19.ГОСТ 12.1.003. – 83 Шум. Общие требования безопасности.
- 20.ГОСТ 12.1.012-90 Вибрация. Общие требования безопасности.

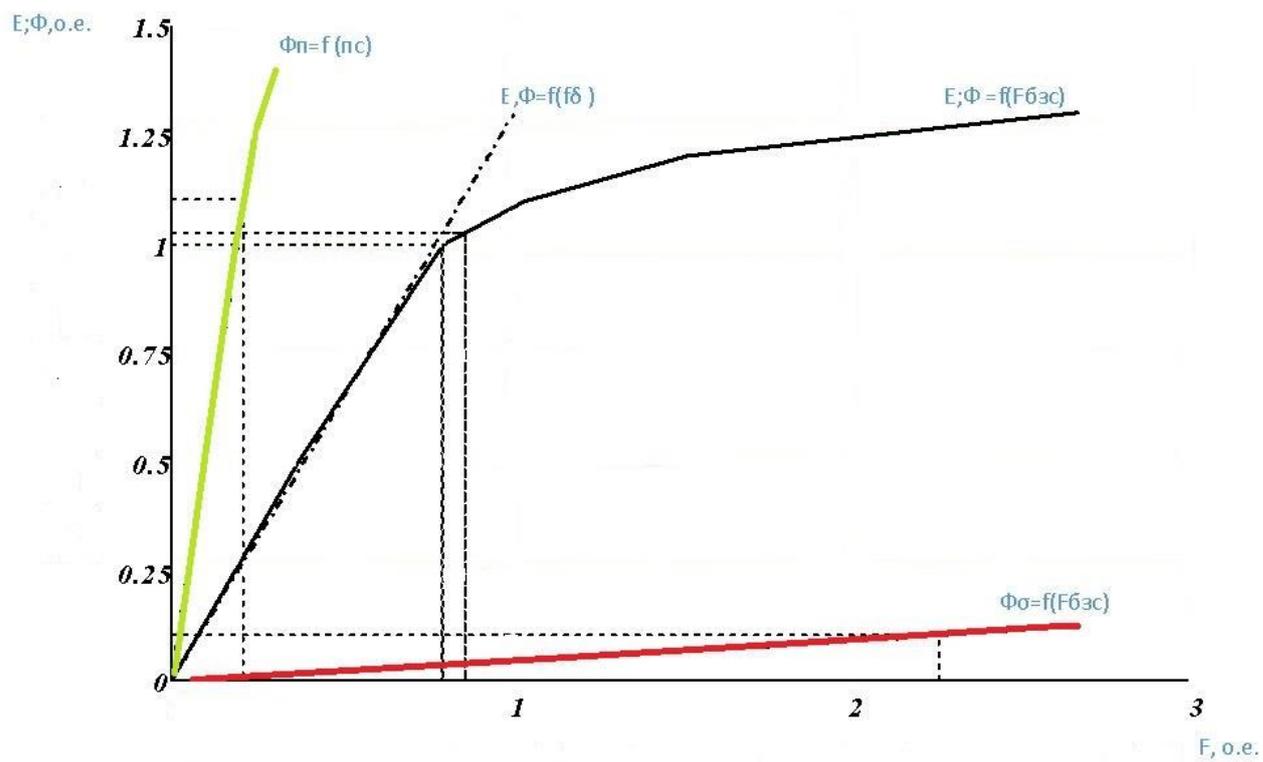
Приложение А

Характеристика холостого хода

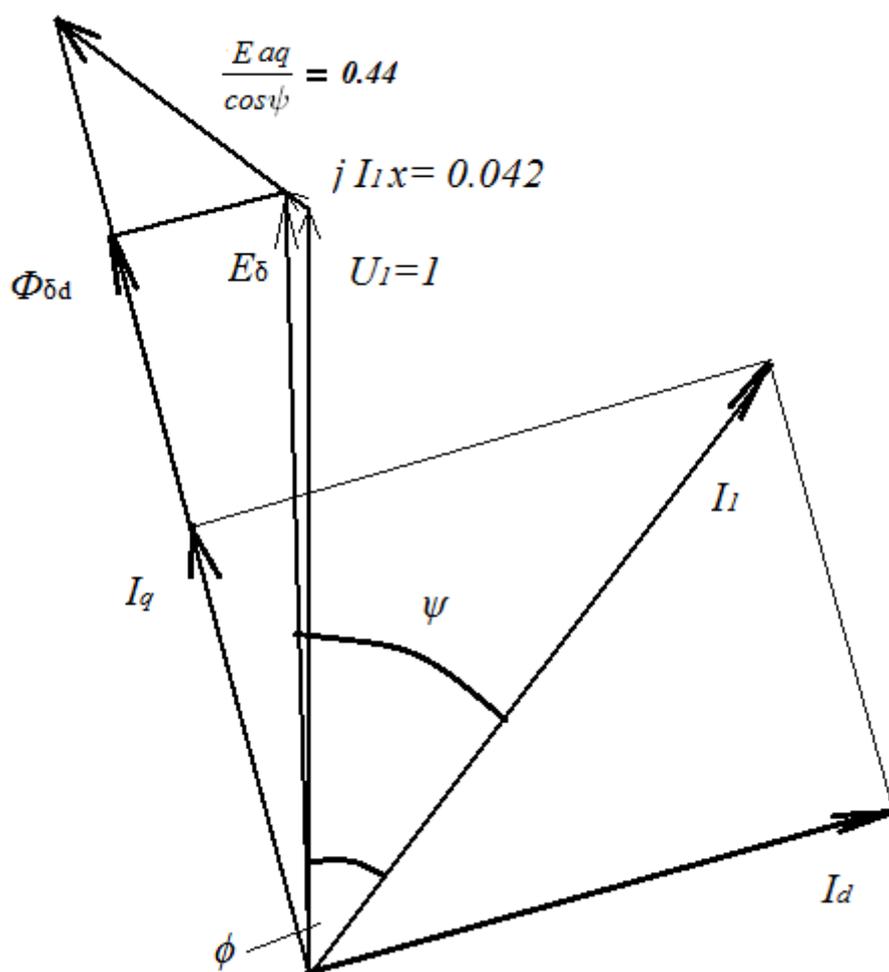


Приложение Б

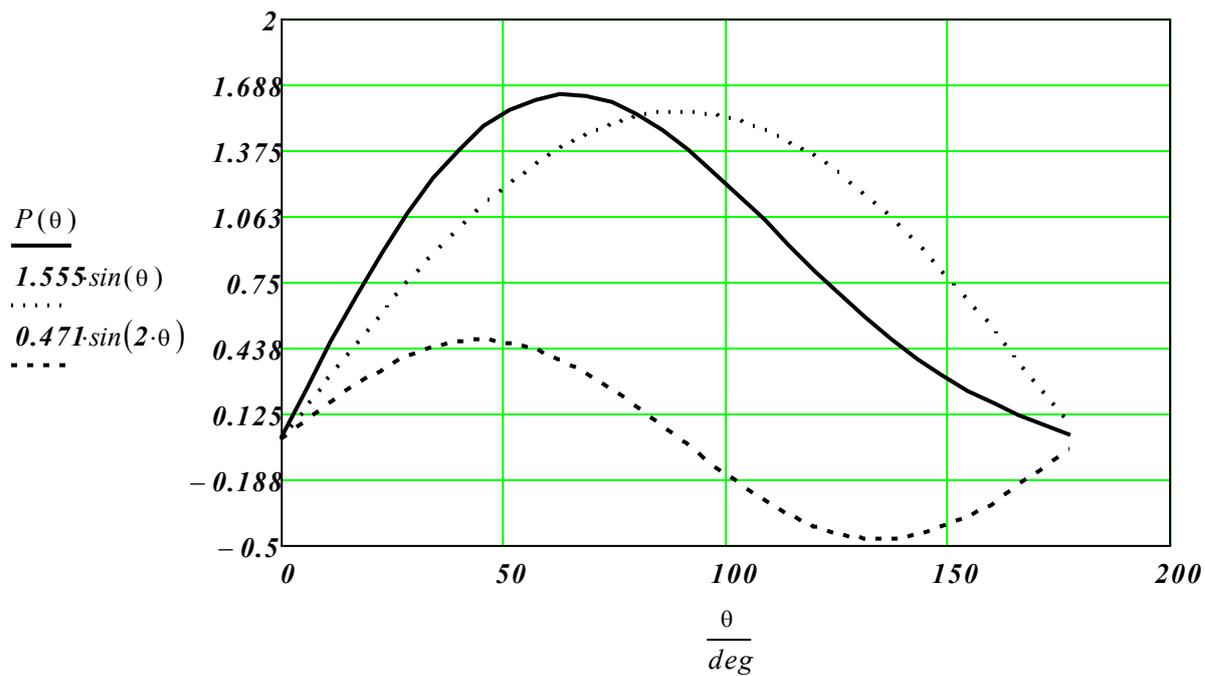
Частичные характеристики намагничивания генератора



Приложение В
Векторная диаграмма



Приложение Г
Угловые характеристики синхронного генератора



| | | | |
|-------|--|--|--|
| Дубл. | | | |
| Взам. | | | |
| Подл. | | | |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| | |
|---|---|
| 1 | 6 |
|---|---|

| | | | | | |
|----------|--|------------------|--|---|--|
| ТПУ ИнЭО | | ФЮРА 684.214.001 | | | |
| Статор | | | | П | |

