

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕКЦИИ СТАТОРА  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК ПРИМЕР ВНЕДРЕНИЯ САПР  
В КОНСТРУКТОРСКУЮ ПОДГОТОВКУ  
ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

В статье рассматривается пример конструкторского проектирования сложной детали электромашиностроительного производства с помощью ЭВМ, приводится пример существующего способа проектирования.

Геометрические размеры секции полученные в результате конструкторской подготовки производства используются при проектировании технологической оснастки и оказывают действие на технологию изготовления секции и дальнейшую работу секции в двигателе. Важно на этапе конструкторской подготовки получить истинные размеры секции.

При проектировании секции катушки статора для определения основных размеров (рис. 1) в настоящее время используются следующие рекомендации и зависимости:

1. Размеры поперечного сечения катушки получаются как сумма соответствующих размеров меди и изоляции, с учетом разбухания в лобовой части катушки при пропитке. Величина разбухания принимается равной по ширине  $0,05x=0,2$  мм, по высоте  $0,05y$  ( $x$  – число проводников по ширине катушки,  $y$  – число проводников по высоте катушки);

2. Полная ширина катушки определяется как сумма соответствующих участков:

$$L = L_1 + L_2. \quad (1)$$

Длину дуги определим по формуле:

$$L = \frac{2\ddot{R} R y_z}{Z}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус дуги;  $Z$  – число пазов;  $y_z$  – число зубцов заключенных между двумя сторонами одной катушки (зубцовый шаг).

При приближенных расчетах радиус  $R$  можно взять как средний радиус катушки:

$$R = \frac{D_a + h}{2}. \quad (3)$$

Как видно одна сторона катушки в пазах лежит в верхней, а другая в нижней его части. Величины радиусов  $R_1$  и  $R_2$  определяются зная размеры диаметра, размеры паза, сечение проводников и их изоляции. В результате дуги  $L_1$  и  $L_2$  на соответствующих радиусах определим по формулам:

$$L_1 = \frac{2\ddot{P} R_1 y_z}{2Z} \quad L_2 = \frac{2\ddot{I} R_2 y_z}{2Z}. \quad (4)$$

Полная ширина катушки с учетом положения дуг на окружностях разного радиуса определим по формуле (1);

3. Длина прямой части катушки определяется как сумма составляющих

$$L_{\text{пр.ч.}} = L_a + S + T, \quad (5)$$

где  $L_a$  – ширина статора;  $S$  – ширина крайнего листа;  $T$  – выступ пазовой части за крайний лист (необходим для удаления от стали статора лобовой части с более слабой изоляцией).

4. Размеры лобовой части определяют по зависимостям:

Угол наклона лобовой части  $\alpha$

$$\sin \alpha = \frac{(x + s)z}{2\ddot{I} R}, \quad (6)$$

где  $x$  – расстояние между лобовыми частями соседних катушек (межвитковый зазор);  $s$  – ширина катушки в лобовой части;  $z$  – число зубцов;  $R$  – радиус окружности, на которой расположена лобовая часть.

Величины радиусов закругления  $r_1$  и  $r_2$  обычно принимаются от 5 до 15 мм, в зависимости от жесткости катушки.

Вылет лобовой части определяется как сумма соответствующих составляющих (рис. 1, б):

$$f = a + b + c + d. \quad (7)$$

Решая соответствующие треугольники, получим формулы составляющих a, b, c, d:

$$a = AE = AF \cdot \cos \alpha = \left(r_1 + \frac{S}{2}\right) \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

$$c = BK = \left(r_2 + \frac{S}{2}\right) \cdot \cos \alpha, \quad (9)$$

$$b = BC = AC \cdot \operatorname{tg} \alpha = k \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (10)$$

где:

$$k = l_1 - m_1 - m_2, \quad (11)$$

$$m_1 = TE = TF - EF = \left(r_1 + \frac{S}{2}\right) - \left(r_1 + \frac{S}{2}\right) \cdot \sin \alpha = \left(r_1 + \frac{S}{2}\right) \cdot (1 - \sin \alpha),$$

$$m_2 = KL = DL - DK = \left(r_2 + \frac{S}{2}\right) - \left(r_2 + \frac{S}{2}\right) \cdot \sin \alpha = \left(r_2 + \frac{S}{2}\right) \cdot (1 - \sin \alpha).$$

