

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННЫХ РЕОСТАТОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Качура А.В., ст. преп., Колычев С.В., доц., Сьянов А.М., д.т.н., проф.
Днепродзержинский государственный технический университет
51918, г. Днепродзержинск, ул. Днепростроевская, 2а
E-mail: noroman@yandex.ru, fem@ukr.net*

У статті запропонована математична модель індукційного реостата, що базується на методі кінцевих елементів. Виконані порівняльні дослідження електромагнітних параметрів для трьох найбільш поширених конструкцій індукційних реостатів, які дозволили встановити, що двохкатушкова конструкція з центральною ферромагнітною пластиною має найбільший ступінь зміни електромагнітних параметрів при зміні частоти напруги живлення від 5 до 100 Гц.

Ключові слова: індукційний реостат, векторний магнітний потенціал, кінцевоелементна модель.

The mathematical model of induction rheostat which is based on the method of finite elements is offered in the article. Comparative researches of electromagnetic parameters are executed for three most widespread constructions of induction rheostats, which allowed making the statement that a two-coil type construction with a central ferromagnetic plate owns most degree of change of electromagnetic parameters at the change of frequency of voltage from 5 to 100 Hertz.

Keywords: induction rheostat, vector magnetic potential, finite element model.

Введение. На предприятиях металлургической и химической отраслей достаточно распространенными являются подъемно-транспортные механизмы, в которых используются АД с фазным ротором и дополнительными пусковыми сопротивлениями. Многолетний опыт эксплуатации подобных установок показывает, что применение открытых пусковых сопротивлений в таких электроприводах (ЭП) связано с рядом отрицательных последствий, среди которых:

- необходимость использования большого количества пусковой аппаратуры;
- наличие открытых контактов, исключающих применение подобных установок в помещениях со взрывоопасной средой;
- существенное увеличение массогабаритных показателей всей системы;
- необходимость привлечения дополнительного персонала с целью обслуживания контактной аппаратуры и др.

Существующие проблемы приводят к длительным простоям и многократным ремонтам оборудования.

В сложившейся ситуации повышение надежности и функциональности кранового оборудования является важной задачей, которая может быть решена путем включения в цепь фазного ротора АД индукционных реостатов (ИР). Данное решение позволяет резко снизить количество контактной аппаратуры, а при необходимости вообще избавиться от нее.

В работе рассмотрены особенности определения электромагнитных параметров ИР с помощью мето-

да конечных элементов (МКЭ), а также выполнен анализ пределов их изменения в зависимости от величины и частоты питающего переменного напряжения и геометрических параметров.

Цель работы. Разработка математической модели ИР в полевой постановке для оценки степени изменения их электромагнитных параметров в зависимости от конструкции и свойств применяемых материалов.

Материал и результаты исследования. Сравнительные исследования электромагнитных параметров выполнены для трех типов ИР, внешний вид которых показан на рис. 1 – 3 [1, 2].

Физические процессы в ИР описываются системой дифференциальных уравнений Максвелла для анизотропных нелинейных сред, которая имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \\ \text{rot} \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t; \\ \text{div} \mathbf{D} &= \rho; \\ \text{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где \mathbf{H} - напряженность магнитного поля; \mathbf{J} - плотность электрического тока; \mathbf{D} - электрическая индукция; \mathbf{E} - напряженность электрического поля; \mathbf{B} - магнитная индукция; ρ - плотность электрического заряда.

К уравнениям (1) добавляются уравнения, характеризующие электромагнитные свойства материальной среды:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}; \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \tag{2}$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость; μ - магнит-

ная проникаемость; σ - удельная проводимость среды.

Выполнив ряд известных математических преобразований [3], получим общее уравнение поля, записанное относительно векторного магнитного потенциала:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (3)$$

где \mathbf{A} - значение векторного магнитного потенциала; ν - магнитное сопротивление материала; σ - временной параметр.

