

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

**В.А. КУЗЬМИЧЕВ  
А.С. ИВАНОВ  
А.О. СИДОРОВ  
Д.Н. ОРЕШКИН**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С  
КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

**Учебно-методическое пособие по курсу**

«Электрические машины»

по направлению подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Москва  
Издательство МЭИ  
2022

УДК 621.313

ББК 31.57

С 76

*Утверждено учебным управлением МЭИ*

Подготовлено на кафедре электромеханики, электрических и  
электронных аппаратов НИУ «МЭИ»

Рецензенты: Веницкий Ю.Д., докт.техн.наук, ООО «Интер РАО –  
Инжиниринг», заслуженный деятель СИГРЭ; Беспалов В.Я.,  
докт.техн.наук, профессор каф. ЭМЭЭА НИУ «МЭИ».

Авторы: В.А. Кузьмичев, А.С. Иванов, А.О. Сидоров, Д.Н. Орешкин

Проектирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым  
ротором. Учебно-методическое пособие по курсу «Электрические  
машины» / Кузьмичев В.А., Иванов А.С. и др. – М: Издательство МЭИ,  
2022.- 43 с.

Формулируется цель и определяется содержание курсового проекта  
асинхронных двигателей. Даются методические указания к выполнению  
каждого из разделов проекта. Определены содержание и объем  
графической части проекта. Приведены требования, предъявляемые  
студентам при защите выполненного проекта, рекомендуемое содержание  
доклада и основные темы вопросов на защите.

Учебно-методическое пособие предназначено для преподавателей,  
осуществляющих руководство курсовым проектом. Курсовой проект  
предусмотрен в плане обучения студентов по направлению 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.313

ББК 31.57

С 76

© Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», 2022

## ВВЕДЕНИЕ

Асинхронный двигатель является наиболее распространенным типом электрических двигателей. Его широкое применение в промышленности, энергетике, быту и на транспорте обусловлено простотой конструкции, высокой надежностью, низкой стоимостью изготовления, эксплуатации и утилизации, а также высокими энергетическими характеристиками.

Конкурентоспособность асинхронных двигателей во многом зависит от качества их проектирования.

Асинхронные двигатели выпускаются сериями. При курсовом проектировании студентам предлагается спроектировать асинхронный двигатель общепромышленного применения серии 4А по методике, приведенной в [1].

Целью настоящего пособия является формализация требований к процессам выполнения и защиты курсового проекта.

Для ее достижения в пособии определены:

- график выполнения курсового проекта;
- требования к оформлению расчетно-пояснительной записки и графического материала;
- критерии выставления оценок на защите курсового проекта.

Кроме того, в пособии даются подробные пояснения, касающиеся выполнения этапов расчета, которые вызывают наибольшие затруднения у студентов.

# **1 ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

## **1.1 График выполнения курсового проект**

Необходимым условием своевременной успешной защиты курсового проекта (КП) является систематическая работа студента на протяжении семестра в соответствии с графиком, предусматривающим выполнение каждого раздела КП в определенные сроки с оценкой полученного результата. Пример такого графика приведен в таблице 1.

График предусматривает выполнение КП за 14 учебных недель, в течение которых студент должен получить оценки за 7 контрольных мероприятий. В нем заложен запас по времени до зачетной недели, который страхует студента от несвоевременного выполнения проекта по непредвиденным причинам.

Таблица 1. График выполнения курсового проекта

Раздел	Индекс КМ: Срок КМ, учебная неделя	Веса контрольных мероприятий, %						
		КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6	КМ-7
		2	4	6	8	10	12	14
Р1: Получения задания на КП. Ознакомление с общими вопросами проектирования электрических машин.		+						
Р2: Проектирование статора асинхронного двигателя: Выбор главных размеров - Определение числа зубцов статора, количество витков и площади поперечного сечения провода обмотки статора; - Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора.			+					
Р3: Проектирование ротора асинхронного двигателя: - Расчет ротора. Воздушный зазор, обмотка и зубцовая зона ротора; - Расчет магнитной цепи; - Параметры рабочего режима; - Расчет потерь.				+				
Р4: Расчет характеристик спроектированного асинхронного двигателя: - Расчет рабочих характеристик; - Расчет токов в пусковом режиме асинхронного двигателя с учетом влияния эффекта вытеснения; - Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с учетом влияния эффекта вытеснения и насыщения от полей рассеяния; - Тепловой расчет.					+			
Р5: Выполнение научно-исследовательской части курсового проекта.						+		
Р6: Разработка конструкции электрической машины: - Подготовка комплекта чертежей							+	
Р7: Подготовка к защите курсового проекта: оформление пояснительной записки								+
Вес КМ:		5	20	20	15	15	15	10

## **1.2 Критерии выставления оценок за контрольные мероприятия**

Каждое контрольное мероприятие завершается приемкой преподавателем набора отчетных материалов, определенного в разделе 2 настоящего пособия. Она осуществляется в том случае, если представленные в материалах результаты делают возможным выполнение работ по следующему этапу КП. Ввиду специфики процесса проектирования приемка материалов контрольного мероприятия не гарантирует, что в ходе дальнейшей работы не потребуются их корректировка. Она лишь подтверждает факт того, что полученные результаты не противоречат требованиям методики проектирования (расчетные параметры находятся в заданных диапазонах) и документам Единой системы конструкторской документации. По этой причине результат выполнения контрольного мероприятия может оцениваться только по системе «сдано / не сдано». Для перехода к оценке по пятибалльной шкале требуется учитывать срок получения положительного результата, то есть выставять оценку по критерию соблюдения графика КП:

- оценка «отлично» выставляется в случае приемки отчетных материалов в установленные графиком сроки;

- оценка «хорошо» – в случае приемки отчетных материалов с отставанием от графика на срок до двух недель;

- оценка «удовлетворительно» – в случае приемки отчетных материалов с отставанием от графика на срок более двух недель.

- оценка «неудовлетворительно» – в случае непредставления отчетных материалов.

С использованием БАРС-структуры МЭИ система оценки может быть следующей.

На каждом занятии преподаватель проверяет правильность выполнения студентом разделов КП, предусмотренных текущим контрольным мероприятием. Преподаватель проверяет как количество выполненных пунктов курсового проекта, так и правильность расчётов. Если студент выполнил правильно все пункты КП, предусмотренные текущим контрольным мероприятием, то преподаватель выставляет оценку «отлично». Если студент выполнил все пункты, предусмотренные контрольным мероприятием с ошибкой, требующей пересчёта, студент получает оценку «хорошо». Если студент предоставил все пункты расчёта текущего контрольного мероприятия, но допустил большое количество ошибок, не позволяющих продолжать расчёт, либо выполнил верно лишь половину пунктов текущего КП, студент получает оценку «удовлетворительно». За непредоставление материалов, либо предоставление на проверку менее половины пунктов, предусмотренных текущим КП, проставляется оценка «неудовлетворительно». За неявку студента на занятие преподаватель ставит «0».

Если студент не получил положительную оценку за КМ, то на следующем занятии студент должен предоставить материалы текущего и предыдущего (несданного) КМ. При ликвидации задолженности за КМ выставляется новая оценка. В случае успешного выполнения КМ при передаче преподаватель изменяет оценку в системе БАРС. Оценка за передачу КМ выставляется в соответствии с критериями оценивания планового КМ. При расчёте балла текущего контроля успеваемости и семестровой составляющей оценка за данное КМ будет рассчитана как среднее значение двух попыток. Если на контрольное мероприятие студент предоставил лишь долги за прошлые КМ, а пункты текущего КМ не выполнил, то выставляется оценка за прошлые КМ, а за текущее проставляется оценка «неудовлетворительно».

### **1.3 Литература, необходимая для выполнения курсового проекта**

Основным учебным пособием при выполнении курсового проекта является учебник «Проектирование электрических машин» [1], в котором рассмотрены конструкции машин и приведена методика их проектирования.

Достоинством данной книги является наличие в ней не только описания методики проектирования, но и примера выполнения курсового проекта. Его наличие является одновременно и одним из главных недостатков. Попытка необдуманного подставления в формулы примера расчета данных выданного задания зачастую заканчивается отрицательным результатом по следующим причинам:

1. Используемые в примере формулы и конструктивные решения соответствуют требованиям задания на проектирование конкретного двигателя и не являются универсальными. В примере рассмотрен двигатель с однослойной обмоткой. Она применяется в двигателях мощностью до 15 кВт. В двигателях большей мощности обмотка должна быть двухслойной.

2. К сожалению, в расчетных формулах примера имеются ошибки. Выявить их можно в случае выполнения проекта на основе освоения теоретического материала. Некоторые исправленные формулы приведены в данном пособии.

При выполнении КП обязательным является использование Справочника «Асинхронные двигатели серии 4А» [2]. В задании на КП указывается прототип проектируемого двигателя из данного справочника. В нем даны практически все рассчитываемые в КП параметры. Всякий раз, получив по формуле, приведенной в методике [1], значение очередного параметра, целесообразно сравнить его со значением из справочника. Точного совпадения, скорее всего, не получится. Разброс значений может достигать 10-20 процентов. Большее отклонение, особенно если отличие составляет более 100%, говорит о допущенной ошибке.