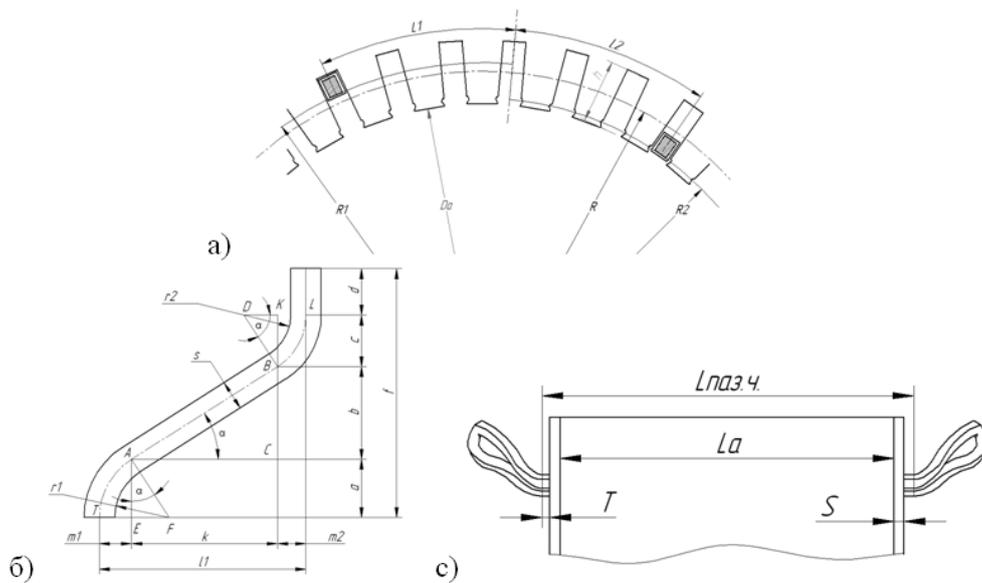
По формуле (11) получим:

$$k = l_1 - \left(r_1 + \frac{S}{2}\right) \cdot (1 - \sin \alpha) - \left(r_2 + \frac{S}{2}\right) \cdot (1 - \sin \alpha) = l_1 - (1 - \sin \alpha) \cdot (r_1 + r_2 + S).$$

Тогда величина «b» по (11):

$$k = [l_1 - (1 - \sin \alpha) \cdot (r_1 + r_2 + S)] \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (12)$$

Величина d определяется как высота катушки в пазовой части плюс 3-5 мм. Сложив соответствующие составляющие по формуле, получим размер вылета лобовой части.



- a — определение сторонами катушки
- б — к определению основных размеров лобовой части.
- α — угол наклона лобовой части
- r<sub>1</sub> — радиус закруления при переходе от прямой к лобовой части катушки
- r<sub>2</sub> — радиус закруления при переходе к головке
- f — вылет лобовой части обмотки
- c — к определению длины пазовой (прямой) части катушки

Рис. 1. Геометрические размеры секции катушки

Как заметил [1, стр. 228], расчет является приближенным. Подтверждается практикой. Часто для получения размеров используют специальные таблицы с размерами секции. Практика проектирования секций показала, что применение предложенных расчетов не всегда удовлетворяют условиям и требованиям производства. В результате появилась необходимость разработки способа 3D моделирования секции и проверки расчетов в «виртуальной среде». Эти задачи решаются в программе Solid Edge.

