

В результате построения 3D-модели стало возможным:

- Проверка размеров секции полученных математическим расчетом и их коррекция;
- 3D-моделирование положения секции в катушке статора исключает ошибку позиционирования;
- Стало возможным избежать многочисленной переделки дорогостоящей оснастки;
- Получена длина средней линии провода необходимая для изготовления оснастки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Зимин, М.Я. Каплан и др. Обмотки электрических машин. Изд. 6-е, переработ. и доп. – Л. : Энергия, 1970.
2. Справочник по электрическим машинам: В 2-ух т. / Под. общ. ред И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – т. 1. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.: ил.
3. Лотоцкий К.В. Электрические машины и основы электропривода. – М. : Изд. «Колос». – 1964. – 495 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.: ил.
5. Радин В.И. и др. Электрические машины: Асинхронные двигатели: Учеб. для электромех. спец. вузов / Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е.; Под общей ред. И.П. Копылова. – М. : Высш. Шк, 1988. – 328 с.: ил.
6. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные / В.Л. Лихачев. – М. : Солон-Р, 2002. – 304 с.

*А.В. КУЗНЕЦОВ, Н.П. СОЛНЫШКИН*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СЕКЦИИ КАТУШКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

Статья рассказывает о сложной и ответственной детали асинхронного электродвигателя – секции катушки статора. Раскрываются особенности, сложности конструкторского проектирования и пути их решения с целью улучшения технологии изготовления секции на производстве.

Электротехническая промышленность является важной отраслью промышленности. Электротехнические изделия имеют значение для процессов производства и потребления электрической энергии, оказывают ведущее влияние на процессы механизации и автоматизации производств. Новые и современные транспортные средства требуют нового подхода к продукции электромашиностроения, постоянной работы над новыми типами электродвигателей. Особое внимание уделено асинхронным двигателям.

Разработка новых электродвигателей и современные условия рынка предъявляют ряд новых требований к производству электродвигателей. Одно из этих условий – создание гибкой автоматизированной среды проектирования новых машин с учетом развития новых технологий проектирования.

В проектировании электромашины можно выделить следующие этапы [1]:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочий проект;
- выпуск пробной серии.

Начиная с технического предложения, разработки отдельных узлов и заканчивая рабочим проектом, разработчик может использовать для решения поставленных задач средства автоматизации, активно привлекать новые средства проектирования с помощью ЭВМ для наилучшего результата проектирования изделия.

В процессе проектирования разработчик уделяет особое внимание узлам, которые служат основными причинами отказов и поломок электродвигателей. Можно выделить две основные группы причин отказов (на примере асинхронных двигателей):

- эксплуатационные причины – обусловлены условиями эксплуатации двигателей;
- производственные причины – обусловлены некачественным изготовлением на заводе.

По [2] отказы электродвигателей происходят:

- из-за повреждения обмоток – 85-95% (при этом основная причина выхода из строя обмоток – межвитковое замыкание, 93%);
- из-за повреждения подшипников – 2-5%.

Отсюда видно, что обмотка является одной из главных деталей, от которой зависит работоспособность электромашины и поэтому заслуживает особого внимания при проектировании и изготовлении.

В основном процент повреждения обмоток относится к обмоткам статора:

1. Повреждение изоляции в пазовой части статорного пакета и как следствие пробой. На этот тип пробоя приходится до 50% от всех пробоев статорной обмотки;
2. Повреждение обмотки при укладке обмотки в пазы при изготовлении обмоток с размерами, выходящими за пределы допуска размеров;
3. Попадание на поверхность изоляции ферромагнитных частиц, вибрация которых в магнитном поле приведет к разрушению изоляции, в особенности в условиях плотного контакта поверхностей обмотки с поверхностями паза статора;
4. Повреждение лобовых частей при переходных процессах;
5. Появление мятин и трещин в изоляции, появление трещин и деформаций частей обмотки под действием больших токов;
6. Смещение обмотки из-за ослабления запрессовки её в пазах статорного пакета;
7. Повреждение соединения выводных концов статорных секций, в том числе из-за некачественного изготовления секций [3].

По мнению [4, стр. 39] именно обмотки электрической машины – одна из главных частей машины, и от того, как они спроектированы, зависят основные энергетические и массовые характеристики.