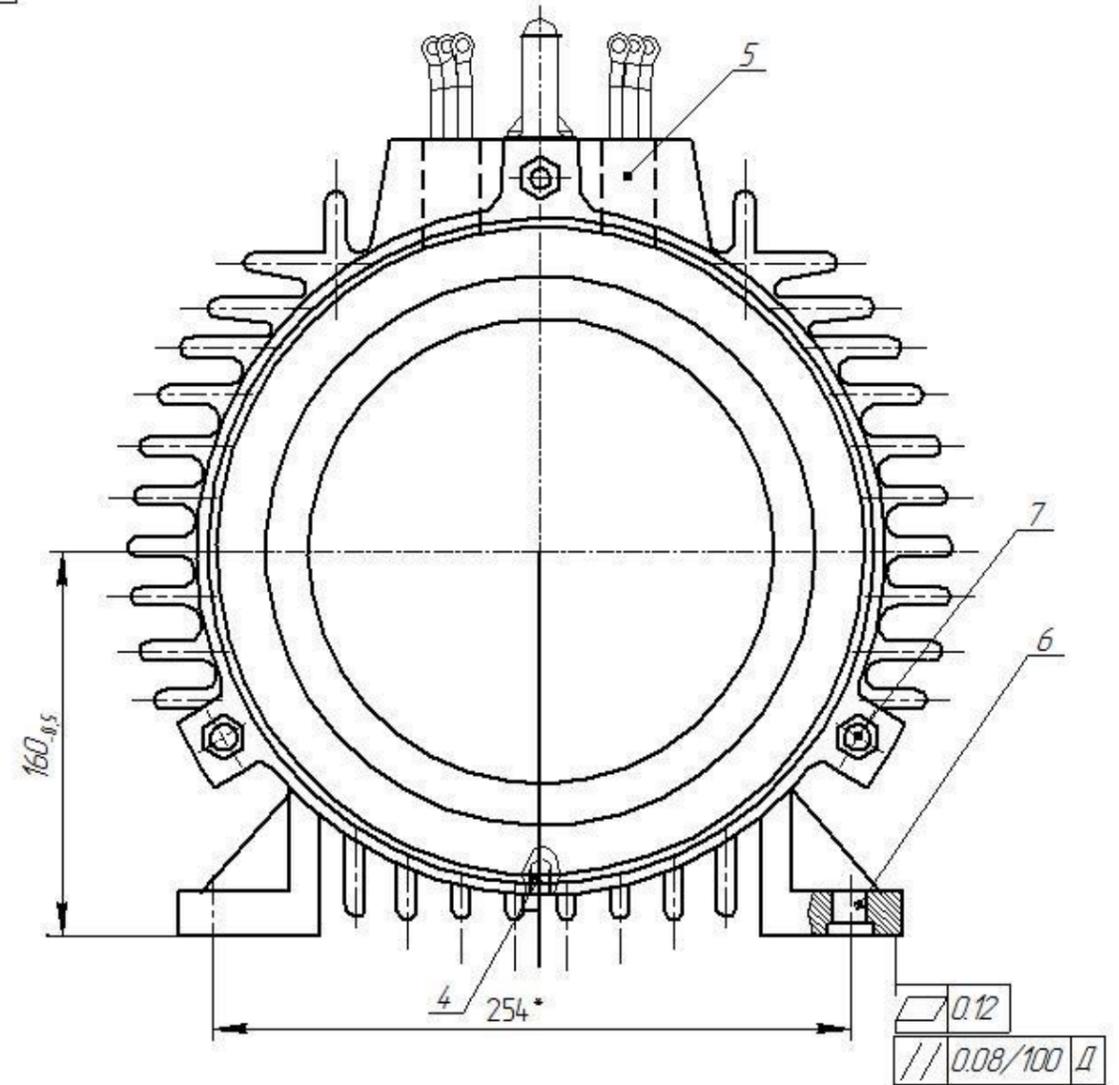
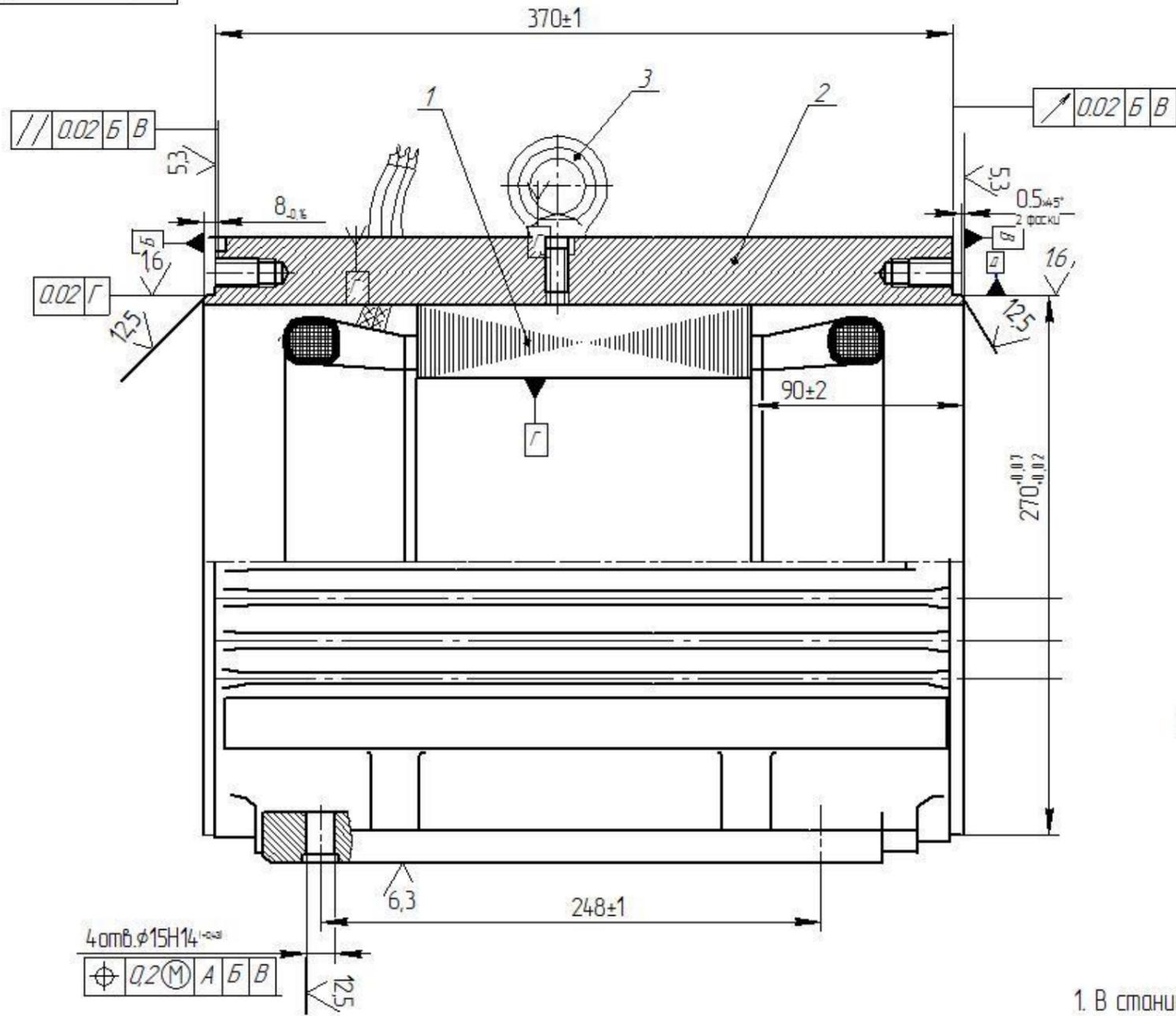
Приложение Д
Комплект документов на технологический процесс
сборки статора синхронного генератора с электромагнитным возбуждением
ФЮРА 684.214.001