Записав уравнение (3) для ферромагнитных элементов ИР, обмоток и воздушных зазоров, получим общую систему уравнений, описывающую трехмерную модель ИР в полевой постановке:

$$-\nabla (\nu \nabla \mathbf{A}) = \left\{ \begin{array}{l} 0 - \text{в воздушном пространстве} \\ -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{в экране ИР} \\ \frac{N_{Wr} i_{02}}{S_{Wr}} - \text{в катушке ИР} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где N_{Wr} - число витков катушки ИР; i_{02} - ток, протекающий в катушке; S_{Wr} - площадь поперечного сечения катушки.

Система (4) должна быть дополнена уравнением равновесия напряжения для роторной обмотки АД [4]:

$$u_{02} = r_{02} i_{02} + \frac{N_{Wr} l}{S_{Wr}} \int \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} dS_{Wr}, \quad (5)$$

где u_{02} - напряжение на ИР; l - длина проводника.

В установившихся режимах система уравнений (4) примет вид:

$$-\nabla (\nu \nabla \mathbf{A}) = \left\{ \begin{array}{l} 0 - \text{в воздушном пространстве} \\ -j\omega\sigma \mathbf{A} - \text{в экране ИР} \\ \frac{N_{Wr} \mathbf{I}_{02}}{S_{Wr}} - \text{в катушке ИР} \end{array} \right\}, \quad (6)$$

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

Для решения (4) совместно с (5) воспользуемся методом Галеркина и методом конечных элементов [4]. Уравнения (4) и (5) в этом случае могут быть представлены в компактной матричной форме:

$$\begin{bmatrix} [S] & -[C] \\ 0 & r_{02} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [i_{02}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [N] & [0] \\ 1[C]^T & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} [A] \\ [i_{02}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ u_{02} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $[S]$ - матрица связи расчетной области с μ ; $[C]$ - матрица связи области, занимаемой катушкой с током в катушке; $[N]$ - матрица учета вихревых токов.

В комплексной форме запись (7) примет вид:

$$\begin{bmatrix} [S] + j\omega s[N] & -[C] \\ -[C]^T & -\frac{r_{02}}{j\omega s l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [i_{02}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ -\frac{u_{02}}{j\omega s l} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где s - скольжение.

Системы (7) и (8) составляют полные системы уравнений, описывающие ИР в трехмерной полевой постановке и позволяющие исследовать электромагнитные процессы как в установившихся, так и в переходных режимах.

На рис. 4 представлена трехмерная анализируемая модель ИР классической конструкции с полным экранированием фаз обмоток. В модели принимается, что плотность тока в обмотке распределяется равномерно по всему сечению. В стальных элементах магнитная проникаемость является величиной нелинейной и зависит от кривой намагничивания. Вся исследуемая конструкция окружена воздушным пространством с учетом реальных электрофизических свойств. Дискретная модель исследуемого ИР показана на рис. 4.

Расчет ИР выполнен для установившихся режимов при воздействии питающего напряжения 10 - 200 В и частотах 5, 50, 100 Гц.

Расчеты показали, что электромагнитное поле, которое создается МДС обмотки ИР, частично проникает вглубь массивных ферромагнитных полудисков (рис. 5). При этом глубина проникновения электромагнитного поля зависит от частоты тока ротора.

На рис. 6 - 8 представлены расчетные и экспериментальные кривые зависимости величины полного сопротивления одной фазы ИР от тока в обмотке при частотах 5, 50 и 100 Гц соответственно.

Сравнивая расчетные и экспериментальные значения полного сопротивления для различных частот, можно заключить, что разработанная математическая модель ИР обеспечивает удовлетворительную точность расчета, а расхождение в 5 - 10 % можно объяснить тем, что математическая модель ИР рассматривается при температуре 20 °С в условиях отсутствия влияния нагрева обмотки на ее параметры. Соблюдение же постоянных температурных условий в процессе эксперимента вызывает определенные затруднения.

Поскольку разработанная математическая модель ИР позволяет получить приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных данных, воспользуемся ею для исследования других конструкций ИР, в частности, двухкатушечной (рис. 2) и стержневой (рис. 3).

Конечноэлементные модели рассматриваемых конструкций представлены на рис. 9 и 10 соответственно.

Расчет моделей выполнен для установившихся режимов при напряжении 10 - 200 В и частоте 5, 50 и 100 Гц. На рис. 11 и 12 показано трехмерное распределение амплитудного значения магнитной индукции. Расчетные зависимости полного сопротив-

ления одной фазы ИР анализируемых конструкций от тока в обмотке представлены на рис. 13 и 14 соответственно.