НИЧ КП выполняется с использованием материалов онлайн курса *DriveConstructor*, размещённого на сайте кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ» [3]. Задачи, выполняемые в НИЧ КП, берутся из задачника этого курса и выполняются с использованием программы *DriveConstructor*, для освоения которой необходимо изучить руководство пользователя, также входящего в курс.

При выполнении КП поощряется использование студентом дополнительной литературы: учебников по электрическим машинам [7, 8, 9, 10].

#### **1.4 Защита курсового проекта**

Защита проекта проводится комиссией из двух преподавателей, включая руководителя проекта, в присутствии всех желающих студентов и преподавателей.

К защите допускаются проекты, подписанные автором и утвержденные руководителем. Подписи руководителя должны быть на всех чертежах и пояснительной записке. Пояснительная записка во время защиты передается в комиссию.

В начале защиты студент делает доклад (не более 5 минут) о выполненной работе, который должен содержать следующую информацию:

- требования задания на проект;
- основные конструкторские и расчетные решения, принятые при проектировании электромагнитной системы (конструкция и схема обмотки статора, класс нагревостойкости изоляции, форма и число пазов статора, число пазов на полюс и фазу, воздушный зазор, тип обмотки ротора, ее материал, форма и число пазов ротора, материал и конструкция сердечников статора и ротора);
- основные конструкторские решения, принятые при проектировании механической и тепловентиляционной подсистем (исполнения по степени защиты и способу охлаждения, исполнение по способу монтажа, материал корпуса и подшипниковых щитов, подшипниковые узлы, система вентиляции);
- основные характеристики спроектированного двигателя (номинальные токи, напряжения, частота вращения ротора, КПД, коэффициент мощности) с выводом об их соответствии требованиям технического задания;
- задание и результаты выполнения научно-исследовательской части проекта, результаты проведенных исследований и выводы.

После сообщения защищаемому задаются вопросы по конструкции, принципу действия, характеристикам спроектированного двигателя и по результатам НИЧ КП. Примерный перечень вопросов приведен в приложении 4.

По результатам доклада и ответов на вопросы комиссия выставляет оценку за защиту КП в соответствии со следующими критериями:

– оценка «отлично» выставляется в случае, если в ходе защиты студент показал безукоризненное знание конструкции, принципа действия, характеристик спроектированного двигателя, а также умение прогнозировать изменение параметров, характеристик, режима работы двигателя при изменении применяемых материалов, условий работы и других исходных данных;

– оценка «хорошо» выставляется в случае, если в ходе защиты студент показал знание конструкции, принципа действия, характеристик спроектированного двигателя, а также умение прогнозировать изменение параметров, характеристик, режима работы двигателя при изменении применяемых материалов, условий работы и других исходных данных. При этом студентом были допущены незначительные погрешности при ответах на заданные вопросы;

– оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если в ходе защиты студент показал знание конструкции, принципа действия, характеристик спроектированного двигателя, но не смог ответить на вопросы, касающиеся прогнозирования изменения параметров, характеристик, режима работы двигателя при изменении применяемых материалов, условий работы и других исходных данных;

– оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае если в ходе защиты студент показал незнание конструкции или принципа действия, или характеристик спроектированного двигателя.

## **2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

### **2.1 Получение задание на курсовой проект. Ознакомление с общими вопросами проектирования электрических машин (КМ-1)**

Задание на курсовой проект (КП) выдается руководителем проекта (консультантом), назначенным кафедрой.

Задание состоит из двух частей: задания на проектирование асинхронного двигателя и задания на выполнение научно-исследовательской части курсового проекта (НИЧ КП).

В задании на проектирование асинхронного двигателя указываются номинальные данные машины (мощность, число полюсов или синхронная частота вращения магнитного поля, напряжение питания), исполнения по способу монтажа (IM) и охлаждения (IC), степени защиты от внешних воздействий (IP). Задание может быть дополнено преподавателем, например, требованиями по энергетическим характеристикам АД (КПД не менее 0,7,  $\cos(\varphi)$  не менее 0,7), минимальной кратности пускового

момента или максимальной кратности пускового тока. Требования к проектируемой машине, не оговоренные в задании, должны удовлетворять соответствующим ГОСТам. В задании указывается прототип проектируемого двигателя<sup>1</sup>.

В задании на НИЧ КП указывается номер задачи или приводится сама задача из задачника онлайн курса *DriveConstructor*, размещённого на сайте кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ». При необходимости преподаватель может дать в этом разделе дополнительные указания по выполнению научно-исследовательской части. Например, изменить один из параметров, указанных в задаче.

Пример задания на курсовой проект приведен в Приложении 1.

При выдаче задания на КП до студента доводятся:

- график выполнения проекта;
- критерии выставления оценок за контрольные мероприятия;
- критерии выставления оценок на защите курсового проекта;
- рекомендуемая литература;
- общая информация о правилах оформления отчетной документации (результатов промежуточных расчетов, расчетно-пояснительной записки, графического материала);
- информация об особенностях проектирования асинхронных двигателей, приведенная ниже.

Проектирование асинхронного двигателя представляет с собой сложную задачу. Последовательное выполнение каждого раздела расчета должно сопровождаться проверкой данных на их адекватность и сопоставление с данными существующих аналогов. Процесс проектирования является итерационным. В случае получения неудовлетворительных результатов на очередном пункте расчета, необходимо вернуться на определенное число пунктов назад и скорректировать данные. В результате множества итераций получают конструкцию и характеристики асинхронного двигателя, удовлетворяющие исходным условиям. Основными этапами проектирования, как правило требующими выполнения нескольких итераций, являются:

- расчет технологического коэффициента заполнения паза статора (входит в КМ-2);
- расчет тока холостого хода (входит в КМ-3);
- расчет пусковых характеристик (входит в КМ-4).

Промежуточные расчеты могут быть выполнены с использованием компьютерных программ. Допускается рукописное оформление.

---

<sup>1</sup> Для студентов, обучающихся по профилю «Электромеханика» допускается не указывать прототип проектируемого двигателя.

## **Критерий выполнения КМ-1**

Контрольное мероприятие считается выполненным, если студент получил задание на проектирование.

## **2.2 Проектирование статора вращающейся электрической машины (КМ-2)**

### **2.2.1 Выбор главных размеров**

Первым важным этапом выполнения курсового проекта является расчет его главных размеров. Главными размерами асинхронного двигателя называют внутренний диаметр статора  $D$  и расчетную длину магнитопровода  $l_\delta$ .

Расчет проводят, задаваясь на основании имеющихся рекомендаций значениями электромагнитных нагрузок ( $A$  и  $B_\delta$ ). Критерием правильности выбора главных размеров  $D$  и  $l_\delta$  служит отношение  $\lambda = l_\delta/\tau$ , которое обычно находится в пределах, показанных на рис. 9.25 [1] для принятого исполнения машины.

В случае если  $\lambda$  оказывается слишком большим, следует повторить расчет для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения  $h$ . Если  $\lambda$  слишком мало, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты  $h$ .

### **2.2.3 Расчет статора. Определение $Z_1$ , $w_1$ и площади поперечного сечения провода обмотки статора**

Следующим этапом проектирования является определение числа зубцов статора  $Z_1$  и числа витков в фазе обмотки статора  $w_1$ . При этом  $w_1$  подбирают таким, чтобы линейная нагрузка двигателя  $A$  и индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$  были как можно более близкими к предварительным значениям, а  $Z_1$  обеспечивало бы равномерное распределение катушек обмотки.

Для соблюдения этих условий сначала выбирают зубцовое деление  $t_{z1}$ . Зубцовое деление  $t_{z1}$  должно быть определенной ширины (находиться в рекомендованных диапазонах). Для равномерного распределения витков обмотки необходимо большое число пазов и соответственно малые  $t_{z1}$ . Однако если ширина  $t_{z1}$  окажется сильно заниженной, то сталь зубцов будет сильно насыщенной, и возникнут повышенные магнитные потери. При этом прочность зубцов становится низкой. Поэтому необходимо соблюдать условие:

$$t_{z1} \geq 6-7 \text{ мм} (h \geq 56 \text{ мм})$$

Число пазов на полюс и фазу  $q_1$ , как правило, выбирается целым по условиям симметрии обмотки.

Дробное  $q_1$  обычно выполняют в многополюсных машинах для уменьшения их массы и габаритов. Однако в асинхронных двигателях при использовании дробного  $q_1$  появляется асимметрия МДС обмотки статора, что приводит к снижению их энергетических показателей. Дробное  $q_1$  в асинхронных двигателях в данной курсовом проекте выбирать не рекомендуется.

Важным этапом является выбор обмотки. Схему обмотки статора выбирают в зависимости от мощности машины, ориентируясь на конструкцию и предполагаемую технологию укладки обмотки в пазы.

В таблице 2 указаны применяемые в настоящее время формы пазов и типы обмоток статора.

Таблица 2. Формы пазов и типы обмоток статора асинхронных двигателей

Высота оси вращения $h$ , мм	Форма паза	Тип обмотки
50...160	Трапецеидальные полузакрытые	Однослойная всыпная концентрическая
180...250		Двухслойная или одно-двухслойная всыпная
280...315 ( $2p=10;12$ )		
280...355 ( $2p=2;4;6;8$ )	Прямоугольные полуоткрытые	Двухслойная из жестких катушек
355 ( $2p=10;12$ )		
400...450	Прямоугольные открытые	

Обмоточный коэффициент  $k_{об} = k_p k_y$  рассчитывают в зависимости от числа пазов на полюс и фазу  $q$  и укорочения шага обмотки  $\beta = u_{расч} / \tau$ , где  $u_{расч}$  — расчетный шаг, выраженный в количестве пазов, определяемый по формулам, приведенным в разделе 3.6 [1], в зависимости от типа обмотки. Расчёт коэффициента укорочения должен производиться с учётом реального шага обмотки.