Руководитель: П.Р. Баранов
 доцент, к.т.н

Выполнил: А.Г. Стасишин
 студент группы 3-7301

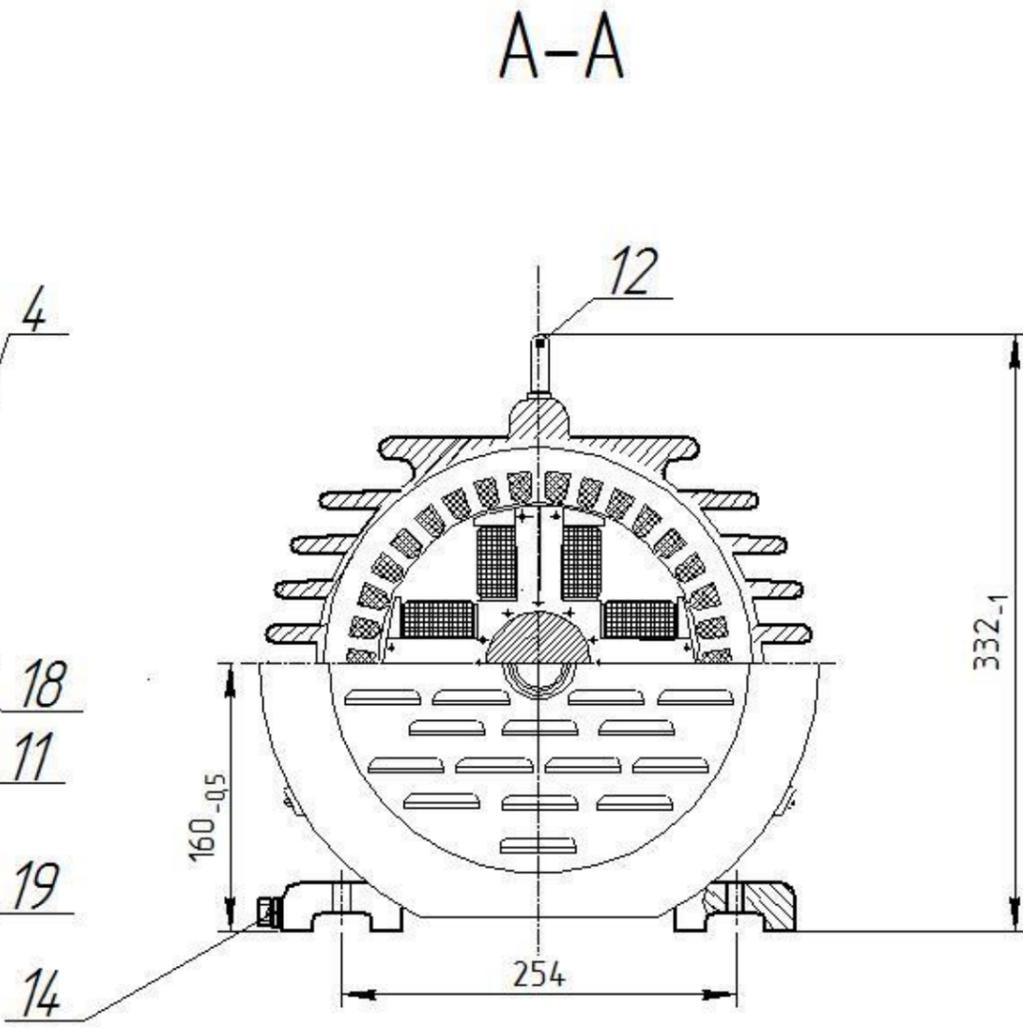
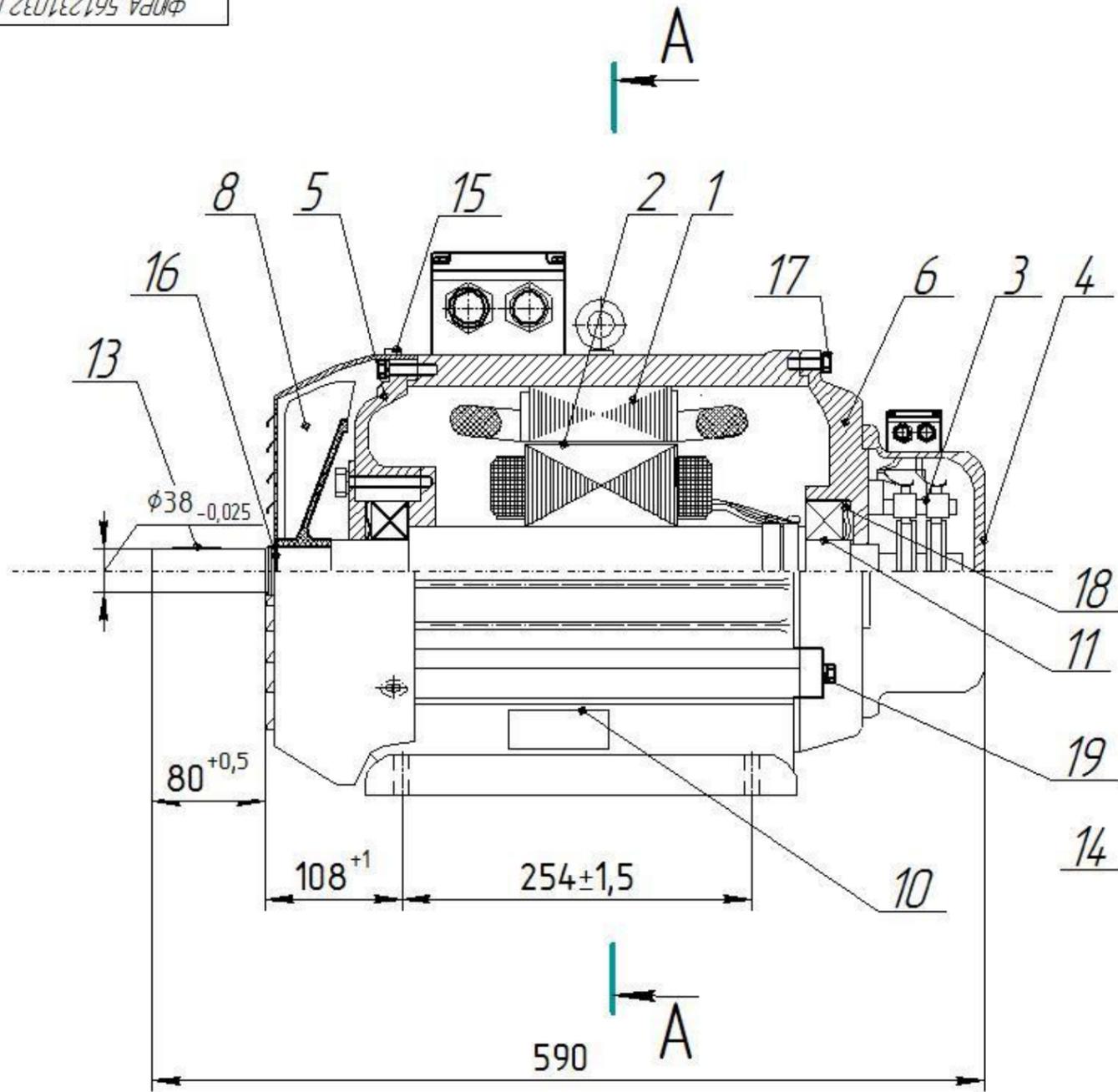
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---|-----|----|-------|----------------------------|-----|------------|-------------------|-----------------------|----|----|------|-----|------------------|------|-------|------------------|---|--|--|--|--|
| Взам. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Подп. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Статор | | | | | | | | | | | | | | ФЮРА 684.214.001 | | | | 6 | | | | |
| Разраб. | А.Г. Сташин | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Проверил | П.Р. Баранов | | | | | | | | | | | | | | | | ФЮРА 684.214.001 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | Статор | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M01 | Корпус статора/ серый чугун/ НВ190/сердечник с катушкой/сталь 2312/провод ПЭТ-155 ø1,16/после пропитки | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M02 | Код | ЕВ | МД | ЕН | Н.расх | КИМ | Код загот. | Профиль и размеры | | | | КД | МЗ | | | | | | | | | |
| | кг 11 | | | | | | отливка | | | | | 1 | 11 | | | | | | | | | |
| А | Цех | Уч. | РМ | Опер. | Код. наименование операции | | | | Обозначение документа | | | | | | | | | | | | | |
| Б | Код. наименование оборудования | | | | | | СМ | Проф. | Р | УТ | КР | КОИД | ЕН | ОП | Кшт. | Тп.з. | Тшт. | | | | | |