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что среди рассмотренных конструкций наибольшей степень изменения электромагнитных параметров при воздействии питающего напряжения различной частоты обладает двухкатушечная конструкция ИР, что позволяет ее использовать как базовую при дальнейших исследованиях.

Выводы. 1. Получены системы уравнений, описывающие электромагнитные процессы в ИР в трехмерной постановке для квазистатических и динамических режимов работы, что позволило исследовать влияние частоты и величины питающего напряжения на электромагнитные параметры ИР.

2. Предложена математическая модель ИР в полевой постановке с учетом реальных геометрических параметров и электрофизических свойств материалов, которая позволила установить, что среди таких конструкций ИР, как классическая, стержневая и двухкатушечная, последняя обладает наибольшей степенью изменения электромагнитных

параметров при изменении частоты питающего напряжения от 5 до 100 Гц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Розов Ю.М., Тигунов А.П. Методические рекомендации по расчету асинхронного двигателя с индукционным роторным сопротивлением. – Киев: Наук. думка, 1981, - 52 с.
2. Головань В.И. Разработка и исследование асинхронных двигателей с индукционным сопротивлением в цепи ротора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1991. – 18 с.
3. Качура А.В., Съянов А.М., Сторожко В.С. Математическая модель индукционного реостата с учетом насыщения магнитной системы. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, 2002 р., С. 376-378.
4. Качура А.В., Съянов А.М. Разработка универсального пакета прикладных программ для моделирования индукционных реостатов. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, Вип. 4/2005(33), С. 158-161.

