

## АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОЗАМКНУТЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Папазов Ю.Н., Чувашев В.А. к.т.н.  
Украинский НИИ взрывозащищенного электрооборудования  
Украина, 83052, Донецк, ул. 50-ой Гвардейской дивизии, 17  
тел. (062)348-18-94, 382-93-53, E-mail: vach@list.ru

Васьковский Ю.Н., д.т.н., Гайденок Ю.А.  
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"  
Украина, 03056, Киев, пр-т Перемоги, 37, корп.20, кафедра "Электромеханика"  
тел. (044) 454-95-18, 241-76-38, E-mail: ntuukafem@ua.fm

*Сформульовано математичну модель для аналізу механічних характеристик короткозамкнених асинхронних двигунів, яка базується на розрахунках електромагнітного моменту методом тензора натягу електромагнітного поля. Модель враховує вплив струмів ротора з урахуванням нерівномірності розподілу густини струму по перетину масивних стержнів ротора, яка викликана як ефектом витиснення індукованих струмів, так і ефектом руху ротора. За допомогою моделі на конкретному прикладі проведено чисельні дослідження, отримано картини розподілу індукованих струмів у стержнях.*

*Сформулирована математическая модель для анализа механических характеристик короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, основанная на расчете электромагнитного момента методом тензора натяжения электромагнитного поля. Модель учитывает влияние токов ротора с учетом эффектов вытеснения токов из массивных стержней ротора, обусловленных как эффектом вытеснения, так и эффектом движения ротора. На основе модели на конкретном примере проведены численные исследования момента, получены картины распределения индуцированных токов в стержнях.*

### ВВЕДЕНИЕ

Обоснование и разработка методов расчета электромагнитного момента и механических характеристик короткозамкнутых асинхронных двигателей (АД), обеспечивающих высокую достоверность расчетных результатов, остается актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение. Особенно актуально решение этой задачи для АД с литой медной клеткой ротора [6], увеличенным пусковым моментом (двухклеточные, глубокопазные), двигателей с массивным ротором и др., в которых существенно проявляются эффекты вытеснения вихревых токов в роторных контурах.

Создание уточненных методик расчета электромагнитного момента и механических характеристик АД возможно на базе методов теории электромагнитного поля, которые обеспечивают адекватный анализ и учет особенностей распределения плотности индуктированных токов в электропроводных стержнях короткозамкнутой обмотки ротора при различной частоте вращения ротора.

С учетом требуемой точности расчета механических характеристик, особенностей конструкции АД и затрат процессорного времени при реализации расчетов вполне обоснованным является анализ поля АД в двумерном приближении в поперечном сечении его активной части. Поэтому в статье используются двумерные полевые задачи. При этом для численного решения полевой задачи используется метод конечных элементов (МКЭ) [4], хорошо зарекомендовавший себя для полевых расчетов в электрических ма-

шин и других установках, имеющих значительный объем ферромагнитных сердечников.

Если известно распределение электромагнитного поля в активной зоне АД, то действующий на ротор электромагнитный момент, можно определить одним из трех известных методов: по формуле Ампера, методом виртуального перемещения подвижной части и методом тензора натяжения векторов магнитного поля [1]. Среди указанных методов наиболее эффективным и экономичным с вычислительной точки зрения является метод тензора натяжения магнитного поля, поскольку его применение не связано с трудоемким интегрированием по объему рассматриваемого тела. Интегрирование ведется только по поверхности, а в случае двумерных задач – по линии, охватывающей рассматриваемую расчетную область. Поэтому в данной работе для расчета механической характеристики АД применяется метод тензора натяжения магнитного поля.