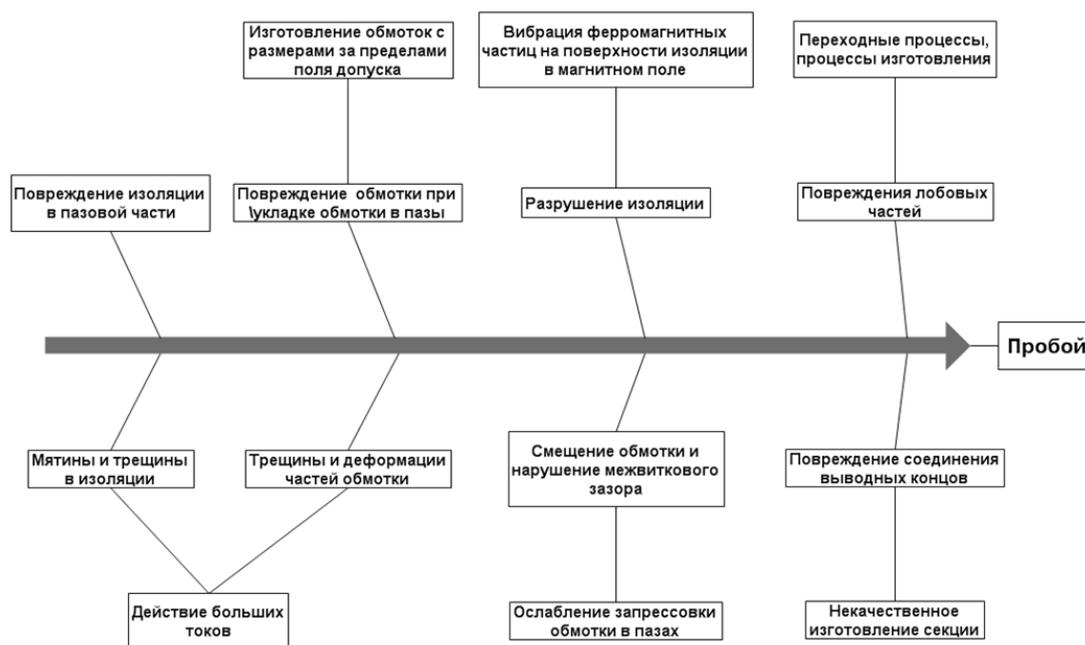


Рис. 1. Причины появления пробоя и повреждения обмотки

При проектировании и изготовлении обмоток необходимо: обеспечить механическую и электрическую прочность; нагревостойкость; технологичность изготовления; удобство ремонта.

В последнее время в современных асинхронных двигателях широкое применение получили простые двухслойные обмотки из прямоугольного провода. Первоначально такие секции состоят из одного кольцевого витка с наложенной изоляцией. После формовки петли и лобовых частей готовая секция укладывается в открытые пазы статора. Одна сторона секции лежит в нижней части паза, а другая в верхней. При этом важно добиться необходимого отгиба (профилирования) лобовых частей обмотки в радиальном направлении равного для всех секций статорной группы. Модель двухслойной обмотки показана на рисунке 2.

При проектировании обмотки необходимо учитывать взаимное расположение обмоток в статоре, наличие необходимых зазоров между обмотками, расположение в пазах, положение лобовых частей и выводных концов обмоток в корпусе электродвигателя. Модель собранного пакета показана на рисунке 3.

Сложность геометрии секции (особенно лобовых частей) приводит к необходимости проведения сложных расчетов при её проектировании. Например, в [5] приведены примеры расчетов геометрических размеров двухслойной секции. Особое внимание уделено определению размеров и геометрических зависимостей лобовой части катушки [5, стр. 226]. Основные размеры лобовой части катушки на рис. 4.

Практика проектирования секций показала, что применение предложенных расчетов не всегда удовлетворяют условиям и требованиям производства.

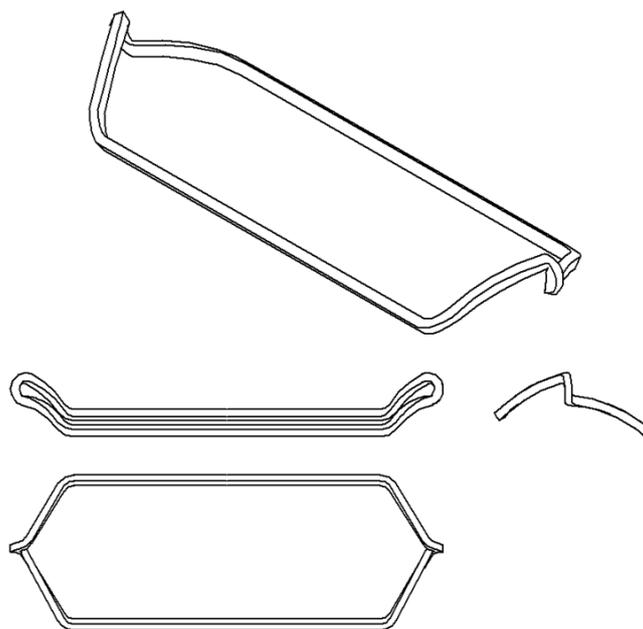


Рис. 2. Модель двухслойной обмотки асинхронного двигателя (выполнена в программе Solid Edge)