| A01 | 1 | 1 | 5 | 005 | 4114, Токарная | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B02 | 381130, станок токарно-винторезный 16К20 | | | | | | 2 | 19149 | 4 | 1Р | 2 | 1 | 1 | 708 | 1 | 5,94 | | | | | | |
| O03 | Выполнить черновое точение замков согласно эскизу, базировать по внутреннему диаметру станины Ø254 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T05 | Резцы чистовые по ГОСТ 18881-73, резцы черновые по ГОСТ 18881-73 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06 | Костюм МИ ГОСТ 27575-87; Ботинки кожаные Мун ГОСТ 28507-90; | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07 | Защитные очки ГОСТ 12.4.013-85; Берет; Перчатки ГОСТ 12.4.115. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A09 | 1 | 1 | 5 | 010 | 8823, Запрессовка | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B10 | Пресс гидравлический П7320 | | | | | | 2 | 18466 | 4 | 1Р | 2 | 1 | 708 | 1 | 3,0 | | | | | | | |
| T11 | Костюм МИ ГОСТ 27575-87; Ботинки кожаные Мун ГОСТ 28507-90; | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Защитные очки ГОСТ 12.4.013-85; Берет; Перчатки ГОСТ 12.4.115. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| O13 | Установить станину на столик-кронштейн пресса входной частью штока с лева на право; с правой стороны вставить в внутрь станины обечайку; установить на призму | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | установить на призму сердечник с катушками поз.1 выводными концами влево и произвести запрессовку сердечника в станину до упора. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| МК | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | |

ФЮРА 648.214.001 СБ



1. В стану запресовать сердечник с катушками поз.1
2. Наличие стружки на обмотке недопустимо.
3. Контроль биений производить не снимая статор с оправки. Биение оправки не более 0,02 мм.
- 4*Размер для справок.

| | | | | | | | |
|---------|------|---------------|-------|------|---------------------------|----------|---------|
| | | | | | ФЮРА 648.214.001 | | |
| | | | | | Статор | | |
| Изм. | Лист | И. Факун. | Полн. | Дата | Лит. | Масштаб | Масштаб |
| Разраб. | | Спасошин А.Г. | | | | | 1:3 |
| Проб. | | Баранов П.Р. | | | | | |
| Исполн. | | | | | Лист 1 | Листов 1 | |
| Утвер. | | | | | ТТУ ИИЭО группа 3-7301 | | |

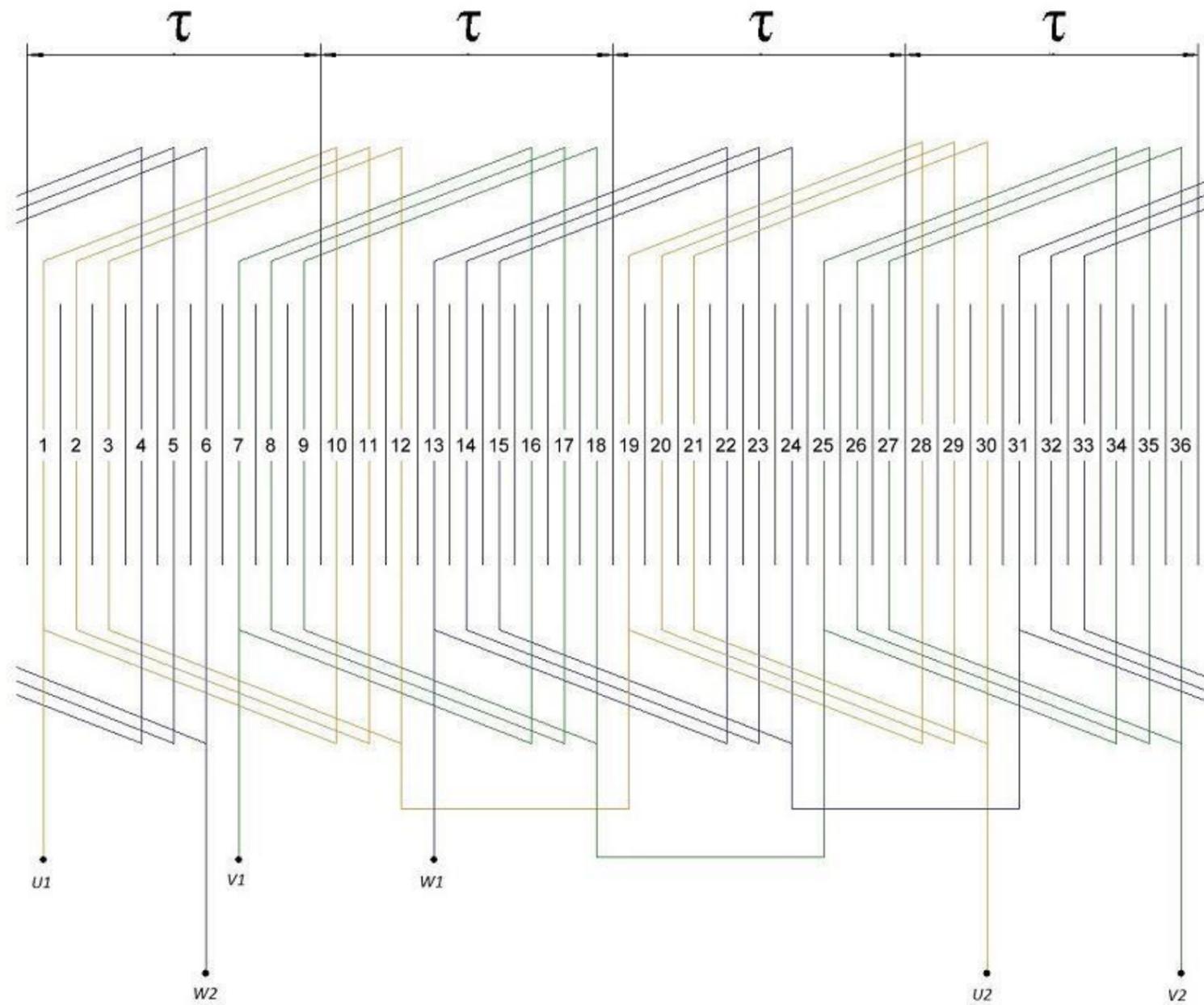


1. Допуски на габаритные, установочные и присоединительные размеры по ГОСТ 8592-79.
2. При сборке генератора шайбы пружинные поз.18 и жировые канавки покрыть смазкой ЛЗ-31 ТУЗВ.1011144-88 в количестве 0,004 кг на двигатель.
3. Подшипники поз. 11 перед сборкой нагреть.
4. Покрытие генератора эмаль МЛ-12 серая ГОСТ-9754-76
Шпатлёвка ПФ-00-2 ГОСТ 10277-90
5. Покрытие рельефа знака заземления эмаль НЦ-132К красная ГОСТ 6631-74

| | | | | | | | | |
|---------|------|----------------|-------|---------------------|----------------------|------------------------|-------|------------|
| | | | | ФЮРА 561.231.032 СБ | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | Синхронный генератор | Лит. | Масса | Количество |
| Разраб. | | Спасишин А.Г. | | | | | | 1:4 |
| Провер. | | Кунцелков В.С. | | | | | | |
| Исполн. | | | | | | | | |
| Утвер. | | | | | | | | |
| | | | | | | ТПУ ИНОЗ зр. 3-7301 | | |

| <i>Формат</i> | <i>Зона</i> | <i>Поз.</i> | <i>Обозначение</i> | <i>Наименование</i> | <i>Примечание</i> | | | | | | | | | |
|----------------|------------------------|-----------------|----------------------------|---|--|---------------|-------------|---------------|----------|----------|----------|---------------|--|--|
| | | | | <i>Документация</i> | | | | | | | | | | |
| <i>А3</i> | | | <i>ФЮРА 561.231.011 СБ</i> | <i>Сборочный чертёж</i> | | | | | | | | | | |
| | | | <i>ФЮРА 561.231.011 ПЗ</i> | <i>Пояснительная записка</i> | | | | | | | | | | |
| | | | | <i>Сборочные единицы</i> | | | | | | | | | | |
| | | <i>1</i> | <i>ФЮРА 684.214.001</i> | <i>Статор</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>2</i> | <i>ФЮРА 684.262.002</i> | <i>Ротор</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>3</i> | <i>ФЮРА 686.465.003</i> | <i>Узел контактных колец</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>4</i> | <i>ФЮРА 305.142.004</i> | <i>Защитный кожух</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | | | <i>Детали</i> | | | | | | | | | | |