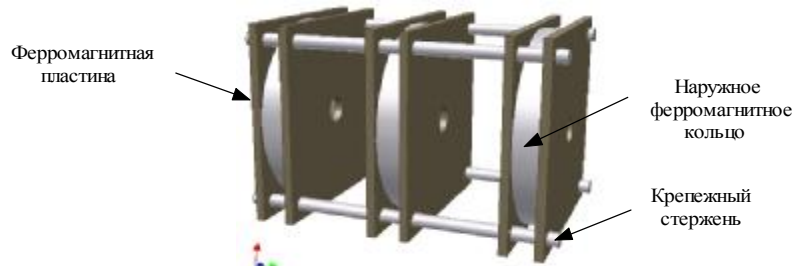


Рисунок 1 – Классическая конструкция ИР

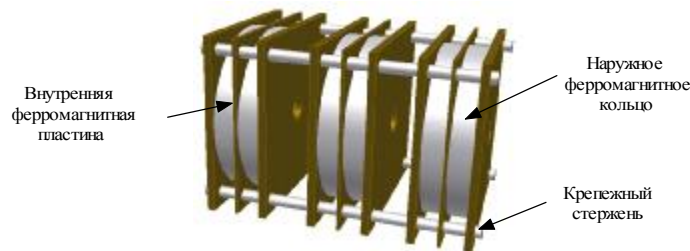


Рисунок 2 – Двухкатушечная конструкция ИР

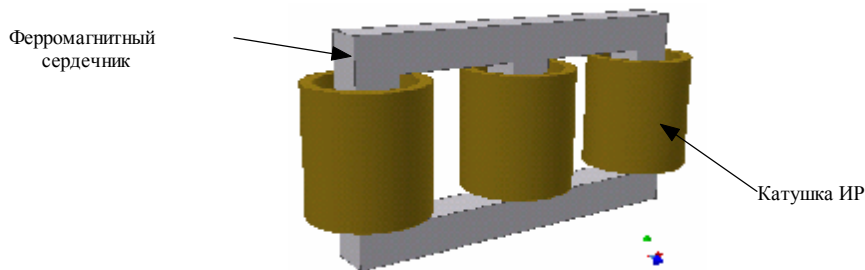


Рисунок 3 – Стержневая конструкция ИР



Рисунок 4 – Дискретная модель классической конструкции ИР

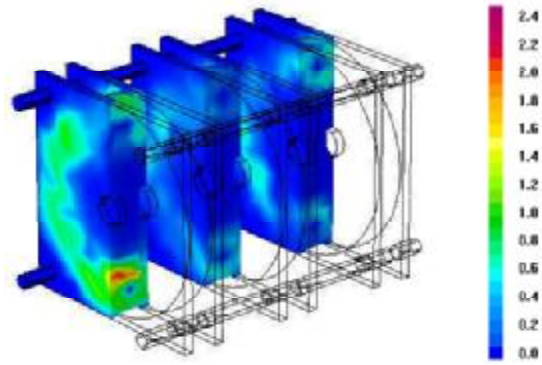


Рисунок 5 – Распределение значений магнитной индукции в ИР

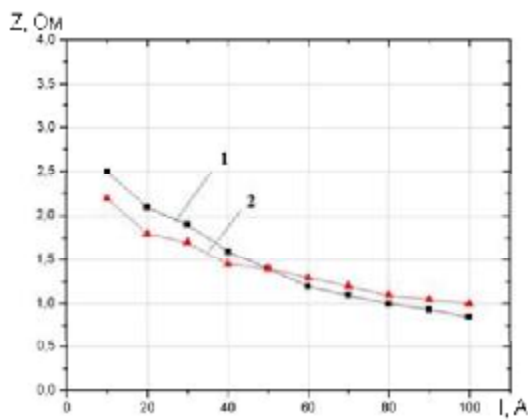


Рисунок 6 – Зависимость полного сопротивления ИР при частоте 5 Гц:
1 – расчетные данные;
2 – экспериментальные данные

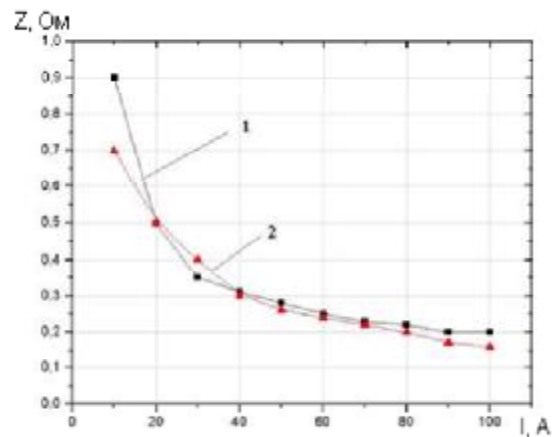


Рисунок 7 – Зависимость полного сопротивления ИР при частоте 50 Гц:
1 – расчетные данные;
2 – экспериментальные данные

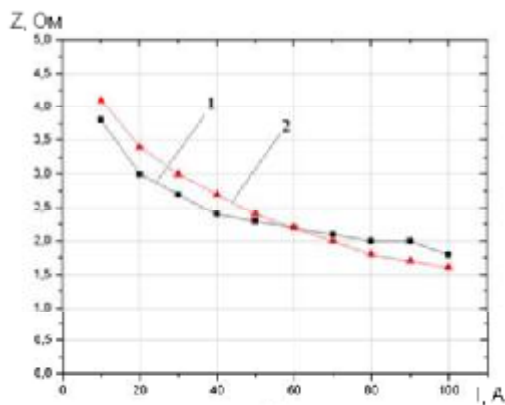


Рисунок 8 – Зависимость полного сопротивления ИР при частоте 100 Гц:
1 – расчетные данные;
2 – экспериментальные данные