Выделим основные критерии моделирования секции:

1. За расчетную (базовую) характеристику принимаем центральную линию секции с получением её конечной длины после построения;

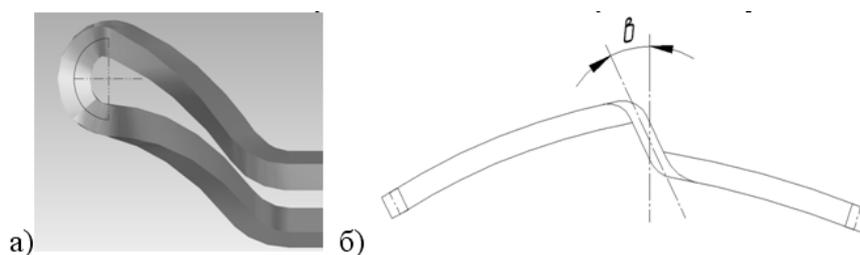
2. Построение центральной линии секции ведем по трем чертежным проекциям секции с выделением центральной линии на каждой из них. Двух проекций оказалось недостаточно из-за сложной формы петли лобовой части (рис. 2), которая в свою очередь диктуется необходимостью увеличения общей длины секции, не увеличивая при этом габариты;

3. Сложная геометрия петли лобовой части может быть упрощена.

Для упрощения построения петли возможны допущения: исключения угла отгиба лобовой части  $\beta$  ( $\beta=0$ ); как следствие исключение деформации зоны петли при  $\beta=0$ .

Как показала практика, эти допущения существенно не влияют на главную выходную характеристику модели (длину по центральной линии) и на результат моделирования зазора лобовых частей в соседних секциях статорного пакета.

При необходимости возможно получение модели без допущений (см. рис. 2).



а – искажение профиля петли  
б -  $\beta$  – угол отгиба лобовой части

Рис. 2. Секция с реальной петлей

4. Особенности правильной формовки лобовых частей секции.

Лобовые части секции должны быть определенным образом формованы для наилучшего положения в статорном пакете и удобства в обслуживании.

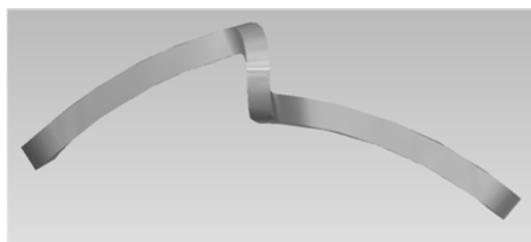


Рис. 3. Особенность формовки лобовых частей секции

Основные этапы и особенности построения:

1. Построение главной боковой проекции с выделением следующих главных параметров:
  - $R_1, R_2$  – радиусы выгиба дуг лобовых частей (172 мм и 160 мм на рис. 4);
  - Пример положения сечений секции на прямом участке и участке петли (рис. 4);
  - Выделение проекции центральной линии обеих дуг лобовой части;
  - Выделение величины подъема петли катушки;
  - Выделение размеров медного сечения и сечения обмотки катушки и их взаимосвязи;
  - Построение возможной растяжки петли при  $\beta \neq 0$ ;
  - Внешние радиусы дуг (184,9 мм и 172,9 мм на рис. 4) будут использованы при моделировании технологической оснастки;
  - Для сохранения правильной дуги центральной линии погрешность её радиуса допущима и будет скорректирована при изготовлении в шаблоне.