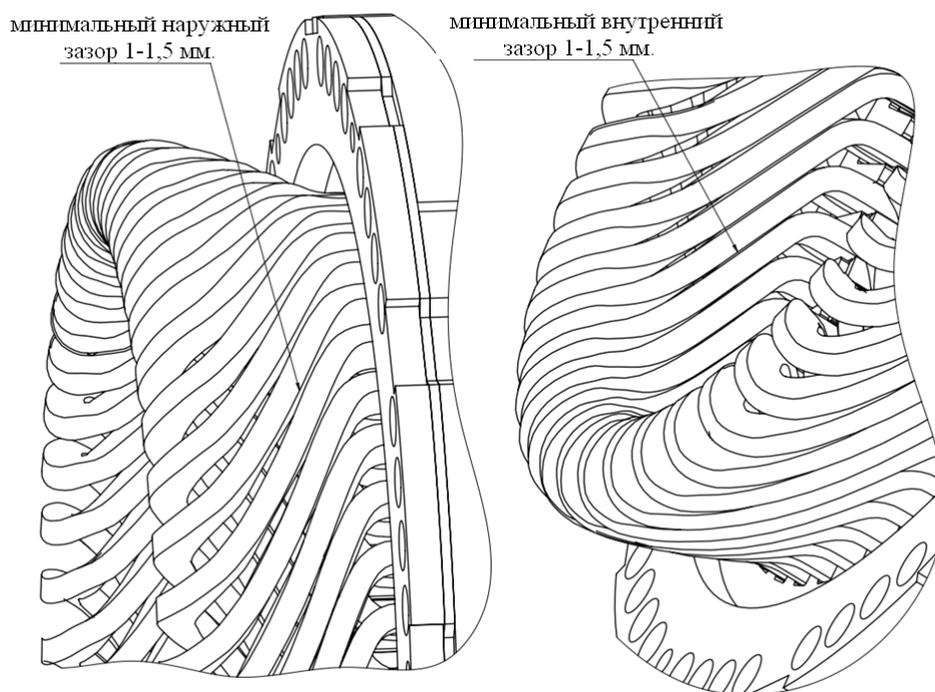
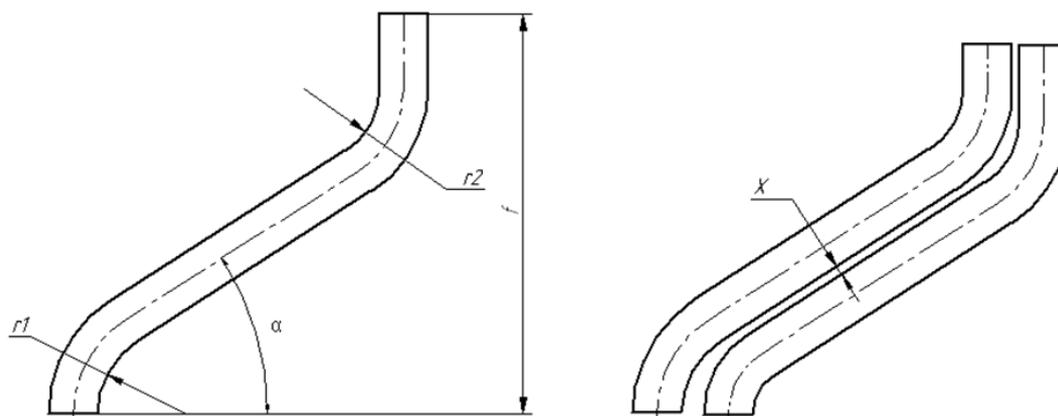
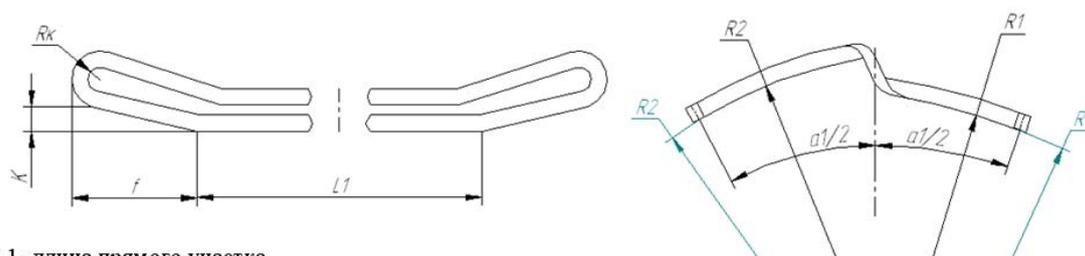


