

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКАТУШЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИНДУКЦИОННОГО РЕОСТАТА В ЦЕПИ ФАЗНОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Введение. Задача улучшения пусковых, энергетических и регулировочных характеристик асинхронных двигателей (АД) крановых механизмов может быть решена путем выбора рационального конструктивного исполнения индукционных реостатов (ИР) и оптимизации их геометрии, направленной, в первую очередь, на получение максимального диапазона изменения активного и индуктивного сопротивлений. Кроме того, выбор рациональных параметров ИР обусловлен необходимостью снижения их материалоемкости и внедрения безотходной технологии производства.

В работе представлены результаты использования математической модели АД с ИР, основанной на совместном решении уравнений поля ИР с уравнениями электрического и механического равновесия АД.

Постановка задач исследования. Задачей исследования является выявление закономерностей влияния конструктивных параметров классического и двухкатушечного ИР на характеристики АД с целью формирования механической характеристики экскаваторного вида, повышения энергетических показателей АД и снижения массогабаритных показателей реостатов.

Материалы исследования. В настоящее время исследованию ИР посвящен ряд работ [1-3], в которых рассмотрены методики расчета как самих ИР, так и двигателей с ИР. При этом, как правило, теория ИР строится на уравнениях потокосцеплений, записанных по законам Кирхгофа для идеализированных обмоток. На этой основе получают Т- и Г-образные схемы замещения, в которых индуктивности разделяются на намагничивания и рассеяния. Подобное представление упрощает определение параметров и позволяет получать приближенные характеристики. Однако при использовании новых материалов и конструкций ИР применение методик, основанных на теории цепей, вызывает определенные затруднения, которые, в основном, связаны с недостаточной точностью расчета параметров ИР.

Устранение перечисленных недостатков и повышение точности расчета стало возможным благодаря использованию численных методов, среди которых можно выделить: метод интегральных уравнений, метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод конечных элементов (МКЭ). Последний получил наиболее широкое применение благодаря возможности исследования объектов с произвольными геометрическими параметрами при различных граничных условиях и внешних воздействиях.

С целью повышения точности расчета параметров и учета конструктивных особенностей ИР представим последний в виде системы уравнений [4]:

$$-\nabla(v\nabla A) = \left\{ \begin{array}{l} 0 - \text{в воздушном пространстве} \\ -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \text{в экране ИР} \\ \frac{N_{Wr} i_{02}}{S_{Wr}} - \text{в катушке ИР} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где v - магнитное сопротивление материала; A - значение векторного магнитного потенциала; N_{Wr} - число витков катушки ИР; i_{02} - ток, протекающий в катушке; S_{Wr} - площадь поперечного сечения катушки; σ - электропроводность материала.

Система уравнений (1) должна быть дополнена уравнениями равновесия напряжений для каждой фазы ИР:

$$u_{02} = r_{02} i_{02} + \frac{N_{Wr} l}{S_{Wr}} \int_{S_{Wr}} \frac{\partial A}{\partial t} dS_{Wr},$$

где u_{02} - напряжение, приложенное к ИР; r_{02} - активное сопротивление обмотки; l - длина витка.

В установившихся режимах система уравнений (1) примет вид

$$-\nabla(v\nabla A) = \left\{ \begin{array}{l} 0 - \text{в воздушном пространстве} \\ -j\omega\sigma A - \text{в экране ИР} \\ \frac{N_{Wr} i_{02}}{S_{Wr}} - \text{в катушке ИР} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где \dot{A} - вектор комплексных значений векторного магнитного потенциала; \dot{I}_{02} - комплексное значение тока в ИР; ω - угловая частота сети.

Объединив систему уравнений (1) с уравнениями, описывающими АД [4], получим:

$$\left. \begin{aligned} [u] &= [R][i] + \frac{d[L(i, \gamma)]i}{dt} \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{M - M_c}{J} \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_2 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

$$-\nabla(v\nabla A) = \left\{ \begin{array}{l} -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \text{в экране ИР} \\ \frac{N_{W\Gamma} i_{02}}{S_{W\Gamma}} - \text{в катушке ИР} \end{array} \right\}$$

где

$$[u] = [u_{AB} \quad u_{BC} \quad u_{CA} \quad u_{ab} \quad u_{bc} \quad u_{ca}]^T;$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{01} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (r_{02} + r_{ИР}(i)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (r_{02} + r_{ИР}(i)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (r_{02} + r_{ИР}(i)) \end{bmatrix};$$

r_{01} - активное сопротивление обмотки статора; r_{02} - активное сопротивление обмотки ротора; $r_{ИР}$ - активное сопротивление ИР, M_c - момент статического сопротивления двигателя; J - момент инерции АД; ω_2 - скорость вращения ротора АД.