| | | <i>5</i> | <i>ФЮРА 712.272.005</i> | <i>Щит подшипниковый</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>6</i> | <i>ФЮРА 712.272.006</i> | <i>Щит подшипниковый</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>8</i> | <i>ФЮРА 712.281.008</i> | <i>Вентилятор</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>10</i> | <i>ФЮРА 754.312.010</i> | <i>Табличка фирменная</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | | | <i>Стандартные изделия</i> | | | | | | | | | | |
| | | <i>11</i> | | <i>Подшипник 60309 ГОСТ 8338-75</i> | <i>2</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>12</i> | | <i>Рым болт ГОСТ 4751-73</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>13</i> | | <i>Шпонка 5x5x23 ГОСТ23360-78</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>14</i> | | <i>Болт заземления М10-30 ГОСТ 21130-75</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>15</i> | | <i>Винт М5x15</i> | <i>4</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>16</i> | | <i>Стопорное кольцо</i> | <i>1</i> | | | | | | | | | |
| | | <i>17</i> | | <i>Болт М10 х40 ГОСТ 7798 – 70</i> | <i>6</i> | | | | | | | | | |
| | | | <i>ФЮРА 561.231.011 СП</i> | | | | | | | | | | | |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дата</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Разраб.</i> | <i>Стасишин А.Г.</i> | | | | <i>Синхронный генератор</i> | | | | | | | | | |
| <i>Пров.</i> | <i>Кунчулеков Д.С.</i> | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Н.контр</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Утв.</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | <table border="1"> <tr> <td><i>Литера</i></td> <td><i>Лист</i></td> <td><i>Листов</i></td> </tr> <tr> <td><i>У</i></td> <td><i>1</i></td> <td><i>2</i></td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;"><i>3-7301</i></td> </tr> </table> | <i>Литера</i> | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> | <i>У</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3-7301</i> | | |
| <i>Литера</i> | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> | | | | | | | | | | | | |
| <i>У</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | | | | | | | | | | | | |
| <i>3-7301</i> | | | | | | | | | | | | | | |

