

Красношапка Д.М., д-р техн. наук  
Казак В.Н., д-р техн. наук  
Мазур Т.А.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННОЙ МУФТЫ С ФЕРРОМАГНИТНОЙ ГИЛЬЗОЙ НА ВЕДОМОМ РОТОРЕ

Аерокосмический институт  
Национального авиационного университета

*Предложена методика расчета оптимальных параметров асинхронной муфты с ферромагнитной гильзой на ведомом роторе с помощью поисковых методов оптимизации при выполнении ограничений на вид механической характеристики*

### **Постановка проблемы**

Интерес к созданию оптимальных электрических машин возник давно. Для обоснования оптимальных соотношений использовались классические методы отыскания максимума и минимума функций многих переменных. Однако эти методы не всегда пригодны для решения сложных и специальных задач оптимального проектирования электрических машин. Применительно к асинхронным муфтам (АМ) с ферромагнитной гильзой (ФГ) на ведомом роторе актуальной является задача определения оптимальных геометрических размеров гильзы. Это связано с тем, что ферромагнитный массив вносит в роторный контур АМ нелинейные частотозависимые параметры.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Разработкой методов оптимального расчетного проектирования электрических машин занимались М.П. Костенко, Г.Н. Петров, И.М. Постников, И.П. Копылов, Д.А. Аветисян.

### **Формулирование целей статьи**

Целью данной статьи является разработка методики автоматизированного проектирования АМ со специальной конструкцией ведомого короткозамкнутого ротора. Его особенность состоит в существенно нелинейной зависимости параметров от частоты и величины роторных токов.

### **Основные аспекты проблемы**

Применение методов оптимального расчетного проектирования характеристик асинхронных машин позволяет с высокой эффективностью решать задачи поиска такой комбинации линейных размеров машины и выбора электромагнитных нагрузок, при которых критерий качества (целевая функция) имеет наилучшее значение из всех возможных и при которых удовлетворяются предъявляемые к машине требования исходя из условий эксплуатации.

Применительно к АМ с ФГ на ведомом роторе актуальной является задача определения оптимальных геометрических размеров гильзы. Под оптимальными следует понимать такие геометрические размеры гильзы, при которых удовлетворяются все требования одновременного обеспечения экстремума целевой функции – критерия оптимума. Следовательно, для расчета оптимальных геометрических размеров ФГ необходимо:

1. Составить математическую модель объекта оптимизации, в нашем случае модель АМ с ведомым ротором специальной конструкции;
2. Определить критерий оптимума;
3. Определить эксплуатационные требования в виде необходимых ограничений;
4. Описать постоянные и переменные исходные данные, начальную точку поиска;

5. Разработать алгоритм и программу расчета на ПК, связывающую параметры оптимизации с критерием оптимальности и ограничениями [1].

Рассмотрим подробнее каждую из этих составляющих. При преобразовании модели на математический язык совокупность используемых переменных и качественные зависимости переводятся в количественные: критерии оптимальности в целевые функции; ограничения – в уравнения или неравенства; связи между переменными в функциональные соотношения.

Будем пользоваться математической моделью АМ с частотозависимыми параметрами в цепи ведомого ротора, а именно функциональными зависимостями между геометрическими размерами ФГ, величинами эквивалентно вносимых параметров и электромеханическими характеристиками АМ. В соответствии с основными расчетными соотношениями [2] устанавливается связь эквивалентно вносимых параметров гильзы с частотой ротора асинхронной машины и геометрическими размерами гильзы.