Обмотка статора состоит из эффективных и элементарных проводников.

Эффективный проводник представляет собой совокупность элементарных проводников, которые при изготовлении обмотки одновременно наматываются по пазам магнитопровода. Он может состоять из одного либо нескольких элементарных проводников в зависимости от площади поперечного сечения. Элементарный проводник представляет собой неделимую единицу обмотки, которая состоит из одиночного провода с изоляцией. Число элементарных проводников в одном эффективном выбирают исходя из условия максимального

допустимого диаметра обмоточного провода (элементарного проводника). Причина этого ограничения заключается в затруднении с укладкой проводов большого диаметра.

При определении числа эффективных проводников в пазу  $u_{\text{п}}$  руководствуются тем, что  $u_{\text{п}}$  должно быть целым, а при двухслойной обмотке кратным двум. Использование двухслойных обмоток с нечетным  $u_{\text{п}}$  приводит к необходимости выполнять разновитковые катушки из-за чего усложняется технология изготовления и укладки обмотки. Поэтому полученные в расчете числа  $u_{\text{п}}$  необходимо округлять до ближайшего целого или четного числа:

$u_{\text{п}}$  – целое (однослойная обмотка),

$u_{\text{п}}$  – четное (двухслойная обмотка).

Линейная нагрузка  $A$  и индукция в зазоре  $B_{\delta}$  не должны отличаться от рекомендованных диапазонов (по рис.9.22 [1]) более чем на 5%.

Если полученное значение  $B_{\delta}$  выходит за пределы рекомендуемой области (см. табл. 18,19,20 [1]) более чем на 5%, следует принять другое значение числа  $u_{\text{п}}$  и повторить расчет.

Если  $A$  и  $B_{\delta}$  выходят за диапазоны, что обычно случается вследствие грубого округления рассчитанного  $u_{\text{п}}$ , то в таком случае  $u_{\text{п}}$  не округляют, а подбирают число параллельных ветвей таким образом, чтобы удовлетворить отмеченным условиям:

$$u_{\text{п}} = a \cdot u'_{\text{п}},$$
$$a \leq 2p.$$

Число параллельных ветвей  $a$  может принимать значения целого делителя  $2p$ , например, для  $2p=6$   $a$  может принимать значения 1, 2, 3 или 6. Максимально возможное число  $a$  равно числу полюсов проектируемой электрической машины.

Если линейная нагрузка и индукция в воздушном зазоре при принятом числе пазов и эффективных проводников в пазу находятся в рекомендуемых пределах, следует переходить к расчету сечения эффективного проводника и обмоточного провода.

В обмотках, предназначенных для механизированной укладки, диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,4 мм, а при ручной укладке (двигатели с  $h > 160$  мм) — не более 1,7 мм.

$$d_{\text{из}} \leq 1,4 \text{ мм } (h \leq 160 \text{ мм})$$

$$d_{\text{из}} \leq 1,7 \text{ мм } (h > 160 \text{ мм})$$

Это условие должно соблюдаться для повышения надежности обмотки и упрощения ее укладки в пазы. Если сечение эффективного проводника выше, его делят на несколько элементарных проводников  $n_{\text{эл}}$ .

Однако число  $n_{эл}$  ограничивается 6-8 из-за технологических трудностей намотки катушек.

$$n_{эл} \leq 6-8.$$

Если условие не соблюдается, то увеличивают число параллельных ветвей  $a$ .

Окончательная плотность тока в обмотке статора должна быть похожей на плотность тока, рассчитанную предварительно. Обычно плотность тока асинхронных двигателей составляет 3,5-6 А/мм<sup>2</sup>.

Значения  $A$ ,  $B_{\delta}$ ,  $J_1$ ,  $\eta$ ,  $\cos\phi$  рекомендуется сравнить с данными прототипа серии 4А [3].

### 2.2.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Круглые обмоточные провода всыпной обмотки могут быть уложены в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны при всыпных обмотках выбирают таким образом, чтобы зубцы имели параллельные грани. Такие зубцы имеют постоянное сечение, индукция в них не изменяется и магнитное напряжение зубцов с параллельными гранями оказывается меньше, чем магнитное напряжение трапецеидальных зубцов. Это объясняется отсутствием в зубцах с параллельными гранями участков с высокой индукцией, напряженность поля в которых резко возрастает из-за нелинейности магнитной характеристики стали. При этом если зубцовая зона будет иметь параллельные грани, то пазовая часть получается трапецеидальной.

Угол наклона и высота шлица в полузакрытых пазах статора выбираются следующим образом:

$$\beta=45^\circ (h \leq 250 \text{ мм})$$

$$\beta=30^\circ (h > 250 \text{ мм})$$

$$h_{ш}=0,5 \text{ мм} (h \leq 132 \text{ мм})$$

$$h_{ш}=1 \text{ мм} (h > 160 \text{ мм})$$

Ширину шлица  $b_{ш}$  выбирают исходя из табл. 9.16 [1]. Если выполнить  $b_{ш}$  меньшей, то укладка обмотки в пазы может быть затруднительной (с вероятностью повреждения изоляции), а в некоторых случаях и невозможной.

Расчет заканчивается определением технологического коэффициента заполнения.

Для расчета коэффициента заполнения паза необходимо, помимо прочего, учесть площадь поперечного сечения паза, занимаемую и прокладками в пазу  $S_{пр}$ .

Площадь, занимаемая прокладками в пазу для двигателей с двухслойной обмоткой (на дне паза, под клином и между слоями обмотки в двухслойной обмотке),  $m^2$ , (см. таблицы 3.1, 3.2 [1]):

– для двигателей с  $h = 180 \dots 250$  мм  $S_{пр} = (0,9 b_1 + 0,4 b_2) 10^{-3}$ ;

– для двигателей с  $h \geq 280$  мм  $S_{пр} = 0,6 (b_1 + b_2) 10^{-3}$

Контролируемая величина  $k_3 = 0,69 \dots 0,71$  для  $2p=2$  и  $k_3 = 0,72 \dots 0,74$  для  $2p \geq 4$ .

Если полученное значение  $k_3$  ниже указанных пределов, то площадь паза следует уменьшить за счет увеличения  $h_a$  или  $b_{1z}$  или обоих размеров одновременно в зависимости от принятого в расчете значения допустимой индукции. Индукция в зубцах или ярме статора при этом уменьшится. Уменьшение индукции ниже пределов, указанных в табл. 9.12 [1], показывает, что главные размеры двигателя завышены и активная сталь недоиспользована. В этом случае следует уменьшить длину сердечника или перейти на ближайшую меньшую высоту оси вращения.

Если полученное значение  $k_3$  выше указанных пределов и его не удастся уменьшить до допустимых пределов даже при размерах  $h_a$  и  $b_{1z}$ , рассчитанных по наибольшим допустимым значениям  $B_a$  и  $B_{z1}$ , или перейдя на большее сечение элементарного провода при уменьшении  $n_{эл}$ , то следует увеличить длину магнитопровода или просчитать другой вариант двигателя, изменив главные размеры.

### **Критерии выполнения КМ-2**

Контрольное мероприятие считается выполненным при приемке преподавателем:

- расчетной части задания;
- эскиз паза статора (см. рисунок 1);
- эскиз магнитной системы статора (см. рисунок 2).

## **2.3 Проектирование ротора асинхронного двигателя (КМ-3)**

### **2.3.1 Выбор воздушного зазора**

Предварительно выбранный по рекомендациям [1] зазор необходимо округлить до стандартного значения. Зазор округляется:

– до 0,05 при  $\delta < 0,5$  мм;

– до 0,1 при  $\delta > 0,5$  мм.

Принятый зазор может быть изменен после расчета намагничивающего тока  $I_\mu$ , в случае выхода  $I_\mu$  из допустимого диапазона. По технологическим причинам нижняя граница выполнения зазора составляет 0,25 мм.

### **2.3.2 Расчет ротора**

Наиболее распространенный материал обмоток ротора асинхронного двигателя – алюминий. При изготовлении обмотки расплавленный

алюминий заливается в пазы, образуя короткозамкнутую обмотку. Зубцы ротора имеют параллельные грани по тем же причинам, что и зубцы статора.

Плотность тока в обмотке ротора должна быть выбрана из диапазона  $J_2 = (2,5 \dots 3,5) 10^6 \text{ А/м}^2$  при заливке алюминием.

В расчете не следует предварительно выбирать плотность тока по нижней границе, это может привести к недопустимо низким значениям пускового момента двигателя.

Окончательная плотность тока в стержне литой клетки  $J_2$  должна быть близка к предварительно выбранной.

В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором с высотой оси вращения  $h \leq 250 \text{ мм}$  выполняют трапециевидальные пазы со шлицем.