ФЮРА 561.231.011



$2p=4; Z=36; q=3; a=1; \tau=9$

Перв. размер
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дробл.
Взам инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

| | | | | | | | | |
|----------|------|----------------|-------|------------------|--------------------------------|------|--------|---------|
| | | | | ФЮРА 561.231.011 | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | Развернутая обмотка статора | Лист | Масса | Масштаб |
| Разраб. | | Стасишин А.Г. | | | | | | |
| Проб. | | Кунцлеков Д.С. | | | | Лист | Листов | 1 |
| Т.контр. | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | | | | | |
| Утв. | | | | | | | | |

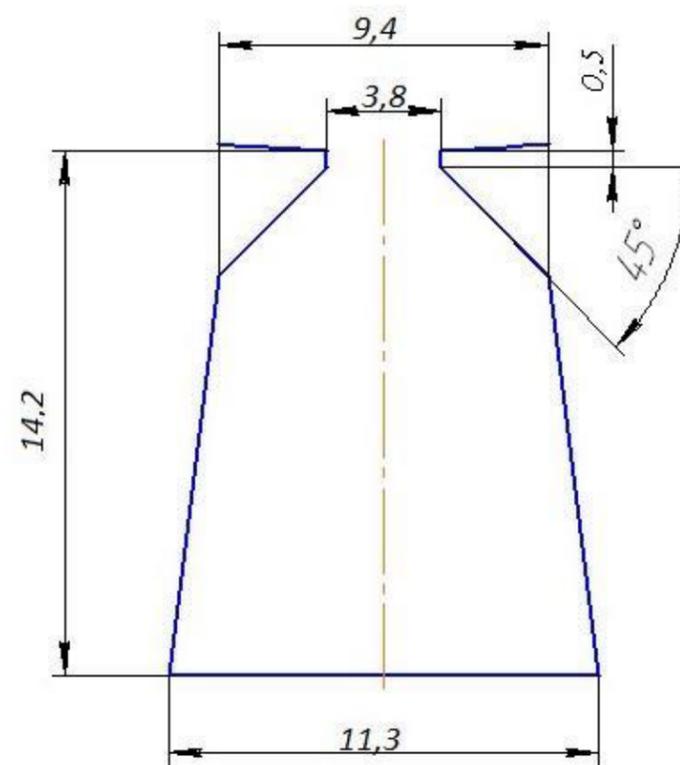
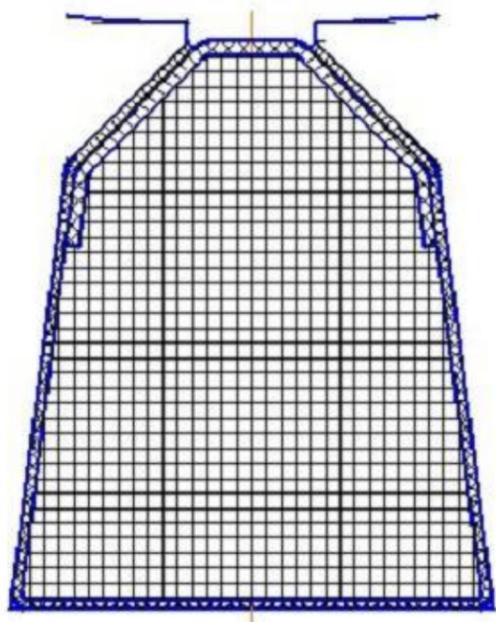
Копировал

ТПУ ИИЭО
гр. 3-7301
Формат А3

ФЮРА 561.231.011

Перв. примеч.

Справ. №



Подп. и дата

Инд. № дробл.

Взам инв. №

Подп. и дата

Инд. № подл.

| № позиции | Наименование | Материал | Обозначение размеров | Толщина, мм |
|-----------|-------------------|----------|----------------------|-------------|
| 1 | Провод обмоточный | ПЭТ-155 | $d/d_{из}$ | 1,12/1,16 |
| 2 | Коробка пазовая | Изофлекс | $b_{из2}$ | 0,4 |
| 3 | Крышка пазовая | Изофлекс | $b_{из3}$ | 0,5 |

| | | | | | | | |
|----------|------|-----------------|-------|------------------|---------------------------|--------|---------|
| | | | | ФЮРА 561.231.011 | | | |
| Изм. | Лист | № док.им. | Подп. | Дата | Лит | Масса | Масштаб |
| Разраб. | | Стасишин А.Г. | | | | | |
| Проб. | | Кундулеков Д.С. | | | | | |
| Т.контр. | | | | | Лист | Листов | 1 |
| Н.контр. | | | | | ТПУ ИнЭО Группа 3-7301 | | |
| Утв. | | | | | Формат А3 | | |

Паз статора

Копировал