$$M_{эм} = \frac{m_1 p_{ам} (r'_2 + r'_{эКВ})}{2pf_{отн} s_{ам}} |I'_2|^2, \quad (1)$$

$$I'_2 = \frac{U_q}{\left[ r_1 + c_1 \frac{r'_2 + r'_{эКВ}}{s_{ам}} \right]^2 + \left[ x_{\sigma 1} + c_1 \left( x'_{\sigma 2} + \frac{x'_{эКВ}}{s_{ам}} \right) \right]^2}, \quad (2)$$

$$n = \frac{thah + tg^2 ah \cdot thah}{1 + tg^2 ah \cdot th^2 ah}, \quad (3)$$

$$m = \frac{th^2 ah \cdot tgah - tgah}{1 + tg^2 ah \cdot th^2 ah} + \frac{thah + tg^2 ah \cdot thah}{1 + tg^2 ah \cdot th^2 ah}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{th^2 ah \cdot tgah + tgah}{1 + tg^2 ah \cdot th^2 ah} + \frac{thah + tg^2 ah \cdot thah}{1 + tg^2 ah \cdot th^2 ah}, \quad (5)$$

$$H_s = \sqrt{2} \frac{2 \cdot m_1 (k_{\omega 1} w_1)^2}{\pi d} I'_2, \quad (6)$$

Относительную магнитную проницаемость  $\mu_s$  находим по основной кривой намагничивания для материала гильзы. При выполнении практических расчетов по определению эквивалентно вносимых параметров гильзы, изготовленной из низкоуглеродистой стали ст. 3, целесообразно пользоваться аппроксимированным выражением кривой намагничивания [3]

$$\mu_s = \frac{c}{H_s + a} + \frac{c_1}{H_s + a_1} + \mu_0, \quad (7)$$

где  $c, c_1, a, a_1$  – коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

$$\mu = \mu_0 \mu_s,$$

$$r'_{эКВ} = 4n \sqrt{\frac{\mu \omega}{2\gamma}} \frac{m_1 (k_{\omega 1} w_1)^2}{\pi d} l, \quad (8)$$

$$x'_{эКВ} = 4m \sqrt{\frac{\mu \omega}{2\gamma}} \frac{m_1 (k_{\omega 1} w_1)^2}{\pi d} l, \quad (9)$$

где  $m_1$  – число фаз АМ;  $p_{ам}$  – количество пар полюсов АМ;  $r_1$  и  $x_{\sigma 1}$  – активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки ведущего ротора АМ с учетом вынесения контура намагничивающего тока;  $r'_2$  и  $x'_{\sigma 2}$  – активное и индуктивное сопротивление фазы короткозамкнутого ведомого ротора АМ, приведенные к обмотке ведущего ротора с учетом вынесения контура намагничивающего тока;  $f_{отн}$  – частота вращения поля относительно ведущего ротора АМ;  $s_{ам}$  – скольжение АМ, равное отношению частот ведомого и ведущего роторов АМ;  $k_{\omega 1}$  – обмоточный коэффициент;  $w_1$  – число витков ведущего ротора АМ;  $d$  – диаметр ведомого ротора;  $l, h$  – длина и толщина гильзы.

$$s_{ам} = f_2 / f_1, \quad (10)$$

Исходя из схемы замещения АМ с синхронной машиной (СМ) в качестве возбудителя (рис. 1), положим, что  $U_1 = const$  и  $f_1 = const$ , и параметры ве-

домого ротора АМ приведены к ведущему ротору. Такой подход позволяет нам использовать АМ как систему с сосредоточенными параметрами. При этом в роторном контуре АМ помимо постоянных параметров появляются нелинейные частотозависимые параметры, не позволяющие провести расчет режимов АМ традиционными способами. Величины этих частотозависимых параметров зависят от геометрических размеров ФГ (радиальная толщина и осевая длина). В свою очередь, геометрические размеры ФГ существенно влияют на вид механической характеристики АМ. Поскольку в данной статье рассматривается вопрос поиска таких геометрических размеров ФГ, при которых механическая характеристика АМ имеет экскаваторный характер, должны выполняться условия по жесткости начального участка механической характеристики и величине пускового момента, то наиболее целесообразно ввести ограничения на вид механической характеристики АМ, а именно, предъявить необходимые требования к ее жесткости.