Размеры паза ротора выбираются следующим образом:

$h < 160 \text{ мм}$  – полузакрытые пазы:

– при  $h < 100 \text{ мм}$  –  $b_{\text{ш}} = 1 \text{ мм}$ ,  $h_{\text{ш}} = 0,5 \text{ мм}$ ,

– при  $h = 112 \dots 132 \text{ мм}$  –  $b_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}$ ,  $h_{\text{ш}} = 0,75 \text{ мм}$ .

$h = 160 \dots 250 \text{ мм}$  – закрытые пазы:

$b_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}$ ,  $h_{\text{ш}} = 0,7 \text{ мм}$

– при  $2p \geq 4$   $h'_{\text{ш}} = 0,3 \text{ мм}$ ,

– при  $2p = 2$   $h'_{\text{ш}} = 1,0 \dots 1,5 \text{ мм}$ .

В двигателях с высотой оси вращения  $h = 280 \dots 355 \text{ мм}$  выполняют закрытые пазы ротора: при  $2p \geq 4$  – трапециевидальные, сужающиеся в верхней части; при  $2p = 2$  – лопаточные.

Условия высококачественной заливки пазов алюминием требуют, чтобы диаметр закругления нижней части паза в двигателях с  $h \leq 132 \text{ мм}$  был не менее 1,5-2 мм, а в двигателях с  $h \geq 160 \text{ мм}$  – не менее 2,5-3 мм.

В расчёте ширины зубца ротора в сечениях  $b'_{z2}$  и  $b''_{z2}$  правильными следует считать формулы:

$$b'_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}}) - b_1}{Z_2} - b_1$$

$$b''_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2h_{\text{ш}} + b_2}{Z_2} - b_2$$

При небольшом расхождении размеров  $b'_{z2}$  и  $b''_{z2}$  в расчете магнитного напряжения зубцов ротора используется средняя ширина зубца  $b_{z2} = (b'_{z2} + b''_{z2}) / 2$ . При заметных расхождениях расчет проводят так же, как для трапециевидальных зубцов ротора.

### 2.3.3 Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи сводится к нахождению коэффициента насыщения зубцовой зоны и намагничивающего тока.

Марку электротехнической стали рекомендуется выбирать в зависимости от высоты оси вращения проектируемого асинхронного двигателя:

Марка стали	2013	2212	2214	2312	2412
Высота оси вращения, мм	45...250	160...250	71...250	280...355	280...560

Значение коэффициента насыщения зубцовой зоны  $k_z$  позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемой машины. При  $k_z > 1,5-1,6$  имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны. В этом случае большая часть магнитного потока вытесняется из зубцов в пазы магнитопровода (возрастает поток рассеяния). Он распределяется неравномерно по объему асинхронного двигателя. При этом магнитные потери становятся повышенными, а КПД низким. Если  $k_z < 1,2$ , то зубцовая зона плохо использована или воздушный зазор взят слишком большим. Магнитный поток в этом случае практически полностью проходит по зубцам магнитопровода. При этом коэффициент мощности становится низким, двигатель потребляет большую долю реактивного тока из сети. В обоих случаях в расчет должны быть внесены соответствующие коррективы.

$$1,2 < k_z < 1,6$$

Величина  $k_z$  зависит от магнитных напряжений  $F_{z1}, F_{z2}, F_\delta$ :

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta};$$

$F_{z1}, F_{z2}$  зависят от индукций в соответствующих элементах конструкции.  $F_{z1}$  фактически определено по результатам расчета статора.  $F_\delta$  зависит от величины воздушного зазора, которая одновременно оказывает влияние на величину намагничивающего тока. Поэтому для корректировки  $k_z$  рекомендуется изменять  $F_{z2}$  с помощью изменения индукции в зубце ротора  $B_{z2}$ .

Значение намагничивающего тока, выраженное в долях от номинального, должно находиться в диапазоне:

$$0,2 \leq I_\mu^* \leq 0,3$$

Относительное значение  $I_\mu^*$  служит определенным критерием правильности проведенного выбора и расчета размеров и обмотки двигателя. Так, если при проектировании четырехполюсного двигателя средней мощности расчет показал, что  $I_\mu^* < 0,2-0,18$ , то это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы.

Если же в аналогичном двигателе  $I_{\mu}^* > 0,3-0,35$ , то это означает, что либо его габариты взяты меньшими, чем следовало, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода.

Изменение  $I_{\mu}$  может быть достигнуто изменением величины воздушного зазора, поскольку именно в этой зоне имеется наибольшее значение магнитного напряжения.

В небольших двигателях мощностью менее 2-3 кВт  $I_{\mu}^*$  может достигать значения 0,5-0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушного зазора, характерным для двигателей малой мощности.

### **Критерии выполнения КМ-3**

Контрольное мероприятие считается выполненным при приемке преподавателем:

- расчетной части задания;
- эскиза паза ротора (см. рисунок 1);
- эскиза магнитной системы ротора (см. рисунок 2).

## **2.4 Расчет характеристик спроектированного асинхронного двигателя (КМ-4)**

### **2.4.1 Параметры рабочего режима**

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора  $r_1$ ,  $x_1$ , ротора  $r_2$ ,  $x_2$ , сопротивление взаимной индуктивности  $x_{12}$  и расчетное сопротивление  $r'_{12}$ , введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Параметры схемы замещения определяют рабочие и пусковые характеристики спроектированного асинхронного двигателя. В расчетах используется Т-образная схема замещения.

Параметры рабочего режима  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $x'_1$ ,  $x'_2$  необходимо сравнить с данными прототипа. Если полученные данные имеют хотя бы тот же порядок, значит с большой долей вероятности случайных ошибок удалось избежать.

В основном относительные значения индуктивных сопротивлений находятся в пределах:

$$x'_1 = 0,08 \dots 0,14,$$

$$x'_2 = 0,1 \dots 0,16.$$

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора:

$$r_1 \approx r'_2 \approx 0,02 \dots 0,03.$$

Относительное сопротивление  $r_{12}^*$  обычно составляет:

$$r_{12}^* = 0,05 \dots 0,2.$$

Если значения параметров проектируемого двигателя сравниваются с параметрами прототипа по справочнику [2], то следует учесть, что в справочнике [2] параметры приведены для Г-образной схемы замещения. Формулы пересчёта параметров из Г-образной схемы в Т-образную приведены также в справочнике [2].

#### **2.4.2 Расчет потерь**

В данном разделе рассчитываются потери в стали (основные и добавочные), электрические, вентиляционные, механические и добавочные при нагрузке.

Основные потери в стали асинхронных двигателей рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора в режимах, близких к номинальному, очень мала, и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

При расчёте механических потерь на трение в подшипниках и вентиляционных потерь студент должен разобраться в том, какая система охлаждения применяется в проектируемом двигателе (обратить внимание на исполнение по способу охлаждения (IC) и степени защиты от внешних воздействий (IP) по заданию):

двигатели с радиальной (с радиальными каналами вентиляции или без них) или аксиальной системой вентиляции имеют исполнение IP23, IC01, двигатели с внешним обдувом - IP44, IC0141.

Добавочные потери в стали, возникающие при холостом ходе, подразделяются на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсации индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах).

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми роторами со стержневой обмоткой обычно очень малы, так как в пазах таких роторов мало  $b_{ш2}$  и пульсации индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не производят.

Добавочные потери при номинальном режиме работы асинхронных двигателей возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, т.е. токов между стержнями, замыкающихся через листы сердечника ротора. Эти токи особенно заметны при скошенных пазах ротора. В таких двигателях, как показывает опыт эксплуатации, добавочные потери при нагрузке могут достигать 1-2% (а в некоторых случаях даже больше) от подводимой мощности. ГОСТ устанавливает

средние расчетные добавочные потери при номинальной нагрузке, равны 0,5% номинальной мощности.

### 2.4.3 Расчет рабочих характеристик

Далее, если вышеуказанные этапы расчета получились, проводится расчет рабочих характеристик, из которых определяются номинальное значение скольжения  $s_{ном}$ , которому соответствует номинальная мощность  $P_{2ном}$ .

Методы расчета характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует Г-образная схема замещения.

После построения характеристик уточняют номинальные ток статора, скольжение, КПД и  $\cos\phi$ , достраивая на графиках вспомогательные линии, соответствующие номинальным данным.

Все характеристики требуется продлить до пересечения с осью ординат и указать на графиках значения величин при мощности  $P_2=0$ , т.е. при работе машины на холостом ходу.

Рабочие характеристики должны быть построены в диапазоне полезной мощности  $P_2$  от 0 до  $1,2P_{ном}$ . На рабочих и пусковых характеристиках следует обозначить точки, для которых рассчитывались значения. Расчетных точек должно быть не менее семи для рабочих характеристик и не менее шести для пусковых. Должны быть рассчитаны значения и обозначены точки для скольжений несколько больше и несколько меньше критического, при критическом скольжении момент должен быть максимальным.

### 2.4.4 Расчет токов в пусковом режиме асинхронного двигателя с учетом влияния эффекта вытеснения

С увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается, при этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины.

Корректными формулами для расчета функции  $\phi(\xi)$  по рис. 9.57 [1] следует считать:

$$\phi = \xi - 1 \text{ при } \xi > 4 \text{ и } \phi = 0,089\xi^4 \text{ при } \xi < 1$$

### 2.4.5 Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с учетом влияния эффекта вытеснения и насыщения от полей рассеяния

При расчете влияния параметров предыдущих режимов можно было не учитывать влияние насыщения, так как токи в этих режимах относительно малы и потоки рассеяния не создают заметного падения напряжения в стали зубцов. При увеличении скольжения свыше критического и в пусковых режимах токи возрастают, и потоки рассеяния увеличиваются. Поэтому в расчетах задаются предполагаемой кратностью увеличения тока, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны. Ориентировочно для расчета пусковых режимов принимают  $K_{нас}=1,1-1,4$ .