В статье представлена методика численного расчета электромагнитного момента и механической характеристики короткозамкнутых асинхронных двигателей, основанная на использовании результатов анализа электромагнитного поля в активной зоне, а также результаты численного моделирования электромагнитного момента на примере взрывозащищенного АД типа ЭКВ 3,5 – 180.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При рассмотрении поля АД в двумерном приближении действующий на ротор АД электромагнитный момент по методу тензора натяжения поля находится по следующему выражению [1]:

$$M_{Ai} = 2 \cdot p \cdot F_{\tau} \cdot R_{\delta} = \frac{2 \cdot p \cdot R_{\delta} \cdot l_{\delta}}{\mu_0} \cdot \int_{\tau} B_n \cdot B_{\tau} \cdot dl. \quad (1)$$

Интегрирование в (1) ведется на длине полюсного деления  $\tau$  вдоль расчетной линии, расположенной в воздушном зазоре между статором и ротором по середине высоты зазора. В выражении (1) обозначено:  $B_n, B_{\tau}$  - нормальная и тангенциальная к расчетной линии составляющие вектора магнитной индукции;  $R_{\delta}$  - радиус расчетной линии в воздушном зазоре;  $l_{\delta}$  - активная длина ротора АД;  $p$  - число пар полюсов. При численном решении задачи с помощью МКЭ интеграл в (1) заменяется конечной суммой по длинам сторон конечных элементов, вершины которых лежат на расчетной линии:

$$M_{EM} = \frac{2 \cdot p \cdot R_{\delta} \cdot l_{\delta}}{\mu_0} \cdot \sum_i^{N-1} B_{ni} \cdot B_{\tau i} \cdot \Delta l_i, \quad (2)$$

где  $B_{ni}, B_{\tau i}$  - нормальная и тангенциальная составляющие индукции на  $i$ -ом отрезке расчетной линии. Формула (2) легко программируется и удобна для компьютерной реализации.

В общем случае при наличии в расчетной области электропроводных и подвижных тел определяющее уравнение электромагнитного поля, сформулированное для гармонически изменяющихся во времени переменных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала  $A$ , имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\mu} \Delta \vec{A} - j \omega_2 \gamma \vec{A} + \gamma (\vec{V} \times \text{rot } \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стоп}}, \quad (3)$$

где  $\gamma, \mu, \omega_2$  - электропроводность, магнитная проницаемость и угловая частота изменения переменных;  $V$  - линейная скорость перемещения подвижной части;  $J_{\text{стоп}}$  - плотность токов сторонних источников. В

поперечном сечении АД вектор  $\vec{A} = \vec{z} A_z = \vec{z} A$ . Уравнение (3) дополняется граничными условиями - значениями векторного потенциала или его производных на внешней границе области. Обычно при анализе полей электрических машин принимается однородное граничное условие первого рода

$$A|_{\Gamma} = 0, \quad (4)$$

принятие которого означает пренебрежение магнитными потоками рассеивания за пределы расчетной области.

После решения уравнения (3) в декартовых координатах, составляющие магнитной индукции определяются по следующим соотношениям:

$$B_x = \partial A / \partial y, B_y = -\partial A / \partial x. \quad (5)$$

Составляющие индукции в нормально - тангенциальной системе координат определяются по выражениям:

$$B_n = B_x \cos \gamma + B_y \sin \gamma, B_{\tau} = B_x \sin \gamma - B_y \cos \gamma, \quad (6)$$

где угол  $\gamma$  измеряется между осями  $X$  и  $\tau$  декартовой и нормально - тангенциальной систем координат и отсчитывается против часовой стрелки.

Источникам поля в уравнении (3) являются известные плотности токов фаз обмотки статора, кото-

рые задаются в подобластях расчетной области - пазах сердечника статора, в которых располагаются проводники обмотки статора. При этом учитывается фазовый сдвиг токов в различных фазах обмотки.

Существует несколько методов учета действия токов обмотки ротора при полевым анализе АД. Один из известных методов заключается в предварительном расчете схемы замещения АД или построении его векторной диаграммы, по которым определяются для заданного скольжения токи статора и ротора и угол фазового сдвига между ними. Эта информация позволяет при полевым расчете задать в пазах ротора найденную плотность тока обмотки ротора как стороннюю и далее рассчитать поле и момент при совместном действии токов статора и ротора. Такой подход содержит в себе ряд погрешностей, существенно влияющих на точность расчета механической характеристики. Например, не учитывается неравномерность распределения токов по сечению стержней ротора, вызванная как эффектом вытеснения, так и движением ротора, не учитывается изменение насыщения магнитопровода и др.