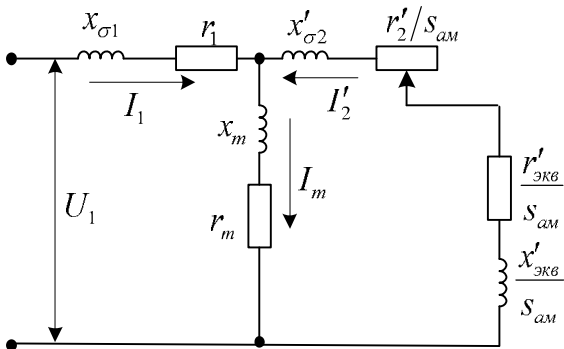


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения АМ с учетом частотозависимых сопротивлений массивной гильзы

Критерий определения оптимальных геометрических размеров ФГ можно сформулировать следующим образом: найти максимум пускового момента

$$M_{\Pi}(l, h) \rightarrow \max, \quad (11)$$

при выполнении условий необходимой жесткости механической характеристики в области малых скольжений

$$\begin{aligned} M_1(l, h, s_1) &\geq M_1 \\ M_2(l, h, s_2) &\geq M_2, \quad (12) \\ l, h &> 0 \end{aligned}$$

Данная задача относится к задачам нелинейного программирования, сложность которой определяется тем, что ограничения заданы в виде неравенств. Поэтому решение выполняем с помощью поисковых методов оптимизации [1].

Алгоритм программного решения, представленный на рис. 2 предусматривает варьирование параметров гильзы: длины  $l$  и толщины  $h$ . Сначала выбираем начальную точку поиска: такие значения, когда длина и толщина гильзы имеют минимальные значения. Далее варьлируем длину гильзы при минимуме ее толщины. В процессе расчетов определяется некоторая длина гильзы, при которой момент достигает максимальной величины. После этого толщина гильзы увеличивается до нового значения. Затем повторяется цикл расчетов поиска максимальной величины пускового момента. При этом новая длина гильзы будет меньше, чем вычисленная ранее. Данный алгоритм работает до тех пор, пока увеличение толщины гильзы приводит к уменьшению осевой длины гильзы при выполнении ограничений на вид механической характеристики. Найденные геометрические размеры ФГ  $l$  и  $h$  являются оптимальными.

Расчет эквивалентно вносимых параметров также осуществляется итерационным методом. На первом шаге расчета предполагается отсутствие вносимых эквивалентных сопротивлений, что дает завышенное значение  $I'_2$  (роторного тока). По этому значению роторного тока вычисляются значения эквивалентно вносимых параметров по формулам (2) - (9) и определяется очередная итерация роторного тока. Процесс продолжается до тех пор, пока разница между значениями роторного тока на смежных шагах не станет меньше некоторой заданной величины дельта. Таким образом, на каждом шаге (этапе) выбираются наиболее выгодные из возможных решений.