Рис. 3. Модель статорного пакета



- $\alpha$  – угол наклона лобовой части  
 $r1$  – радиус закругления при переходе от прямой к лобовой части  
 $r2$  – радиус закругления при переходе к головке  
 $f$  – вылет лобовой части обмотки  
 $X$  – расстояние между лобовыми частями двух соседних катушек (зазор)

Рис. 4. Геометрические размеры лобовой части секции



- $L1$  – длина прямого участка  
 $Rk$  – радиус закругления лобовой части катушки  
 $R1, R2$  – радиусы выгиба дуг лобовой части  
 $\alpha/2$  – угол (углы) лобовой части  
 $k$  – подъем петли секции

Рис. 5. Геометрические размеры секции

Недостатки предложенной системы расчетов:

- сложность расчетов;
- нет возможности визуально проверить расчеты из-за сложной геометрии лобовых частей;
- необходимо наличие опытного расчетчика с опытом коррекции полученных числовых значений с учетом опыта изготовления секций;
- проверка расчета происходит только после проектирования и изготовления дорогостоящей оснастки и укладки секции в пакете;
- при необходимости коррекции полученной секции необходима коррекция или изготовление заново дорогостоящей оснастки.

На первое место встает необходимость проверки полученных расчетов геометрии секции на этапе проектирования. Эта задача на ОАО ПЭМЗ решается с помощью программ 3D проектирования (рис. 2, 3). Применение моделирования секции в программах 3D проектирования позволило устранить отмеченные недостатки.

По результатам применения 3D проектирования секции на производстве выделились два направления 3D проектирования:

- проектирование секции с построением 3D модели с учетом размеров полученных в результате математических расчетов;
- проектирование секции с построением 3D модели в среде «сборки» («по месту») с учетом взаимного расположения деталей двигателя в зоне обмотки статора.

Практическое применение этих двух направлений привело к следующим результатам. Проектирование секции с построением 3D модели с учетом размеров полученных в результате математических расчетов позволило:

1. Получить виртуальное значение минимального зазора между лобовыми частями секции с наружной и внутренней стороны. Тем самым получена точка вероятного контакта обмоток при укладке в статор – возможная точка пробоя. Это подтверждено практикой;

2. Провести проверку расчетов с точки зрения, геометрической сходимости, сложных элементов геометрии. Например, возможность касательного перехода сложной геометрии и недопустимость на этих участках перелома, что приведет к более простой деформации материала секции на участках перехода, например от прямого к лобовому участку;

3. Получить картину изменения межсекционного зазора по всей длине лобовой части соседних секций. Это особенно актуально в зоне изгиба дуг лобовых частей. Прогнозирование этого зазора на всей длине лобовой части приведет к минимальной вероятности пробоя секций;

4. Получить реальную картину положения секций обмотки в пакете статора в системе двигателя и выявление зон возможного контакта с соседними деталями, особенно в условиях движения соседних деталей при сборке и обслуживании двигателя.

Проектирование секции с построением 3D модели в среде «сборки» («по месту») с учетом взаимного расположения деталей двигателя в зоне обмотки статора позволило:

1. Получить модель секции в системе сборки с учетом размеров сопрягаемых деталей;
2. Секция моделируется сразу в рабочем пространстве зоны двигателя с учетом положения ближайших деталей, что полностью исключает ошибку позиционирования;
3. Поскольку за модель секции берется заранее подготовленный эталон секции с правильной геометрией, то исключается ошибка геометрии и необходимость её дальнейшей проверки;
4. Поскольку размеры секции взаимосвязаны с размерами контактирующих деталей, при изменении последних мы получаем размеры изменённой секции автоматически, без проведения новых расчетов и (или) геометрических построений;
5. Исключена необходимость сложных расчетов и их дальнейшая геометрическая проверка.

Применение этих двух направлений в совокупности в производстве позволило:

- исключить дорогостоящую доделку или изготовление заново сложной и дорогостоящей оснастки;
- получить реальную картину положения секции на этапе проектирования в КБ;
- получить необходимую геометрическую информацию для изготовления секции и оснастки к ней (например длины средней линии секции – основной характеристики для нарезки провода секции и изготовления оснастки намотки).

Предложенные способы решения конструкторских задач при проектировании секции позволили спроектировать сложную технологическую оснастку для изготовления секции с большей точностью, что позволило улучшить технологию изготовления секции на производстве.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кацман М.М. Расчет и конструирование электрических машин: Учеб. пособие для техникумов. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.: ил.
2. Справочник по электрическим машинам: В 2-ух т. / Под. общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – т. 1. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.: ил.
3. Лотоцкий К.В. Электрические машины и основы электропривода. – М. : Изд. «Колос», 1964. – 495 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.: ил.
5. В.И. Зимин, М.Я. Каплан и др. Обмотки электрических машин. Изд. 6-е, переработ. и доп. – Л. : «Энергия», 1970.