Устранить эти недостатки можно при непосредственном решении уравнения (3) для области ротора АД, содержащей массивные электропроводные стержни в пазах, перемещающихся относительно вращающегося магнитного поля статора с частотой скольжения.

Каждую точку механической характеристики при любом скольжении  $s$  можно рассматривать как установившийся режим при заданных величинах плотности токов статора и частоте токов в стержнях ротора  $\omega_2 = s \cdot \omega_1$ . При численном расчете поля с помощью МКЭ зафиксируем положение ротора относительно статора. Оставляя сетку конечных элементов без изменений, будем пренебрегать периодическим изменением формы поля при перемещении ротора в пределах одного зубцового деления. Расчеты показывают, что в большинстве случаев это изменение поля незначительно и практически не влияет на расчетные характеристики АД. При этом во всех точках сечения пазов ротора задается вектор скорости перемещения проводников ротора со скоростью, связанной с угловой частотой  $\omega_2$ . Например, в декартовых координатах имеем:

$$V_x = \omega_2 R_2 \cos \gamma = \omega_2 y, V_y = \omega_2 R_2 \sin \gamma = \omega_2 x, \quad (7)$$

При этом начало системы координат задано в геометрическом центре ротора.

Такая же частота  $\omega_2$  задается и во втором слагаемом уравнения (3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Приведем результаты моделирования токов ротора и электромагнитного момента на примере серийного взрывозащищенного АД типа ЭКВ 3,5 - 180 с литой медной клеткой ротора [6].

Традиционно учет вытеснения токов в пазу ротора АД и связанное с ним увеличение джоулевых потерь осуществляется по упрощенным выражениям, полученным при сведении реальной двумерной поле-

вой задачи о распределении плотности индуцированных токов в пазу к одномерной задаче о распределении токов по высоте паза. Эти выражения широко используются при расчетах и проектировании АД. Они получены еще А. Фильдом [7], а позже изучены различными авторами (например, [3]). Упомянутые выражения базируются на существенных допущениях. В частности, на априорном представлении о характере поля в пазу (вектор индукции в пазу перпендикулярен его стенкам и параллелен дну паза), пренебрежении насыщением зубцов. Предполагается, что эффект вытеснения в пазу возникает исключительно из-за гармонического характера протекающего по нему тока частоты скольжения, но не учитывается относительное вращательное движение поля статора и проводника ротора.

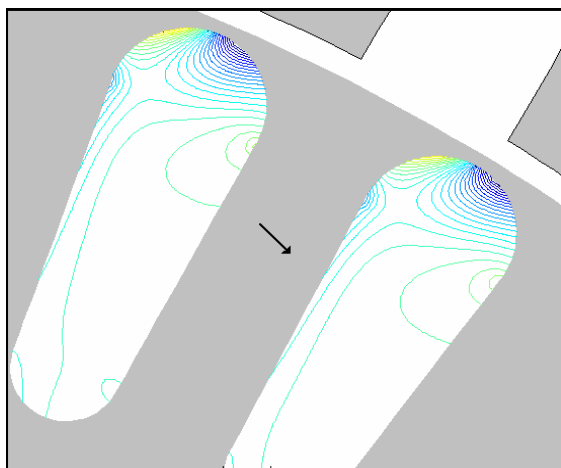


Рис. 1. Распределение плотности токов в пазах ротора

Проведенные исследования с помощью математической модели (1) – (7) позволили установить реальную картину распределения плотности токов в пазах ротора. Уравнение (3) совместно с граничными условиями решалось с помощью МКЭ для расчетной области, представляющей полное поперечное сечение рассматриваемого АД. Количество конечных элементов в сетке конечных элементов в расчетной области составляло 36840.

На рис. 1 представлен фрагмент расчетной области, на котором изображены изолинии плотности тока в пазах ротора при пуске двигателя.

Результаты расчетов показали, что плотность тока в пазу распределена неравномерно не только по высоте паза, но и по его ширине. Причем на сторонах стержней ротора, на которые "набегает" вращающееся магнитное поле статора, плотность тока имеет большие значения и проникает на большую глубину паза, чем на противоположных сторонах стержней.