При расчете токов в пусковом режиме коэффициент насыщения принимался равным  $K_{нас}=1,1-1,4$  (предварительное значение). В результате расчета пусковых характеристик с учетом эффекта вытеснения и насыщения от полей рассеяния находят уточненное значение  $K'_{нас}$ . Предварительное значение  $K_{нас}$  корректируется до тех пор, пока  $K'_{нас}$  и  $K_{нас}$  будут отличаться менее чем на 5%. В этом случае итерационный процесс расчета заканчивается и строятся пусковые характеристики.

В таблице 3 приведены допустимые относительные значения моментов и начального пускового тока двигателей с короткозамкнутыми роторами серии 4А. Спроектированная заново асинхронная машина на базе серии 4А должна иметь пусковые характеристики, удовлетворяющие этим требованиям.

Таблица 3. Кратность начальных пусковых моментов  $M^*_п$  токов  $I^*_п$  асинхронных двигателей

Исполнение	2р	Высота оси вращения, мм					
		≤ 132		160-250		≥ 280	
		$M^*_п$	$I^*_п$	$M^*_п$	$I^*_п$	$M^*_п$	$I^*_п$
IP44	2	1,7-2	6,5-7,5	1,2-1,4	7-7,5	1-1,2	6,5-7
	4	2-2,2	5-7,5	1,2-1,4	6,5-7,5	1,2-1,3	5,5-7
	6	2-2,2	4-6,5	1,2-1,3	5-6,5	1,4	5,5-6,5
	8	1,6-1,9	4-5,5	1,2-1,4	5,5-6	1,2	5,5-6,5
	10	-	-	1,2	6	1	6
	12	-	-	-	-	1	6
IP23	2	-	-	1,2-1,3	7,0	1,2	6,5-7
	4	-	-	1,2-1,3	6,5	1,2	6,0-7
	6	-	-	1,2	6-7	1,2	6
	8	-	-	1,2-1,3	5,5-6,0	1,2	5,0-5,5
	10	-	-	-	-	1	5,5
	12	-	-	-	-	1	5,5

Если по результатам расчёта кратность пускового момента оказывается недостаточной, нужно изменить первоначально выбранную плотность тока ротора в сторону увеличения или изменить форму паза

ротора, стремясь увеличить активное сопротивление ротора или добиваясь более явного эффекта вытеснения тока.

На рабочих характеристиках должны быть указаны номинальные значения величин при номинальной мощности, на пусковых характеристиках – критическое скольжение, кратности максимального и пускового моментов, пускового тока.

#### 2.4.5 Тепловой расчет

Тепловой расчет проводится методом тепловых схем замещения. Он включает в себя определение превышения температуры внутренней поверхности сердечника статора, перепада температуры в изоляции пазовой части статора, превышения температуры лобовых частей, превышения температуры обмотки статора, превышения температуры внутри двигателя.

В результате определяется конечная температура превышения обмотки статора над окружающей средой. Эта температура определяет класс изоляции электродвигателя. Обычно в задании приводится класс нагревостойкости  $F$ . Максимальная температура окружающей среды для умеренного климата принимается равной  $40^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды должно быть ниже допустимой температуры для выбранного класса изоляции:

$$\Delta\vartheta_1 + 40 < \vartheta_{\text{доп}}$$

Для класса нагревостойкости  $F$   $\vartheta_{\text{доп}} = 140 - 150^{\circ}\text{C}$

Расчет заканчивается проверкой выполнения условий охлаждения двигателя. Требуемый для охлаждения расход воздуха  $\Theta_{\text{в}}$  должен быть меньше расхода воздуха, обеспечиваемого наружным вентилятором:

$$\Theta'_{\text{в}} > \Theta_{\text{в}}$$

Если все приведенные условия соблюдаются, то асинхронный двигатель спроектирован правильно.

#### Критерий выполнения КМ-4

Контрольное мероприятие считается выполненным при приемке преподавателем:

- расчетной части задания,
- построенных рабочих и пусковых характеристиках.

#### 2.5. Выполнение научно-исследовательской части курсового проекта (КМ-5)

Целями НИЧ КП являются:

- ознакомление студента с практическими применениями асинхронных машин на примере разработки конкретных электромеханических систем;

- изучение влияния используемых материалов, условий окружающей среды и других факторов на характеристики асинхронных машин;

- получения навыков самостоятельного изучения нового программного продукта.

Их достижение достигается путем решения задач из задачника онлайн курса *DriveConstructor*, размещенного на сайте кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ» [3].

При выполнении НИЧ КП студенту по руководству пользователя при минимальной помощи преподавателя необходимо освоить программу *DriveConstructor* и решить с его помощью поставленную перед ним задачу. Достоинством данного программного продукта является использование в нем базы данных реальных электродвигателей, трансформаторов, преобразователей частоты, кабелей и редукторов. Пример оформления отчетных материалов по НИЧ КП приведен в приложении 5.

### **Критерий выполнения КМ-5**

Контрольное мероприятие считается выполненным при приемке преподавателем расчетной части задания.

## **2.6 Разработка конструкции электрической машины (КМ-6)**

В [4] рассмотрены этапы конструирования асинхронных двигателей, анализируются типовые конструкторские решения для деталей и сборочных единиц, даются рекомендации по их выбору, приведены конструкции и их краткое описание для основных исполнений асинхронных двигателей.

Студенту требуется детально изучить общую компоновку двигателя, уяснить назначение отдельных узлов и деталей, их конструкцию, познакомиться с другими возможными вариантами конструктивного исполнения этих же деталей в аналогичных машинах. Большую помощь в этой работе окажут стенды с деталями электрических машин и учебные плакаты, имеющиеся на кафедре электромеханики, электрических и электронных аппаратов. Лишь после этого можно приступить к составлению чертежа, начав эту работу с вычерчивания активных частей машины по размерам, полученным при расчете.

Масштаб чертежа желательно выбрать таким, чтобы продольный и поперечные виды машины разместились на одном листе формата А1. Однако следует иметь в виду, что при выполнении проекта малых машин

нецелесообразно выбирать масштаб более 2,5:1, а при выполнении проекта крупных машин — масштаб меньше чем 1:5. В этих случаях число листов с общими видами машин может быть уменьшено или, соответственно, увеличено.

При конструировании проверяются размерные соотношения, полученные или принятые ранее при расчетах, причем в процессе разработки конструкции в них могут быть внесены частичные изменения, например, изменено количество или диаметр аксиальных каналов в сердечнике ротора или их расположение. Так как в проекте не проводится подробный механический расчет всех деталей, размеры отдельных конструктивных элементов двигателя могут быть определены приближенно.

На чертежах двигатель должен быть представлен в продольном и поперечном видах с разрезами. На продольном виде разрез в большинстве случаев выполняется в верхней части чертежа до осевой линии. На поперечном виде разрез выполняется справа от осевой линии через сердечники статора и ротора. На этих разрезах должны быть показаны конструкция сердечников корпуса, торцевых щитов, вала, подшипниковых узлов, расположение лобовых частей обмоток статора и ротора, конструкция и расположение диффузоров и вентилятора, контактных колец и т. п.

Кроме общих видов должны быть начерчены паз статора и ротора в увеличенном масштабе с указанием размеров и расположения проводников и пазовой изоляции и, по согласованию с руководителем, элемент схемы обмотки статора или условная схема соединений катушечных групп одной фазы. При проектировании двигателя с фазным ротором обязательно выполняется условная схема обмотки статора (или одной ее фазы) и полная схема-развертка обмотки ротора. На этом же чертеже приводятся рабочие и пусковые характеристики двигателя. Пусковые характеристики (зависимость тока и момента от скольжения) строятся в относительных единицах.

Все чертежи должны быть выполнены в соответствии с правилами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД). На каждом листе в правом нижнем углу необходимо поместить основную надпись (угловой штамп). Спецификация, содержащая 15–20 наименований основных деталей конструкции, располагается либо на листе чертежа двигателя над основной надписью, либо выполняется на отдельном листе формата А4.

### **Критерий выполнения КМ-6**

Контрольное мероприятие считается выполненным при приемке преподавателем чертежа сборочного чертежа (комплекта чертежей) асинхронного двигателя.

## **2.7 Подготовка к защите курсового проекта (КМ-7)**

### **2.7.1 Требования к оформлению расчетно-пояснительной записки**

Расчетно-пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 2.105-2019 [5]. Пояснительная записка должна быть изложена на листах бумаги формата А4 (297x210) и сброшюрована вместе с рисунками. Обратная сторона листа не должна использоваться. Титульный лист к записке составляется по Приложению 2. После титульного листа должно следовать задание на проект, выданное студенту в начале работы, затем оглавление и сама записка. В конце записки должен быть приведен список использованной литературы, на которую должны быть даны ссылки. Страницы записки и рисунки должны быть пронумерованы.

По разрешению преподавателя текст может быть написан от руки. Справа и слева от листа оставляются поля.