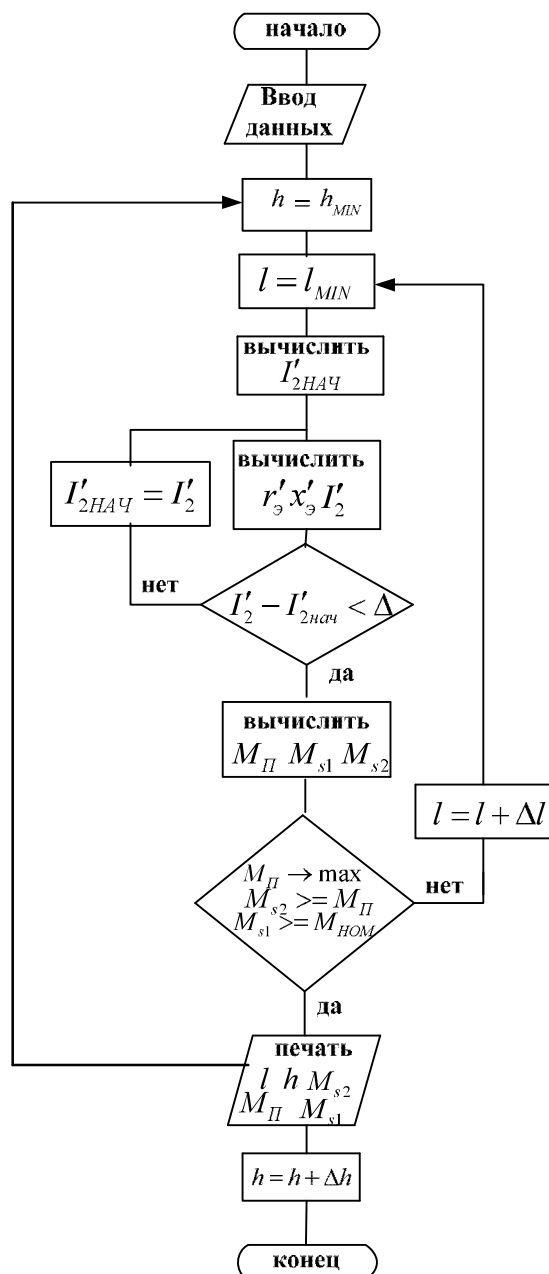


Рис. 2. Алгоритм программы поиска оптимальных размеров массивной гильзы

Необходимо так же отметить, что целенаправленное приближение к оптимальному варианту на каждом шаге увеличения толщины гильзы сопровождается приближением вида механической характеристики к заданному.

Результаты работы программы показаны на графике (рис. 3).

При проведении расчетов предполагается, что известными величинами являются: параметры АМ и СМ, коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания материала ФГ.

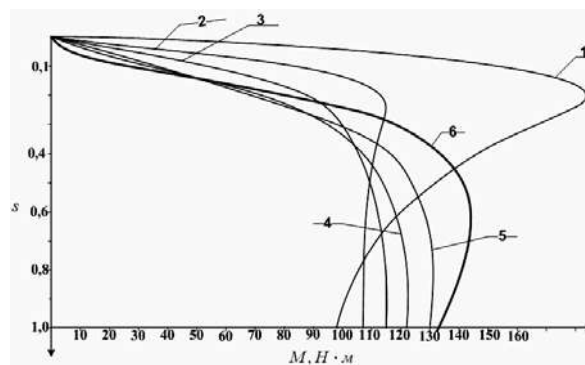


Рис. 3. Серия механических характеристик АМ при постоянной частоте вращения ведущего вала, для разных значений длины и толщины ферромагнитной гильзы: 1 -  $h = 7\text{мм}$ ,  $l = 5.4\text{см}$ ; 2 -  $h = 8\text{мм}$ ,  $l = 9.4\text{см}$ ; 3 -  $h = 9\text{мм}$ ,  $l = 10.4\text{см}$ ; 4 -  $h = 10\text{мм}$ ,  $l = 11\text{см}$ ; 5 -  $h = 12\text{мм}$ ,  $l = 11\text{см}$ ; 6 -  $h = 16\text{мм}$ ,  $l = 11\text{см}$

Как видно из графика (рис. 3) наиболее подходящим вариантом является механическая характеристика № 2 с оптимальными размерами ФГ  $h = 8\text{мм}$ ,  $l = 9.4\text{см}$ , ее вид приближается к экскаваторному.

### Выводы

Предложенная методика определения оптимальных геометрических размеров ФГ позволяет спроектировать АМ с частотозависимыми сопротивлениями в цепи ведомого ротора, имеющую улучшенные пусковые свойства и заданную жесткость механической характеристики в области малых скольжений.

### Список литературы

1. Аветисян Д.А., Соколов В.С., Хан В.Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. – М.: Энергия, 1976. – 208 с.
2. Красношанка Д.М., Устименко Н.И. Расчет эквивалентно вносимых параметров асинхронного короткозамкнутого двигателя с индукционными сопротивлениями в цепи ротора // Техническая электродинамика. – 1985. – №2. – С. 72–78.
3. Панасенков М.А. Электромагнитные расчеты устройств с нелинейными распределенными параметрами. – М.: Энергия, 1971. – 216 с.