На рис. 1 показано направление вращения поля статора относительно ротора. Такой характер распределения вихревых токов в стержнях объясняется тем, что в действительности токи индуцированы не пульсирующим, а вращающимся магнитным полем статора. При этом диффузия электромагнитного поля в электропроводные стержни ротора происходит не только со стороны воздушного зазора, но и со сторо-

ны стенок пазов, к которым магнитный поток проникает через зубцы ротора, выполненные из шихтованного железа.

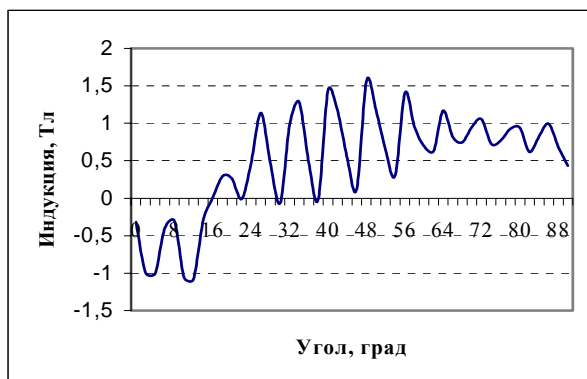


Рис. 2. Нормальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре

В начальные мгновения пуска максимальная плотность токов в верхней части стержней достигает значения  $38 \text{ A/mm}^2$ .

На рис. 2, рис. 3 и рис.4 представлены графики зависимостей нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции  $B_n(\gamma)$  и  $B_\tau(\gamma)$  в воздушном зазоре АД, а также линейной плотности электромагнитного момента в пределах одного полюсного деления, которое для рассматриваемого 4 – полюсного АД занимает  $90^\circ$ .

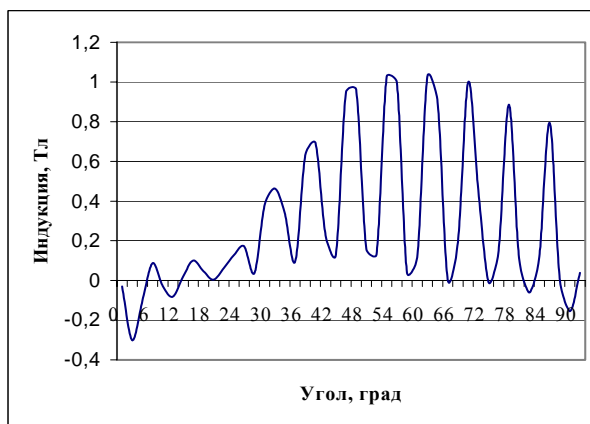


Рис. 3. Тангенциальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре

Кривые на Рис. 2 – Рис. 4 соответствуют режиму пуска двигателя. Расчет выполнен при заданном скольжении  $s=1$ , что соответствует вращению ротора относительно поля статора с частотой  $\omega_1$ .

Из представленных графиков следует резко неоднородный характер изменения рассматриваемых величин вдоль полюсного деления. Амплитуды зубцовых гармоник ярко выражены в кривых индукции, что объясняется не только значительным открытием пазов статора (ширина прямоугольного паза статора равна 7,8 мм, а величина зазора - 1,2 мм), но и глубоким (до 2,5...2,7 Тл) насыщением перекрытий (коронки) закрытых пазов ротора в начале пуска АД.

Фазовые сдвиги представленных кривых составляющих индукции и момента объясняются взаимным пространственным положением при пуске амплитуд плотностей токов в пазах статора и ротора.

Интегральное значение пускового момента, создаваемого всеми полюсами рассматриваемого двигателя, активная мощность которого в номинальном режиме равна 200 кВт при его активной длине 0,6 м, составляет 3790 Н·м.