При оформлении расчетов сначала приводится расчетная формула в общем виде, затем та же формула с заменой букв соответствующими числами и, наконец, численный результат с указанием размерности.

Расчеты необходимо сопровождать краткими пояснениями по примеру расчёта [3, раздел 9.16].

К пояснительной записке прилагается сводная таблица расчетных данных (см. Приложение 3).

### **2.7.2 Требования к оформлению графической части курсового проекта**

К расчётно-пояснительной записке должны прилагаться следующие графические материалы:

- сборочный чертёж асинхронного двигателя (вид спереди и вид слева с обозначением позиций),
- пазы,
- магнитная система,
- схема обмотки статора,
- результаты выполнения НИЧ КП.

Сборочный чертеж оформляется на листе формата А1. Помимо двух видов и спецификации двигателя на чертеж должны быть вынесены чертежи пазов статора и ротора с заполнением, рабочие и пусковые характеристики.

Схема обмотки статора и результаты выполнения НИЧ КП должны быть представлены на листе формата А2. Результаты НИЧ КП должны содержать:

- задание,

– основные полученные результаты с указанием параметров рассмотренных систем, графиков (при необходимости),

– выводов.

Рабочие и пусковые характеристики должны быть построены в соответствии с требованиями разделов 2.4.3, 2.4.4 настоящего пособия.

Чертежи должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.109-73 [6]. Для подготовки чертежей рекомендуется воспользоваться [2].

Чертежи выполняются в графических редакторах (например, КОМПАС) в соответствии с требованиями единой системы конструкторской документации (ЕСКД), представляются в формате *pdf* и в распечатанном виде.

После выполнения всех этапов курсового проекта проводится его защита. Студент демонстрирует навыки, полученные в ходе выполнения курсового проекта, отвечает на вопросы преподавателей, принимающих защиту по расчету, конструкции, общей теории АД. Для подготовки к защите курсового проекта рекомендуется ответить на контрольные вопросы.

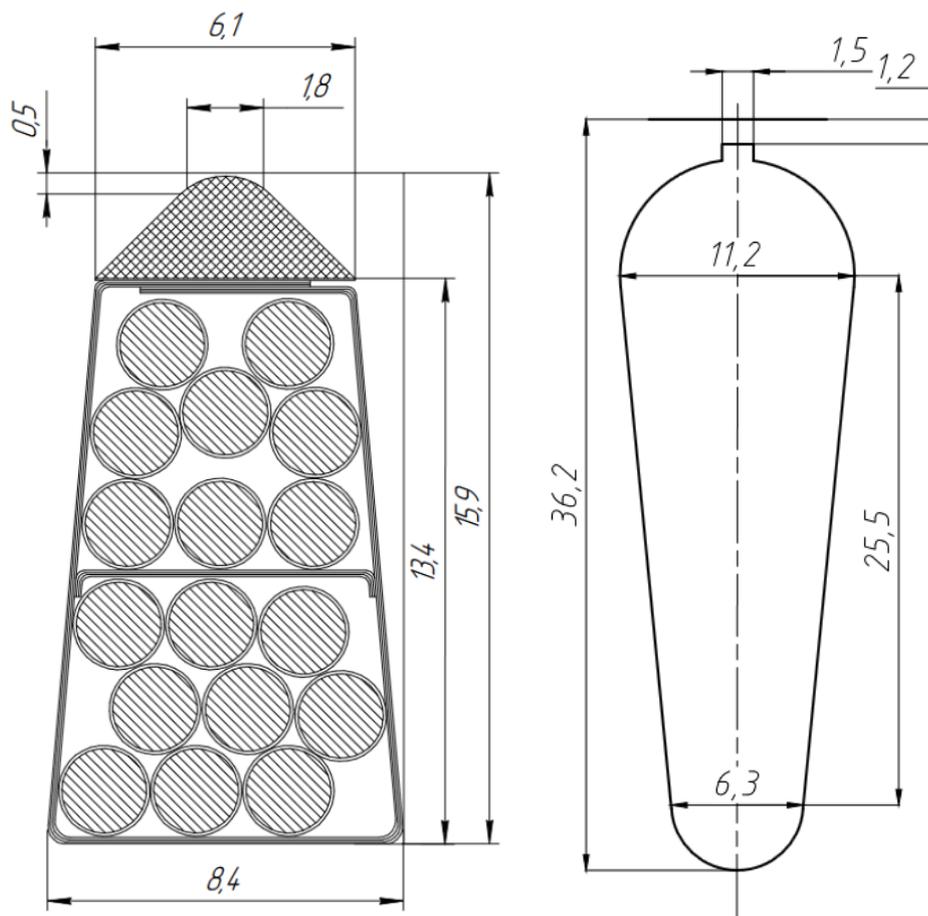


Рисунок 1 – Примеры чертежей пазов статора (слева) и ротора (справа)

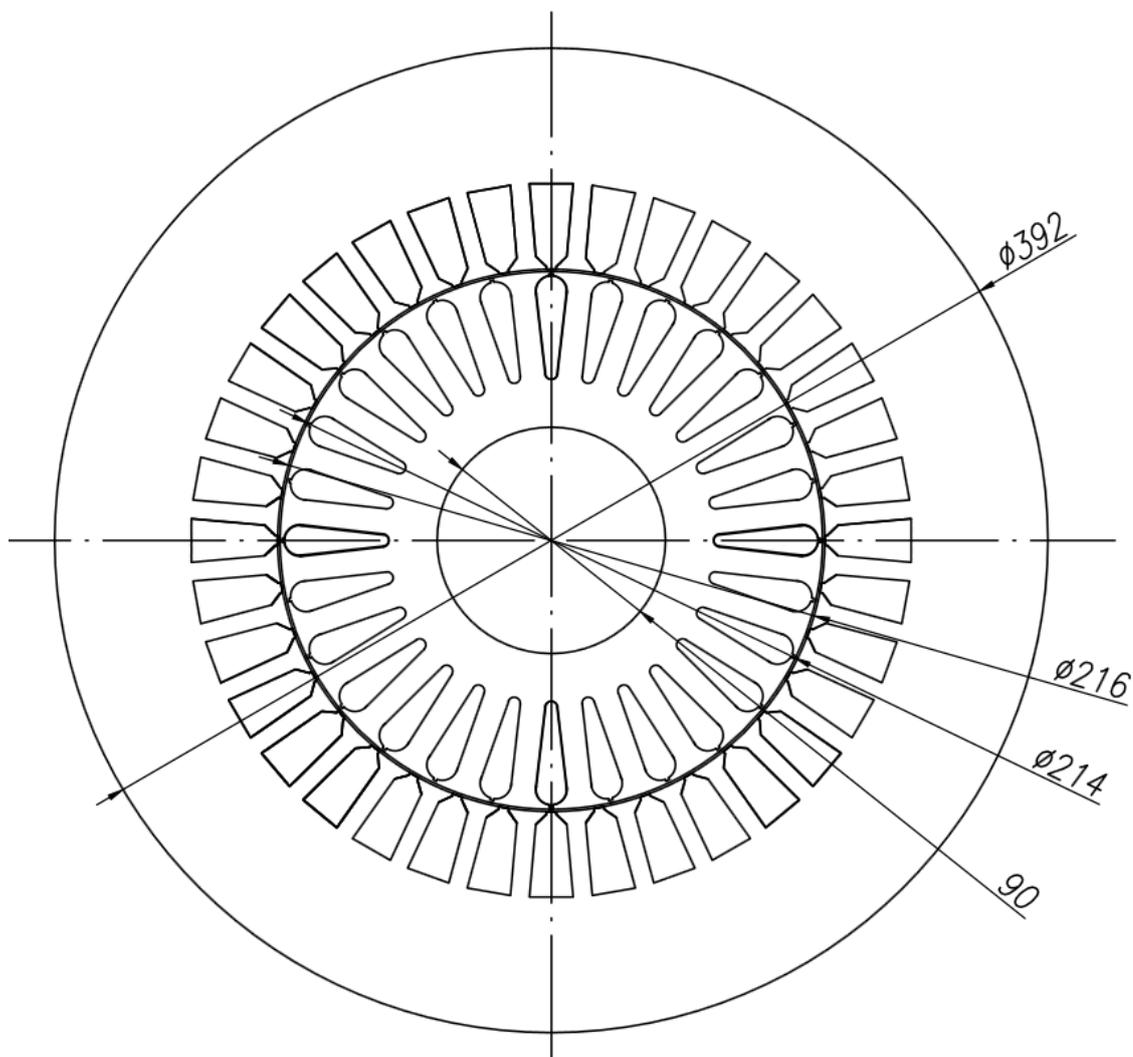


Рисунок 2 – Пример чертежа листов статора и ротора

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основной

1. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767с.
2. Справочник. Асинхронные двигатели серии 4А /А.Д. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. М.: Энергоиздат, 1982 504 с.
3. Онлайн курс DriveConstructor. <http://srv0-5.mpei.ac.ru/OnlineCourses/DriveConstructor/index.html>
4. Антонов М.В., Семенчуков Г.А. Конструирование асинхронных электрических машин. – М.: Издательство МЭИ, 1996. – 27с.