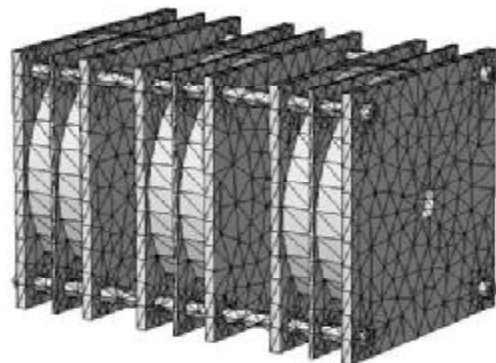


Рисунок 9 – Конечноэлементная модель двухкатушечной конструкции ИР

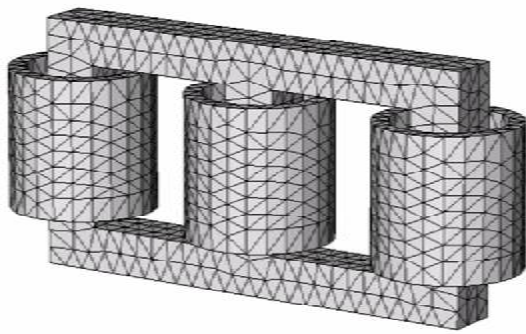


Рисунок 10 – Конечноэлементная модель конструкции ИР

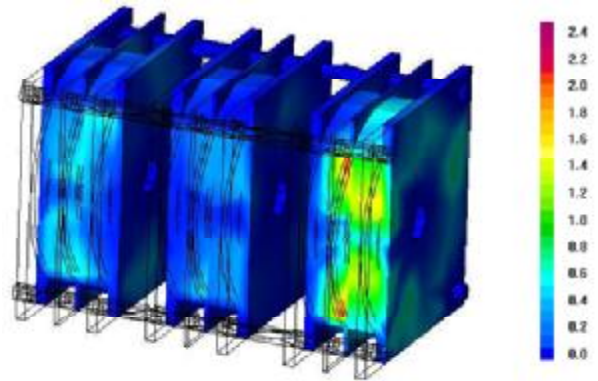


Рисунок 11 – Распределение магнитной индукции в сечении ИР

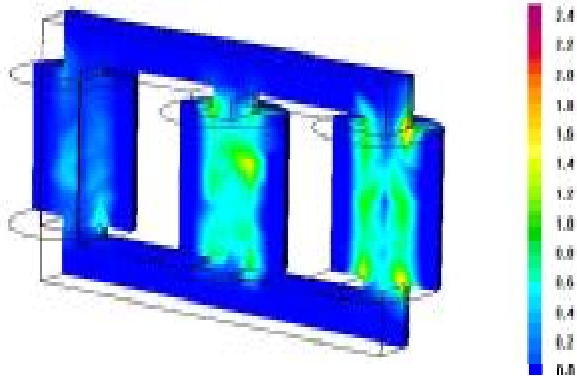


Рисунок 12 – Распределение амплитудного значения магнитной индукции ИР

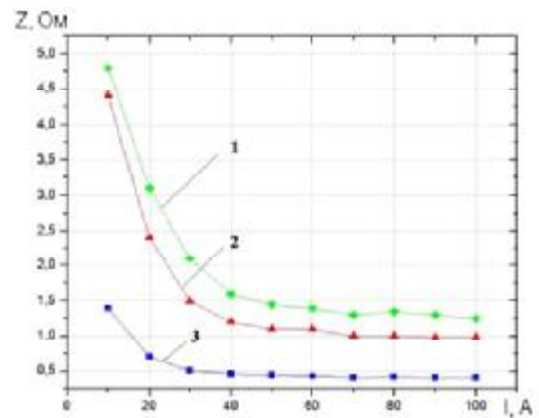


Рисунок 13 – Зависимость полного сопротивления ИР дисковой конструкции от частоты питающего напряжения: 1 – 100 Гц; 2 – 50 Гц; 3 – 5 Гц

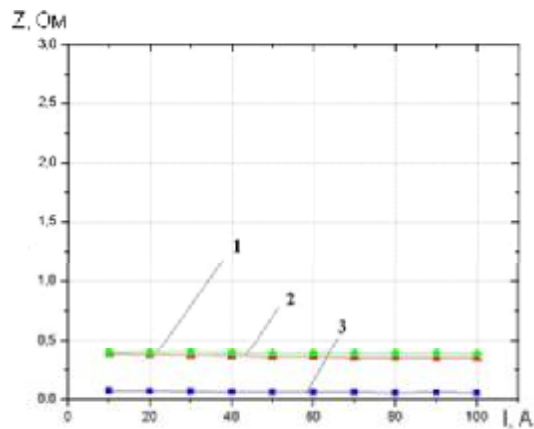


Рисунок 14 – Зависимость полного сопротивления ИР стержневой конструкции от частоты питающего напряжения: 1 – 100 Гц; 2 – 50 Гц; 3 – 5 Гц

Стаття надійшла 14.04.2007 р.