

*Худобин К.В.,  
к.т.н. Цодик И.А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, hudobin1987@mail.ru)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТЕРЖНЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ МАШИН, С ПОМОЩЬЮ ПОЛЕВЫХ РАСЧЕТОВ**

*Разработана методика определения активных и индуктивных сопротивлений стержня короткозамкнутого ротора асинхронных машин с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения коронок зубцов, основанная на результатах численных расчетов электромагнитного поля машины в пакете программы COMSOL. Приведены сравнительные расчеты для трех типов асинхронных двигателей.*

**Ключевые слова:** *стержень короткозамкнутой обмотки ротора, асинхронный двигатель, активное, индуктивное сопротивление, эффект вытеснения тока, насыщение, метод конечных элементов.*

*Розроблено методику визначення активних і індуктивних опорів стержня короткозамкнутого ротора асинхронних машин з урахуванням ефекту витіснення струму і насичення коронок зубців, заснована на результатах чисельних розрахунків електромагнітного поля машини в пакеті програми COMSOL. Наведено порівняльні розрахунки для трьох типів асинхронних двигунів.*

**Ключові слова:** *стрижень короткозамкнутою обмотки ротора, асинхронний двигун, активний, індуктивний опір, ефект витіснення струму, насичення, метод кінцевих елементів.*

Как известно, пусковые характеристики асинхронного двигателя при прочих равных условиях, зависят от величины активного сопротивления обмотки ротора. Для улучшения пусковых характеристик современных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором используется эффект вытеснения тока, в результате действия которого плотность тока становится неравномерной - в верхней части стержней возрастает, а в нижней части уменьшается. Это приводит к увеличению активного и уменьшению индуктивного сопротивлений обмотки ротора, что приводит к повышению пускового момента и пускового тока.

Для многих вариантов сечения паза ротора расчет активных и индуктивных сопротивлений ведется на основе аналитических зависимостей полученных на основе экспериментальных исследований.

Так для прямоугольного паза коэффициенты, показывающие, во сколько раз изменяются активные и индуктивные сопротивления стержня за счет эффекта вытеснения тока имеют вид:

$$K_r = \zeta \cdot \frac{sh2\zeta + \sin 2\zeta}{sh2\zeta - \cos 2\zeta}, \quad (1)$$

$$K_x = \zeta \cdot \frac{sh2\zeta + \sin 2\zeta}{sh2\zeta - \cos 2\zeta}, \quad (2)$$

где:  $h_0$  – высота стержня;  $b_{CT}$  и  $b_{П}$  – ширина стержня и паза;  $f_2$  – частота тока в стержне;  $\rho$  – удельное сопротивление материала стержня  $h$ –высота паза ротора;  $h_r$  – эквивалентная глубина проникновения тока;

$\mu = \mu_0$  – магнитная проницаемость;  $\gamma$  – удельная проводимость материала стержня ротора.

Здесь 
$$\xi = h_r \sqrt{\pi \mu_0 \cdot \frac{b_{CT}}{b_{П}} \cdot \frac{f_2}{\rho}}, \quad h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}.$$

Для наиболее часто употребляемых сечений паза алгоритмы расчетов, полученные на основании экспериментальных исследований, широко приведены в литературе (см. например [1]). Для менее распространенных сечений имеющиеся алгоритмы дают значительные погрешности.

Исходя из этого, возникает задача разработки более точной методики определения параметров стержня ротора с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения коронок зубцов на стадии проектирования двигателя.

В данной работе показано последовательность определения активного и индуктивного сопротивлений стержня ротора с помощью пакета программ *COMSOL Multiphysics 3.5a*.

Для сравнения в работе приведены сравнительные расчеты активного и индуктивного сопротивления пазов трех двигателей. На рис.1 приведены размеры пазов для которых рассчитывались активные и индуктивные сопротивления.

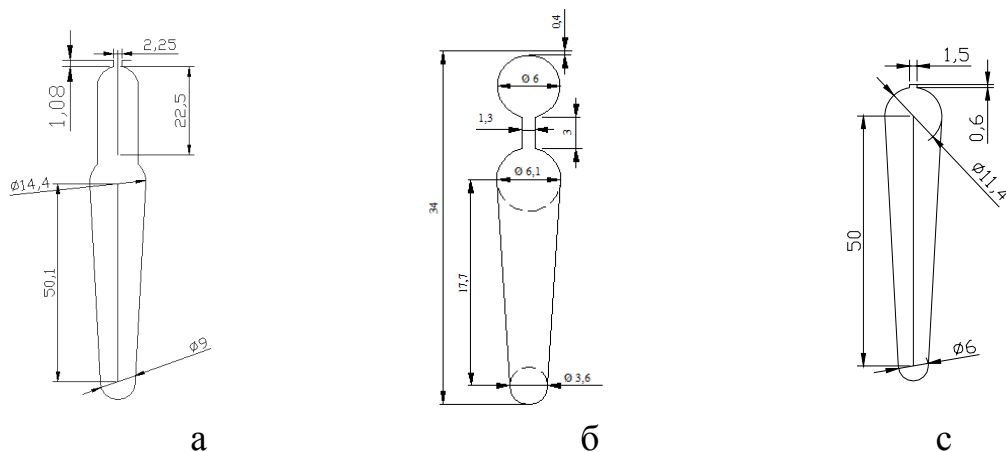


Рисунок 1 – Формы пазов ротора

Паз на рис.1.а. - это паз двигателя ВАОЗ-355М6, паз на рис.1.б. - паз двигателя ЗВР-225М4, Паз на рис.1.с. двигателе - паз двигателя ВАО-355L10.