### Дополнительный

5. ГОСТ Р 2.105-2019. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам. – Введен с 01.02.2020.-М.: Стандартинформ, 2021. – 42 с.
6. ГОСТ Р 2.109-73. Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам. – Введен с 01.07.1974.- М.: Стандартинформ, 2011. – 45 с.
7. Токарев Б.Ф. Электрические машины. – М.: Альянс, 2015. – 624с.
8. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока – СПб.: Питер, 2010. – 350с.
9. Беспалов В.Я. Электрические машины. – М.: Академия, 2013. – 320с.
10. Токарев Б.Ф. Электрические машины. – М.: Альянс, 2015. – 624с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Пример задания на курсовой проект

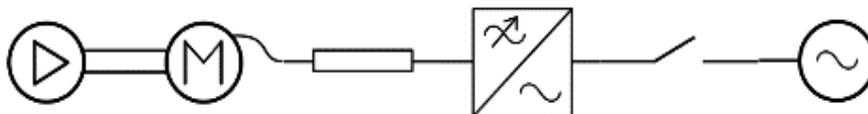
Вариант № 01/Э-01

1. Спроектировать асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором со следующими данными:

Номинальная мощность	55,0 кВт
Номинальное напряжение	220/380В
Синхронная частота вращения	1000 об/мин
Конструктивное исполнение	IM10010
Исполнение по степени защиты	IP44
Способ охлаждения	IC0141
Климатическое исполнение и категория размещения	У3
Класс нагревостойкости изоляции	F
Прототип	4A250M6У3

2. Оценить влияния влияние степени защиты на стоимость и размеры электродвигателя для привода конвейера на следующем примере.

Необходимо подобрать асинхронные электродвигатели для приводов двух одинаковых конвейеров со следующими параметрами: скорость 100...300 об/мин; номинальный момент – 1 кНм.



Один конвейер установлен в сухом чистом помещении с кондиционированием воздуха (Конвейер 1), второй (Конвейер 1) на цементном заводе. Рабочий цикл конвейеров 100%. Напряжение питающей сети 400 В. Объяснить разницу в выборе электрических двигателей для этих двух случаев и разницу в их характеристиках. При проектировании необходимо использовать кабели из меди.

Выдано студенту \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_

Преподаватель (консультант) \_\_\_\_\_

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Титульный лист курсового проекта**

**ФГБОУ ВО**

**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

Кафедра электромеханики, электрических и электронных аппаратов

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

**К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ**

**«Проектирование асинхронного двигателя»**

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Подпись \_\_\_\_\_

Преподаватель (консультант) \_\_\_\_\_

Подпись \_\_\_\_\_

Допущен к защите (дата, подпись) \_\_\_\_\_

Оценка за защиту (дата, подпись) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Москва, 20\_\_ год

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Сводные данные расчета асинхронного

#### двигателя

#### I. Классификационные показатели

$$P_{НОМ} = \dots \text{кВт}; U_{НОМ} = \dots \text{В}; n_{НОМ} = \dots \text{об/мин}$$

#### II. Основные результаты расчета

№ п/п	Наименование	Обозначение	Размерность	Величина	
				Проект	Прототип
1	Номинальный ток	$I_{НОМ}$	А		
2	Номинальный КПД	$\eta_{НОМ}$	-		
3	Номинальный коэффициент мощности	$\cos \varphi_{НОМ}$	-		
4	Номинальное скольжение	$s_{НОМ}$	-		
5	Ток холостого хода	$I_{х.х.}$	А		
6	Отношение тока холостого хода к номинальному	$I_{х.х.}/I_{НОМ}$	-		
7	Коэффициент мощности холостого хода	$\cos \varphi_{х.х.}$	-		
8	Кратность пускового тока	$I_n/I_{НОМ}$	-		
9	Кратность пускового момента	$M_n/M_{НОМ}$	-		
10	Кратность максимального момента	$M_m/M_{НОМ}$	-		

#### III. Главные размеры и основные параметры магнитопровода

№ п/п	Наименование	Обозначение	Размерность	Величина	
				Проект	Прототип
1	Высота оси вращения	$h$	мм		
2	Наружный диаметр статора	$D_a$	мм		
3	Внутренний диаметр статора	$D$	мм		
4	Расчетная длина воздушного зазора	$l_\delta$	мм		
5	Длина сердечника статора	$l_1$	мм		

6	Длина сердечника ротора	$l_2$	мм		
7	Полюсное деление	$\tau$	мм		
8	Воздушный зазор	$\delta$	мм		
9	Отношение расчетной длины воздушного зазора к полюсному делению	$\lambda = l_\delta / \tau$	-		
10	Коэффициент воздушного зазора	$k_\delta$	-		—
11	Число пазов статора	$Z_1$	-		
12	Число пазов ротора	$Z_2$	-		

#### IV. Электромагнитные нагрузки

№ п/п	Наименование	Обозначение	Размерность	Величина	
				Проект	Прототип
1	Индукция в воздушном зазоре	$B_\delta$	Тл		
2	Линейная нагрузка	$A$	А/м		
3	Индукция в зубцах статора	$B_{Z1}$	Тл		—
4	Индукция в зубцах ротора	$B_{Z2}$	Тл		—
5	Индукция в ярме статора	$B_a$	Тл		—
6	Индукция в ярме ротора	$B_j$	Тл		—
7	Плотность тока в обмотке статора	$j_1$	А/м <sup>2</sup>		
8	Плотность тока в обмотке ротора	$j_2$	А/м <sup>2</sup>		—

#### V. Обмоточные данные

Наименование	Обозначения	Статора		Ротора	
		Проект	Прототип	Проект	Прототип
Число пазов на полюс и фазу	$q$				—
Число витков в фазе	$w$				—
Укорочение шага	$\beta$				—
Площадь поперечного сечения обмоточного	$q_{эл}$				—

Число элементарных проводников	$n_{эл}$				—
Сечение эффективного проводника, мм <sup>2</sup>	$q_a$				—
Число эффективных проводников в пазу	$u_n$				—
Коэффициент заполнения паза (для насыпных обмоток)	$k_z$				—
Средняя длина витка, мм	$l_{ср}$				—
Вылет лобовых частей, мм	$l_{выл}$				—

### VI. Параметры схемы замещения

Наименования	При номинальном режиме ( $s=s_{ном}$ )				При пуске ( $s=1$ )	
	Ом		О.е.			
	Проект	Прототип	Проект	Прототип	Проект	Прототип
$r_1$						
$x_1$						
$r'_2$						
$x'_2$						
$x_{12}$						
$r_{12}$						

### VII. Потери при номинальной нагрузке

№ п/п	Виды потерь	Обозначение	кВт		% к сумме потерь	
			Проект	Прототип	Проект	Прототип
1	Электрические потери В том числе: в обмотке статора в обмотке ротора	$P_{э}$ $P_{э1}$ $P_{э2}$		—		—

2	Потери в стали В том числе: основные в статоре дополнительные (поверхностные и пульсационные)	$P_{ст}$ $P_{ст.осн}$ $P_{ст.доб}$		—		—
3	Потери механические	$P_{мех}$		—		—
4	Потери добавочные	$P_{доб}$		—		—
	Сумма потерь	$\Sigma P$				100

Среднее превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды обмотки статора: \_\_\_\_\_°C

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Вопросы для подготовки к защите курсового проекта

1. Как работает спроектированный Вами двигатель?
2. КПД и потери двигателя: виды потерь, их зависимость от характерных размеров двигателя, возможность менять соотношение между различными видами потерь в процессе проектирования.
3. Как создается вращающееся магнитное поле в асинхронном двигателе?
4. Как выбираются главные размеры двигателя, что такое машинная постоянная и электромагнитные нагрузки?
5. Что такое скольжение, чем отличается синхронный холостой ход от реального холостого хода двигателя?
6. В каких частях двигателя выделяется тепло?
7. Как охлаждается спроектированный Вами двигатель?
8. Как производится расчет магнитной цепи?
9. Как изменится ток статора, если зазор между статором и ротором увеличить?
10. Что такое коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера)? Что такое приведенный (расчетный) воздушный зазор? Как изменится ток статора, если увеличить раскрытие паза?
11. Почему пусковой ток асинхронного двигателя в несколько раз превышает номинальный? Как изменится пусковой ток, если увеличить раскрытие паза статора?
12. Что такое пространственные гармоники МДС? В чем причина их возникновения? Их влияние на работу машины. Какие конструктивные меры подавления высших гармоник Вы знаете?
13. С какой целью обмотки статора в асинхронных двигателях средней и большой мощности делают двухслойными?
14. Что такое обмоточный коэффициент (коэффициенты укорочения и распределения)?
15. Как зависит электромагнитный момент асинхронного двигателя от напряжения питания? Почему иногда при пуске обмотку статора включают по схеме «звезда», а по мере разгона двигателя переключают ее на «треугольник»? Когда оправдан и возможен такой пуск?
16. Почему в короткозамкнутых асинхронных двигателях паз ротора обычно выполняют узким и глубоким? Кто первый предложил такую форму паза ротора? Какие еще формы пазов ротора короткозамкнутых асинхронных двигателей Вы знаете?
17. Чем отличается асинхронный двигатель с фазным ротором от короткозамкнутого асинхронного двигателя?
18. Какие виды потерь в асинхронном двигателе Вы знаете?
19. Что Вы можете сказать о потерях в стали сердечника ротора?

20. Как отводится тепло от проводников обмотки статора, расположенных в пазах сердечника? Какая технологическая операция позволяет увеличить теплопроводность на пути этого потока тепла?