M - электромагнитный момент двигателя, определяемый как

$$M = -L_\mu(i) p \left[(i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c) \sin(p\gamma) + (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \sin\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + (i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) \sin\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \right].$$

Матрица $[L(i, \gamma)]$ имеет вид

$$[L(i, \gamma)] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

где

$$A_{11} = \begin{bmatrix} L_S & L_\mu \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_\mu \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_\mu \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) & L_S & L_\mu \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_\mu \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_\mu \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & L_S \end{bmatrix};$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} L_\mu \cos(p\gamma) & L_\mu \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & L_\mu \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_\mu \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & L_\mu \cos(p\gamma) & L_\mu \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_\mu \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & L_\mu \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & L_\mu \cos(p\gamma) \end{bmatrix};$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} L_{\mu} \cos(p\gamma) & L_{\mu} \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{\mu} \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{\mu} \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{\mu} \cos(p\gamma) & L_{\mu} \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{\mu} \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{\mu} \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{\mu} \cos(p\gamma) \end{bmatrix};$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} L_{R02} & L_{\mu} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{\mu} \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{\mu} \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) & L_{R02} & L_{\mu} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{\mu} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{\mu} \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{R02} \end{bmatrix}.$$

Входящие в подматрицы A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} коэффициенты имеют вид:

$$L_{\mu}(i) = \frac{3}{2}M_{0102}(i) = \frac{3}{2}M_{0201}(i);$$

$$L_s(i) = L_{\sigma s} + L_{\mu}(i);$$

$$L_r(i) = L'_{\sigma r} + L_{\mu}(i),$$

где L_{μ} - индуктивность цепи намагничивания; L_s - полная индуктивность статора; L_r - полная индуктивность ротора; M_{0102} , M_{0201} - взаимная индуктивность статора и ротора.

На основе системы уравнений (3) в работе создана математическая модель АД с ИР, базирующаяся на МКЭ с учетом электромагнитных процессов в цепи фазного ротора АД [5], позволяющая с необходимой точностью получить нелинейные электромагнитные параметры ИР в зависимости от тока, скольжения и угла поворота ротора АД. Схема модели представлена на рис. 1.

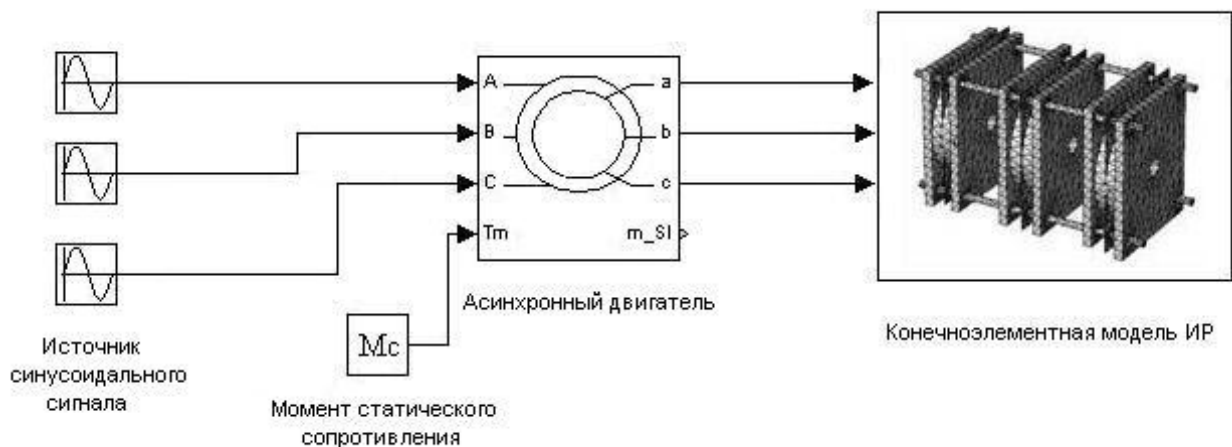


Рис. 1. Модель АД с ИР, основанная на совместном решении уравнений поля и цепей.

На основе разработанной математической модели проведены исследования классической и двухкатушечной конструкций ИР, которые позволили определить влияние параметров ИР на характеристики АД. В процессе моделирования диапазон изменения толщины центральной пластины двухкатушечной конструкции находился в пределах 2...16 мм, что обусловлено применением листов металлопроката стали Ст3 стандартных размеров. Количество витков в фазах полукатушек при этом оставалось неизменным и равнялось 60. Моделирование выполнено для двигателя МТВ-412-8 при включении обмоток статора в звезду и питающем напряжении $U_{л}=380$ В. На рис. 2-5 представлены зависимости $I=f(s)$, $M=f(s)$, $\cos \varphi = f(s)$, $\eta = f(s)$ при встречном включении полукатушек ИР.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что уменьшение толщины центральной ферромагнитной пластины двухкатушечной конструкции до 2 мм приводит к существенному росту пускового тока АД до $(3...4)I_H$. При этом механическая характеристика АД приобретает экскаваторный вид и обладает достаточной жесткостью в рабочем диапазоне.