Общая постановка задачи расчета активных и индуктивных сопротивлений стержня короткозамкнутой обмотки ротора

Первый шаг – выбор типа задачи в пакете программ *COMSOL Multiphysics 3.5a* выбираем двухмерное моделирование с использованием библиотеки AC/DC Modul \ Static Magnetik\ Perpendicular Induction Current, Vector Potential\Time-harmonic analysis. (Модуль постоянный \ переменный ток \ Статический магнетизм \ Перпендикулярно Индукционный ток, векторный потенциал.

*Параметры двумерной модели:*

Второй шаг построение геометрической модели. Здесь строится геометрия паза и исследуемой области. На рис.2 приведена геометрическая модель паза на рис.1.а. Модель имеет две области, первая область - сталь активной части ротора, а вторая область - это стержень короткозамкнутой обмотки ротора рис.2.

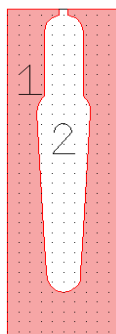


Рисунок 2 – Геометрическая модель паза

После построения геометрической модели необходимо задавать граничные условия. Учитывая что мы пренебрегаем потоками рассеивания которые замыкаются через воздушный зазор на верхней границе области исследования задаем магнитную изоляцию (Magnetic insulation).

В данной модели расчет ведется для одного паза. В реальном двигателе на параметры стержня влияют соседние пазы, потоки рассеивания которых направлены навстречу потоку рассеивания исследуемого паза поэтому насыщается только коронки зубцов. Чтобы учесть этот фактор на боковых границах задаем условие (Magnetic field).

Ярмо ротора тоже, как правило, не насыщается магнитным потоком рассеивания поэтому на нижней границе области тоже граничное условие (Magnetic field \ Магнитное поле).

Параметры стали ротора:

Относительная магнитная проницаемость (Relative permeability)  $\mu_r$  стали ротора  $\mu_r$  задается функцией стали 2312 взятая из справочника.

Относительная диэлектрическая проницаемость (Relative permittivity)  $\xi_r=1$ . Длина активной части ротора, для каждой из машин  $L1=0.475$  м.  $L2=0.26$  м.  $L3=0.595$  м.

Параметры стержня:

Относительная проницаемость (Relative permeability)  $\mu_r=1$ . Электропроводимость (Electric conductivity) алюминиевого стержня

$\sigma = 20.5 \cdot 10^6$ . Относительная диэлектрическая проницаемость (Relative permittivity)  $\xi_r=1$ . Задаем стороннее напряжение на концах стержня, то есть разность потенциалов (Potential difference). Предварительное значение разности потенциалов можно рассчитать по формуле (3).

$$\Delta U = \frac{k_E \cdot U_{1H}}{2 \cdot W_1 \cdot k_{o61}} \cdot (0.9 \div 0.7), \quad (3)$$

где:  $k_{o61}$  - обмоточный коэффициент;  $W_1$  - число витков;  $U_{1H}$  - номинальное напряжение;  $k_E$  - коэффициент.

Соотношение(3) получено исходя из коэффициента трансформации и учитывает, что напряжение на стержне с учетом падения напряжения в коротко замыкающих кольцах составляет 90-70% от наведенной ЭДС.

После задания параметров производим расчет. Затем находим полный ток стержня (Postprocessing \ Subdomain Integration \ Predefined quantities (Total current density, z component). Активное и индуктивное сопротивление стержня можно получить по формуле  $Z = U/I$ . При различных скольжения необходимо менять частоту тока в сети и одновре-

менно уменьшать приложенное напряжение. Формула для расчета напряжения (3) должна быть скорректирована 
$$\Delta U = \frac{k_E \cdot U_{1н}}{2 \cdot W_1 \cdot k_{об1}} \cdot S.$$

Были проведены расчеты пусковых характеристик двигателей (ВАОЗ-355М6, ЗВР-225М, ВАО-355L10) результаты расчетов приведены в табл. 1 по методитеке [1].

Таблица 1 - Результаты расчетов

Марка двигателей	Параметры двигателей	Методика [1]	COM-SOL	Каталог ПЕМЗ
ВАОЗ-355М6	Относительное значение пускового тока	5.3	5.7	6.0
	Относительное значение пускового момента	1.2	1.4	1.7
ЗВР-225М4	Относительное значение пускового тока	7.534	7.524	7.5
	Относительное значение пускового момента	2.434	2.476	2.6
ВАО-355L10	Относительное значение пускового тока	4.65	5.072	6.0
	Относительное значение пускового момента	1.02	0.756	1.4

Выводы: Из результатов расчета (см.табл.1), видно что описанная последовательность позволяет определить активные и индуктивные сопротивления стержня произвольной формы с достаточно высокой точностью.

### Библиографический список

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов. / [И.П.Копылов, и др.; под ред. И.П.Копылова]. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблодским Н.Н.*