21. Какие элементы конструкции улучшают теплообмен между лобовыми частями обмотки статора и корпусом?

22. Как осуществляется балансировка ротора?

23. Какие меры предпринимаются при сборке асинхронного двигателя для снижения шума и вибраций?

24. Почему у выходного конца вала иногда ставят роликовый подшипник, а не шариковый?

25. Как осуществляется смазка подшипников в спроектированном Вами двигателе?

26. Как закрепляется сердечник статора в корпусе?

27. Какой класс изоляции обмотки статора Вы выбрали?

28. Какова величина зазора между статором и ротором? Каков допуск на отклонение зазора от номинального значения? Какие конструктивные и технологические меры обеспечивают постоянство зазора по окружности расточки? К чему приводит эксцентричное положение ротора относительно статора?

29. Может ли асинхронный двигатель работать при обрыве одной из фаз обмотки статора? А двух фаз статора?

30. Что такое межвитковые замыкания обмотки статора? Чем они опасны?

31. Чем опасен пробой корпусной изоляции? Что предусмотрено для устранения этой опасности?

32. Чем опасно повреждение межлистовой изоляции сердечников?

33. Может ли спроектированный Вами двигатель длительно работать с перегрузкой по мощности на 10%? На 15%?

34. Объясните, почему зависимость КПД от полезной мощности имеет такой вид. Можно ли на стадии проектирования изменять положение точки максимального КПД?

35. Как скажется на КПД спроектированного Вами двигателя увеличение длины активной зоны (длины сердечников) на 10%?

36. Как скажется на КПД спроектированного Вами двигателя увеличение глубины паза статора (при том, что число витков обмотки статора и коэффициент заполнения паза сохраняются)?

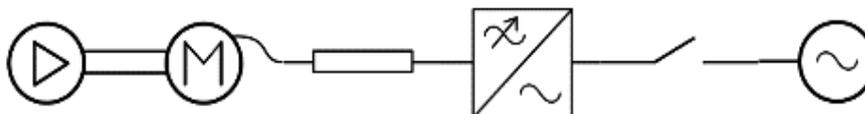
37. Как скажется на коэффициенте мощности ( $\cos\phi$ ) спроектированного Вами двигателя увеличение воздушного зазора?

38. Что такое габаритные и установочные размеры? Что такое главные размеры машины?

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Пример выполнения научно-исследовательской части курсового проекта

**Задача:** Оценить влияние степени защиты на стоимость и размеры электродвигателя для привода конвейера на следующем примере.

Необходимо подобрать асинхронные электродвигатели для приводов двух одинаковых конвейеров со следующими параметрами: скорость 100...300 об/мин; номинальный момент – 1 кНм.



Один конвейер установлен в сухом чистом помещении с кондиционированием воздуха (Конвейер 1), второй (Конвейер 2) на цементном заводе. Рабочий цикл конвейеров 100%. Напряжение питающей сети 400 В. Объяснить разницу в выборе электрических двигателей для этих двух случаев и разницу в их характеристиках. При проектировании необходимо использовать кабели из меди.

### Решение

1. Были спроектированы системы электропривода Конвейер 1 и Конвейер 2 со следующими характеристиками

Таблица 1 Характеристики спроектированных систем

Система	Конвейер 1	Конвейер 2
Стоимость, EUR:	38197	46890
КПД при номинальной нагрузке, %	93,48	93,48
КПД при нагрузке 75%, %	93,58	93,58
КПД при нагрузке 50%, %	92,08	92,08
КПД при нагрузке 25%, %	87,3	87,3
Объем, м <sup>3</sup> :	0,42	0,51
Площадь фундамента, м <sup>2</sup> :	0,98	1,06
Масса, кг:	1244	1545

Таблица 2 Характеристики электродвигателей

Система	Конвейер 1	Конвейер 2
Стоимость, EUR:	33407	42100
Номинальная мощность, кВт	75	75
Номинальная частота вращения, об/мин	494,86	494,86
Синхронная частота вращения, об/мин	500	500
Максимальная скорость вращения, об/мин	600	600
Напряжение, В:	360/440	360/440
Класс энергоэффективности:	IE4	IE4
КПД при номинальной нагрузке, %	95,8	95,8
КПД при нагрузке 75%, %	95,77	95,77
КПД при нагрузке 50%, %	94,12	94,12
КПД при нагрузке 25%, %	89,19	89,19
Номинальный ток, А:	162,74	162,74
Рабочий ток, А:	68,16	68,16
Номинальный момент, Нм:	1447	1447
Кратность максимального момента	2,5	2,5
Коэффициент мощности при номинальной нагрузке, о.е.:	0,6944	0,6944
Коэффициент мощности при нагрузке 75% от номинальной, о.е.:	0,6596	0,6596

Коэффициент мощности при нагрузке 50% от номинальной, о.е.:	0,6249	0,6249
Способ охлаждения	IC411	IC411
Способ монтажа	B3	B3
Степень защиты	IP21/23	IP54/55
Материал корпуса	сталь	сталь
Высота оси вращения, мм:	280	315
Внешний диаметр сердечника статора, м:	0.56	0.63
Длина магнитопровода статора, м:	1,4	1,38
Объем, м <sup>3</sup> :	0,3448	0,4302
Момент инерции, кг·м <sup>2</sup> :	9,22	13,47
Площадь, м <sup>2</sup> :	0,784	0,8694
Масса, кг:	1205	1506
Тип	IM-75-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-500-B3-IE4	IM-75-LV-400-SH315-ACS-IP5x-CI-500-B3-IE4

Таблица 3 Характеристики кабелей

Система	Конвейер 1	Конвейер 2
Длина, м:	30	30
Стоимость, евро:	243,6	243,6
Материал:	медь	медь
Площадь поперечного сечения проводников, мм <sup>2</sup>	25	25
Класс напряжения, кВ:	1	1

Заводское обозначение	CU-3x025-01kV	CU-3x025-01kV
-----------------------	---------------	---------------

Таблица 4 Характеристики преобразователей частоты

Система	Конвейер 1	Конвейер 2
Тип	2Q-2L-VSC-6p	2Q-2L-VSC-6p
Стоимость, евро	4546	4993
Номинальная мощность, кВт:	75	75
Номинальное напряжение, В:	360/420	360/420
Рабочее напряжение, В	400	400
Номинальный ток при значительных колебаниях момента, А	82,66	82,66
Номинальный ток при малых колебаниях момента, А	112,72	112,72
Охлаждающая среда	воздух	воздух
КПД при номинальной нагрузке, %	98	98
КПД при нагрузке 75%, %	98,14	98,14
КПД при нагрузке 50%, %	98,26	98,26
КПД при нагрузке 25%, %	98,3	98,3
Коэффициент мощности при номинальной нагрузке, о.е.	0,98	0,98
Наличие фильтра со стороны сети	нет	нет
Наличие фильтра со стороны двигателя	нет	нет
Вариант крепления	настенное	настенное
Степень защиты	IP21/31	IP54/55

Высота, м	1	1
Ширина, м	0,1952	0,1982
Глубина, м	0,4	0,4
Объем, м <sup>3</sup>	0,0781	0,0793
Площадь, м <sup>2</sup>	0,1952	0,1982
Масса, кг:	39,05	40,02
Тип	2Q-2L-400-75- IP2x-AC-W-6p	2Q-2L-400-75-IP5x- AC-W-6p

## 2. Выводы:

1. В соответствии с условиями работы двигателя Конвейер 1 требуется степень защиты IP21/31, для двигателя Конвейер 2 – IP54/55.

2. Двигатели и преобразователи частоты со степенью защиты IP54/55 имеют большую стоимость, массу, габариты.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....	4
2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	9
2.1 Получение задание на курсовой проект. Ознакомление с общими вопросами проектирования электрических машин (КМ-1) .....	9
2.2 Проектирование статора вращающейся электрической машины (КМ-2) .....	11
2.3 Проектирование ротора асинхронного двигателя (КМ-3) .....	15
2.4 Расчет характеристик спроектированного асинхронного двигателя (КМ-4) .....	18
2.5. Выполнение научно-исследовательской части курсового проекта (КМ-5) .....	22
2.6 Разработка конструкции электрической машины (КМ-6) .....	23
2.7 Подготовка к защите курсового проекта (КМ-7) .....	25
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Пример задания на курсовой проект .....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Титульный лист курсового проекта.....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Сводные данные расчета асинхронного двигателя...	31
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Вопросы для подготовки к защите курсового проекта .....	35
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Пример выполнения научно-исследовательской части курсового проекта.....	37

*Учебное издание*

**Кузьмичев Владимир Александрович**  
**Иванов Александр Сергеевич**  
**Сидоров Антон Олегович,**  
**Орешкин Дмитрий Николаевич**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С  
КОРОТКОЗАМКНУТЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Учебно-методическое пособие по курсу  
«Электрические машины»  
по направлению подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Редактор издательства М.П. Малахов  
Компьютерная верстка М.К. Петушкеева

Темплан издания МЭИ 2022	Подписано в печать 18.10.2016		
Печать офсетная	Формат 60x84/16	Физ.печ.л. 1,5	Тираж 50
Изд.№ 16-045	Заказ		

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».  
111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14.  
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».  
111250, Москва, Красноказарменная ул., д.13.