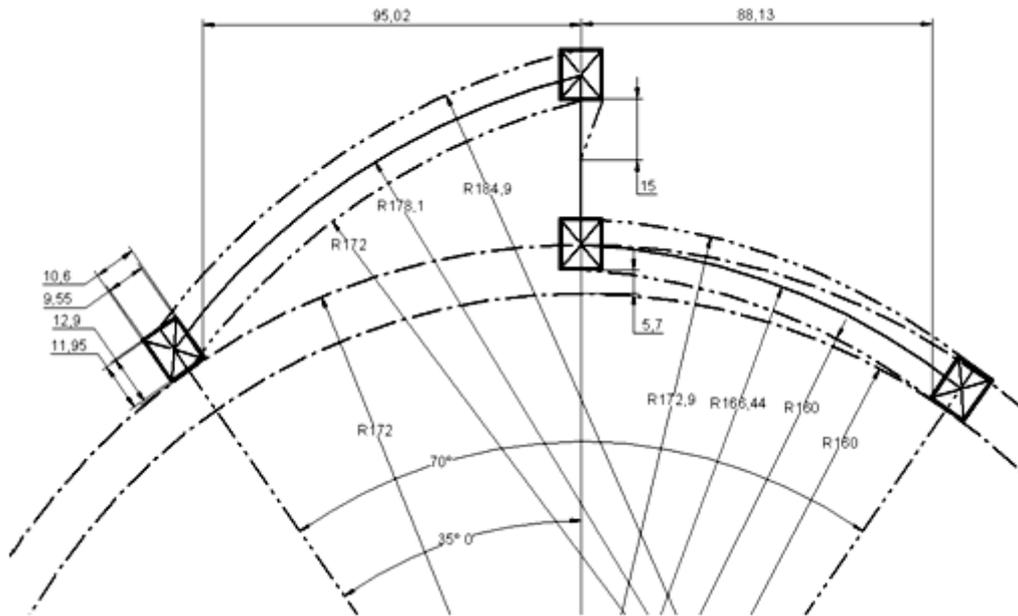


Рис. 4. Положение сечения в боковой проекции

Расчеты радиусов  $R_1$  и  $R_2$  приведенные выше диктуют построение проекции с помощью дуг, а не сплайнов. Как показала практика, это допущение существенно облегчает построение, не оказывает существенного влияния на результат, облегчает перестроение дуг при изменении размеров в процессе проектирования и облегчает перевод размеров с сечения в технологическую оснастку при ее 3D моделировании.

2. Построение проекций дуг сверху (рис. 5), Особенности построения:

- Условия касания в зонах перехода от прямого участка к лобовому и перехода в зону петли для создания наилучших условий деформации материала сечения при формовке;
- Выделение центральной точки петли при условиях  $\beta=0$  и  $\beta=6-8^\circ$ ;
- Определение углов наклона лобовых частей для заданной величины вылета.

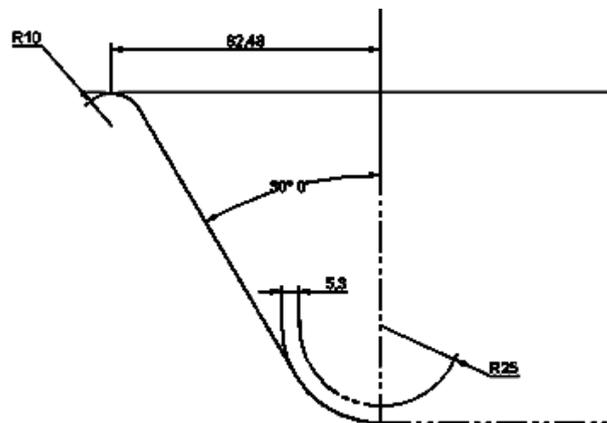


Рис. 5. Проекция сверху левой дуги лобовой части

3. Построение петли сводится к получению правильной дуги или сложной эллиптической дуги в зависимости от начального значения  $\beta$  (рис. 6). Как мы указали выше, допускается принимать  $\beta=0$ .

Выделим способы получения средней линии на основе трех ортогональных проекций. Построим поверхности по каждой проекции, отсечем лишние части поверхностей по каждой проекции и получим кромку, удовлетворяющую трем проекциям (рис. 7).

Степень влияния каждой проекции на конечную геометрию центральной линии визуально наблюдается по цвету поверхностей соответствующей проекции.