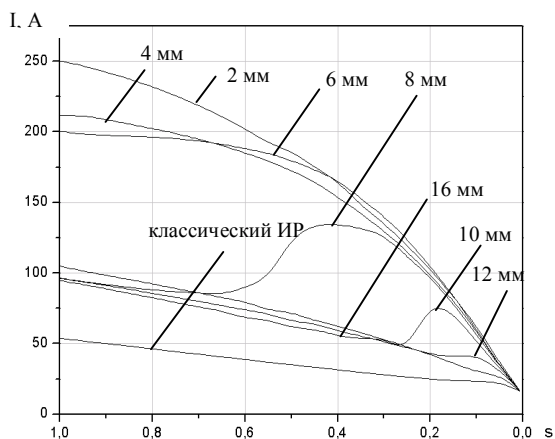


Рис. 1. Зависимость тока АД от скольжения.

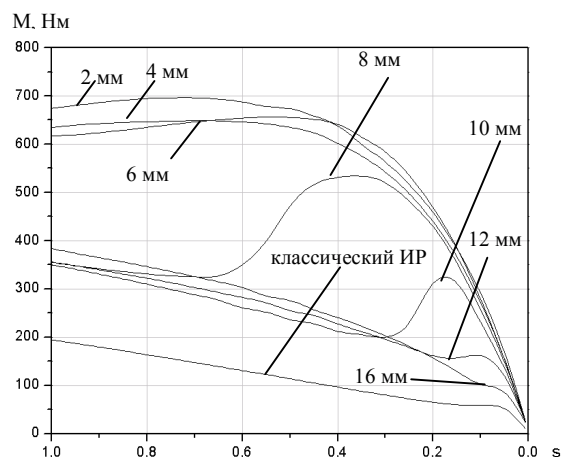


Рис. 2. Зависимость момента АД от скольжения.

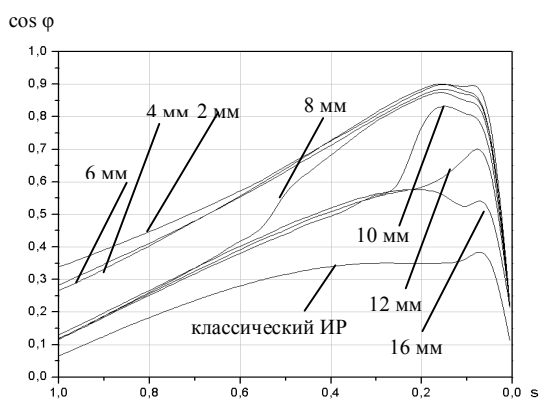


Рис. 3. Зависимость cosφ АД от скольжения.

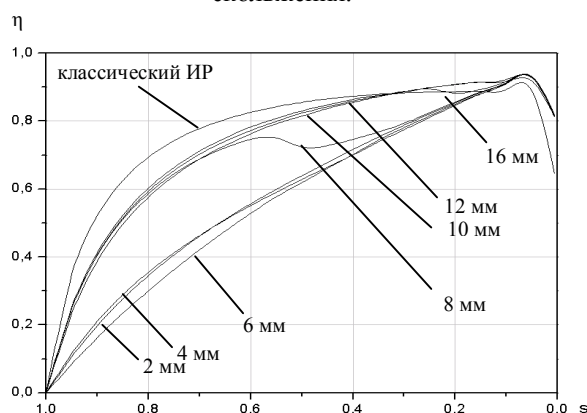


Рис. 4. Зависимость КПД АД от скольжения.

В отличие от двухкатушечной классическая конструкция ИР обеспечивает получение пускового тока, близкого к номинальному за счет существенного увеличения сопротивления ИР. При этом наблюдается резкое уменьшение жесткости механической характеристики в области рабочих скольжений.

Кроме того, уменьшение толщины центральной пластины двухкатушечной конструкции ИР приводит к двукратному росту максимального значения коэффициента мощности, который достигает 0,85...0,9. Максимальное значение КПД при этом как у классической, так и у двухкатушечной конструкций является приблизительно одинаковым и равным 85...87 %.

Выводы. Полученные зависимости, отражающие величину изменения тока, электромагнитного момента, коэффициента мощности и КПД от толщины центральной ферромагнитной пластины двухкатушечной конструкции ИР позволили установить, что требуемая жесткость механической характеристики для исследуемого АД может быть достигнута при толщине центральной ферромагнитной пластины 4...6 мм.

Литература.

1. Тигунов А.П. Расчет параметров индукционных сопротивлений и характеристик регулируемого асинхронного двигателя: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1983. – 22 с.
2. Власов В.Г. Бесконтактные асинхронные двигатели с индукционными частотно зависимыми сопротивлениями в цепи ротора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1970. – 18 с.
3. Головань В.И. Разработка и исследование асинхронных двигателей с индукционным сопротивлением в цепи ротора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1991. – 18 с.
4. Качура А.В., Сьянов А.М. Методика расчета пусковых характеристик асинхронных двигателей с индукционными реостатами с учетом их взаимного влияния // Сборник трудов Севастопольского национального технического университета. - Севастополь 2005. - С. 44-45.
5. Качура А.В., Колычев С.В., Сьянов А.М. Проектирование электроприводов на основе совместного анализа цепевых и полевых моделей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2006, Вип. 3/2006(38)41. -С. 17-19.