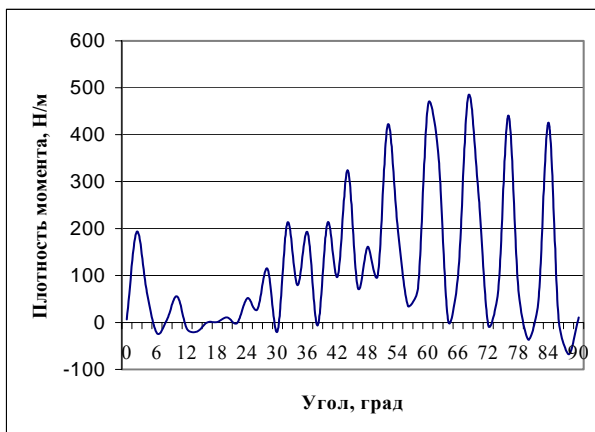


Рис.4. Линейная плотность электромагнитного момента вдоль длины полюсного деления

Разработанная полевая методика расчета момента позволяет оценить эффективность технических решений, направленных на повышение пускового момента АД, например, путем создания анизотропии электропроводности стержней ротора вдоль высоты паза [2]. В частности, одним из эффективных технических решений является создание в верхней части паза пускового слоя с меньшей электропроводностью и высотой 15-20% от полной высоты стержня.

После расчета поля активное эквивалентное сопротивление стержня определяется по выражению

$$r_c = \frac{Q_c}{I_c^2} = l_\delta \int_S (j^2 / \gamma) ds / \left( \int_S j ds \right)^2$$

где  $I_c = \int_S j ds$  - полный ток,  $Q_c = l_\delta \int_S (j^2 / \gamma) ds$  - мощность джоулевых потерь в стержне.

Были выполнены исследования величины джоулевых потерь и активного сопротивления в зависимости от коэффициента отношения электропроводности верхнего и нижнего слоев  $k_S = \gamma_B / \gamma_H$ . Величина этого коэффициента варьировалась в диапазоне значений от 0 до 1. На Рис. 5 представлены зависимости пускового момента  $M_n$  и эквивалентного сопротивления стержня  $r_c$  в зависимости от коэффициента электропроводности слоев  $k_S$  при высоте пускового слоя 18,5% от высоты паза.

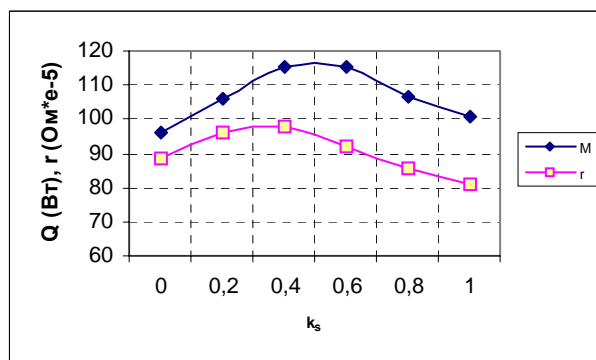


Рис. 5. Расчетные зависимости  $M_n(k_S)$  и  $r_c(k_S)$

Таким образом, существует оптимальное значение коэффициента  $k_S = 0,4 \dots 0,5$ , при котором пусковой момент существенно увеличивается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель, основанная на непосредственном численном решении уравнения электромагнитного поля для всей области АД, позволяет получить уточненные значения электромагнитного момента и механической характеристики двигателя. При этом строго учитывается сложный характер распределения индуцированных токов в сечении стержней ротора, в том числе и неравномерность распределения токов по ширине паза, возникающая в результате вращательного движения поля статора относительно ротора.

Средствами математического моделирования на базе разработанной математической модели рассчитаны уточненные значения пускового момента АД, исследовано влияние характеристик пускового слоя на величину пускового момента.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильковский Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії – Київ, НТУУ “КПІ”.-2003. – 164с.
- [2] Дудник М.З., Чувашев В.А., Броди В.Я. Особенности электромеханического расчета АД с пусковым слоем в стержнях обмотки ротора// Вестник НТУ “ХПИ”, Харьков, вып.17, 2001, с.51 – 55.
- [3] Ламмеранер Й., Таффль М. Вихревые токи – М.-Л., Энергия, 1967, 208с.
- [4] Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров – электриков - М.: Мир 1986. – 230с.
- [5] Тамм И.Е. Основы теории электричества – М.: Наука, 1976.- 616с.
- [6] Чувашев В.А., Броди В.Я., Чуванков В.Ю. Асинхронные двигатели с медной литой клеткой ротора // Уголь Украины, 1998, №7, с.20—22.
- [7] Field F.B., AIEE, 1905, p.659.

Поступила 05.10.2004