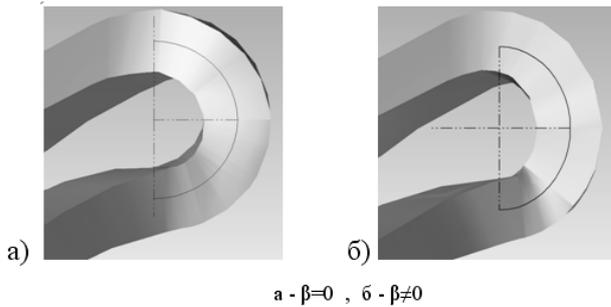


Рис. 6. Проекция центральной линии петли

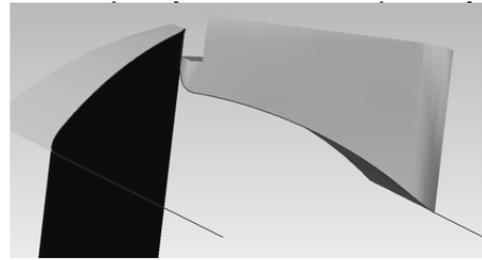


Рис. 7. Центральная линия как результат взаимодействия ортогональных проекций

Получение центральной линии возможно по методу проекции двух кривых с выделением двух главных проекций (а не трех) на каждом характерном участке. Таких участков можно выделить четыре (рис. 8): участки лобовых частей (А и В) и участки петли (верхний С и нижний D условно). На каждом участке выделены две проекции для получения результирующей центральной линии на каждом участке. По выделенным двум проекциям на каждом участке строятся участки 3D кривой (рис. 9).

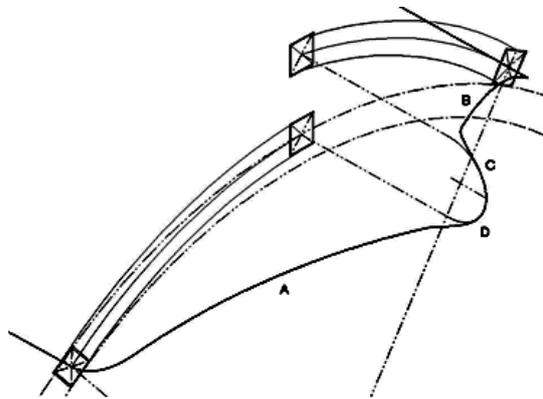


Рис. 8. Выделение участков двух проекций

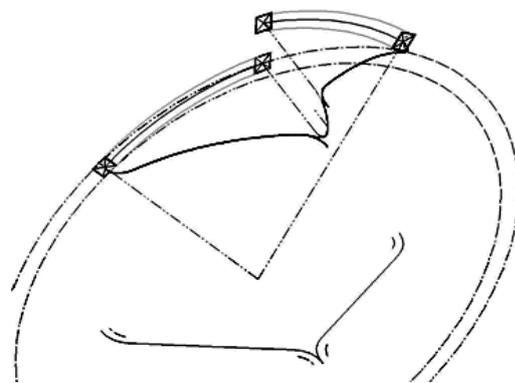


Рис. 9. Получение средней линии методом проекций с выделением характерных участков

Особенности геометрических построений сечений секции:

- Необходимо нужное количество сечений для получения правильной формы дуг и возможности управления этой формовкой в 3D модели (рис. 10);
- Определение главных (основных) сечений на всем протяжении лобовой части;
- Определение точек скрутки при получении твердотельного тела.

4. Построенная секция показана на рис. 11.

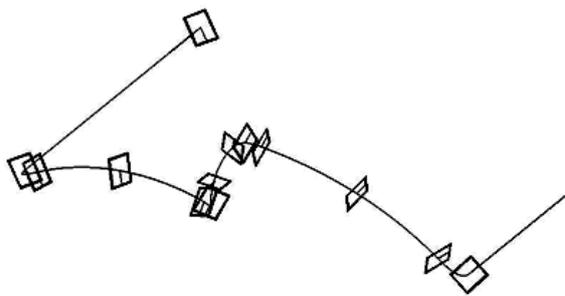


Рис. 10. Система сечений секции

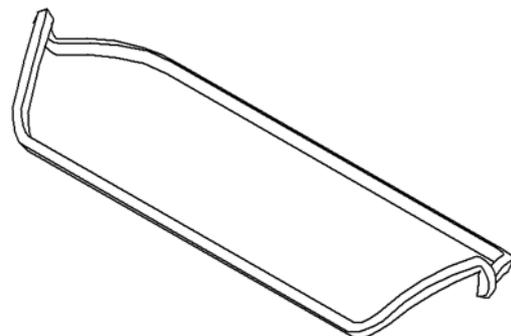


Рис. 11. 3D-модель двухслойной обмотки асинхронного двигателя (Solid Edge)

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.